

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной

работе и цифровому развитию

Е.В. Конопацкий



«13» марта 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» на диссертацию Бударина Александра Михайловича «Разработка модели пластического деформирования и разрушения бетона с учетом повреждаемости и ее применение для оценки сопротивляемости плоских плит перекрытий продавливанию», представленную в диссертационный совет 24.2.310.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. «Строительная механика».

1. Актуальность темы исследования

Актуальность работы связана с массовым использованием в современном строительстве монолитных железобетонных каркасов с безбалочными плитами перекрытия (до 75 % всего объема). Особенностью данного конструктивного решения является наличие значительной концентрации сдвигающих усилий на относительно небольшой площади сопряжения колонн с перекрытиями, что может

привести к их разрушению от продавливания. Опасность этого типа разрушения заключается в его хрупком, внезапном характере. Разрушение происходит без проявления внешних признаков на поверхности плиты в виде трещин. 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 множества конструктивных и механических параметров, часть из которых не учитывается в действующих нормативных документах. Одной из основных проблем действующих норм является то, что большая часть лабораторных испытаний, на основе результатов которых строятся нормативные методики, была выполнена для плит с относительно малой рабочей высотой сечения, в то время как в строительных объектах часто проектируются и выполняются плиты со значительно большей высотой. Отсутствие достаточного количества испытаний для плит с большой рабочей высотой сечения не позволяет достоверно судить о допустимости применения той или иной расчетной методики для оценки несущей способности подобных железобетонных плит конструкций на продавливание.

Для исследования влияния различных факторов на несущую способность железобетонных плит при продавливании применяется численное моделирование в рамках метода конечных элементов (МКЭ) с использованием нелинейных моделей материала. Однако существующие модели бетона в конечно-элементных комплексах, ориентированных на универсальное применение, обладают рядом недостатков:

- значительное отклонение формы предельной поверхности модели материала от экспериментальных данных, полученных при сдвиге, срезе и продавливании;

- отсутствие алгоритмов ЭВМ, позволяющих корректно отразить основные особенности напряженно-деформированного состояния бетона при продавливании, включающие эффекты контракции, дилатации, масштабный эффект, а также зависимость деформаций сдвига, соответствующих пределу прочности от вида напряженного состояния;

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

Таким образом, задача разработки модели бетона, обладающей возможностью решения проблемы локализации сдвиговых деформаций, а также алгоритмом подбора параметров модели и разработки на ее основе прикладной методики расчета плит на продавливание, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение материала железобетонных плит, несомненно, является актуальной научной задачей.

1. Структура и содержание работы.

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.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, степень ее разработанности, формулируются цели и задачи исследования, описывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. В дальнейшем 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 автор исследования относит: 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.

В работе 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.

Для моделирования эффектов контракции и дилатации в разработанной модели используется комбинированная поверхность пластического потенциала, состоящая из трех частей. В модели используется двойное независимое упрочнение предельной поверхности: девиаторная эволюция и эволюция шатра сжатия. Скорость эволюции девиаторной 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, изменение жесткости при циклических и знакопеременных нагрузках. Данный механизм подразумевает использование в модели параметров поврежденности материала при растяжении и сжатии, которые представляют собой скалярные безразмерные множители к компонентам тензора напряжений. Скорость роста параметров зависит от вида напряженного состояния и замедляется с ростом обжатия 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 выполнить учет масштабного эффекта и решить проблему локализации необратимых деформаций.

Для использования разработанной модели необходимо 15 параметров, которые могут быть найдены на основании класса бетона

(соответствующие формулы представлены в диссертационной работе). Модель материала реализована в программном комплексе «ANSYS» в виде пользовательской модели.

Третья глава посвящена валидации разработанной автором модели материала. Процедура валидации заключалась в сопоставлении результатов лабораторных испытаний и результатов численного моделирования. 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). Разница между исследуемыми численно и экспериментально величинами не превышала 10%.

Для тестирования зависимости результатов моделирования от размера конечно-элементной сетки в работе были воспроизведены испытания шарнирно опертых балок с надрезом. Было выполнено три численных испытания с разными размерами конечно-элементной сетки. Различие между результатами для образцов с разным размером конечно-элементной сетки оказалось несущественным.

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

В диссертационной работе было выполнено численное моделирование 11 железобетонных плит, имеющих различную рабочую высоту сечения и процент продольного армирования растянутой зоны. В лабораторных и численных испытаниях наблюдалась схожая картина трещинообразования и графиков «нагрузка-перемещение». Максимальная разница между величинами предельного продавливающего усилия, полученными в лабораторных и численных испытаниях, составила 5,7 %.

Сопоставление результатов лабораторных испытаний и результатов численных экспериментов показало, что разработанная автором модель бетона позволяет с достаточной точностью моделировать работу материала при кратковременном статическом нагружении и может быть использована для 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 на основе номинальных касательных напряжений, нормализованных относительно прочности бетона на одноосное растяжение. 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. 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 на несущую способность плиты при продавливании. На основании полученных результатов можно заключить, что с уменьшением величины пролета среза несущая способность плиты увеличивается.

В третьей серии исследовалось влияние относительного размера опоры на несущую способность плиты при продавливании. Увеличение данного размера приводит к росту несущей способности и деформаций, соответствующих наступлению предельного состояния. Следовательно, изменение относительного размера опоры влияет не только на вклад бетона в несущую способность плиты, но и на вклад поперечного армирования.

В четвертой серии исследовалось влияние процента продольного армирования растянутой зоны плиты μ на ее несущую способность при разрушении от продавливания. На основании полученных результатов можно заключить, что увеличение процента продольного армирования растянутой зоны μ ведет к росту несущей способности плиты при продавливании.

Пятая глава посвящена разработке прикладной методики расчета железобетонных плит на продавливание. Разработка методики выполнена с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов (МНК). 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

Fult. Для плит без поперечной арматуры Fult принимается равной усилию F_b , воспринимаемому бетоном. Для плит с поперечной арматурой Fult вычисляется как минимальная величина среди условий, предложенных автором.

Оценка точности инженерной методики выполнялась 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}). 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.

В рамках сравнения с результатами численных экспериментов представленная методика обладает наименьшим CV среди всех рассмотренных подходов. Для всех серий испытаний наблюдается высокая степень соответствия опытным данным.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается корректной постановкой задач исследования, использованием апробированных математических и статистических методов анализа результатов, согласованностью результатов численных исследований и экспериментальных данных. Численные расчеты выполнены с использованием программного комплекса «ANSYS», верифицированного в системе РААСН для проведения данных исследований.

4. Научная новизна работы.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Разработана нелинейная модель бетона на базе 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 учета эффектов контракции и дилатации. Учет данных эффектов выполняется путем использования в модели двойного независимого упрочнения предельной поверхности и комбинированной поверхности пластического потенциала. Механизм упрочнения зависит от нормы тензора пластических деформаций и вида напряженного состояния. Механика разрушения используется для моделирования процесса разупрочнения материала и изменения жесткости при циклическом и знакопеременном нагружении. Для моделирования разупрочнения материала при растяжении применяется энергетический подход, позволяющий учесть масштабный эффект, а также решить проблему локализации необратимых деформаций. Модель 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. Модель реализована в ПК «ANSYS» на языке программирования FORTRAN77. На основании результатов валидации сделан вывод о приемлемой для инженерных расчетов точности расчета с применением авторской модели (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 %).

2. Получены результаты численных испытаний 107 образцов на продавливание с конструктивными и механическими параметрами, характерными для реальных строительных объектов, но отсутствующими в 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. Для каждой серии были получены данные о зависимости несущей способности конструкции от исследуемого конструктивного параметра.

3. С помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов, на основании результатов лабораторных испытаний 590 плит, представленных в исследованиях различных авторов, разработана инженерная методика расчета плит на продавливание. На основании результатов численных испытаний выполнена валидация данной методики. Разработанная методика расчета плит на продавливание отражает влияние основных механических и конструктивных параметров 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

5. Значимость полученных результатов для развития соответствующих отраслей науки.

Представленная диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы, связанной с развитием методики расчета плоских железобетонных плит на продавливание. Полученные результаты характеризуются значимостью для строительной механики и практики проектирования.

В работе получены данные о несущей способности и деформациях железобетонных плит различной конфигурации.

Дана оценка точности нормативных методик расчета плит на продавливание на основании сравнения с результатами опытных данных. Выполнено численное моделирование бетонных и железобетонных конструкций в рамках статического кратковременного нагружения, результаты которого могут быть использованы для решения широкого спектра инженерных задач.

Разработанная инженерная методика расчета плит на продавливание может быть использована для проверки несущей способности на продавливание плитных конструкций с различными механическими и конструктивными параметрами.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

В качестве дальнейшего развития методика расчета железобетонных плитных конструкций на продавливание может быть усовершенствована для учета сосредоточенного изгибающего момента, действующего на опоре, предварительного напряжения плиты. Модель бетона может быть усовершенствована для прямого учета сил зацепления.

Материалы диссертации и разработанное программное обеспечение могут быть использованы в методических курсах для инженеров проектировщиков, включая пособия по калибровке параметров модели на более широком круге экспериментальных данных с учетом существующих нормативных документов.

7. Публикации.

По материалам диссертации всего опубликовано 8 работ, 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.

8. Автореферат.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

9. Вопросы и замечания по диссертационной работе.

У ведущей организации возникли следующие вопросы и замечания:

1. Для прикладного использования авторской нелинейной модели бетона необходимо определить 15 параметров. В диссертации некоторые параметры вычисляются по эмпирическим зависимостям на основании данных о классе бетона по прочности на одноосное сжатие. На наш взгляд, при практическом применении эти параметры должны определяться на основании стандартизированных испытаний. Например, величина энергии разрушения в диссертации определяется по формуле (2.72), однако она может быть принята по результатам стандартизированных испытаний в соответствии с ГОСТ 29167—2021 «БЕТОНЫ. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», что является более обоснованным методом.

2. В инженерной методике расчета плит на продавливание автором учитывается влияние следующих факторов: масштабный эффект, влияние пролета среза, процента продольного армирования растянутой зоны плиты, влияние относительного размера и формы опоры. Однако среди перечисленных факторов не оценено влияние структуры бетона на продавливание через приведенный размер зерен крупного заполнителя, учитываемый, например, в Model Code 2020.

3. В диссертационной работе не выполнен дисперсионный анализ чувствительности предложенной инженерной методики расчета

продавливания относительно введенных функций, учитывающих масштабный эффект, влияние пролета среза, процента продольного армирования растянутой зоны плиты, влияние относительного размера и формы опоры. Показано уменьшение дисперсии значений прогнозируемой предельной продавливающей силы для всех тестовых данных, однако не установлен вклад каждого введенного фактора на величину этой дисперсии. Проведение такого анализа методами Соболя, Морриса или др. позволило бы ранжировать факторы по степени их влияния и при наличии малозначимых параметров или функций упростить инженерную методику без существенного ухудшения прогностической способности модели.

4. В выражениях представленной инженерной методики (5.10) – (5.13) на стр. 140 диссертации экспликация выполнена не для всех переменных величин, входящих в зависимости. Например, отсутствует расшифровка параметров $u_{СП\ 63,out}$ и $a_{0,out}$.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Бударина Александра Михайловича является самостоятельным, законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научная задача, имеющая важное теоретическое и практическое значение для строительной науки и индустрии.

Научные и практические результаты диссертационного исследования представлены в публикациях в журналах перечня ВАК Минобрнауки России, доложены на всероссийских и международных научных конференциях и форумах.

Полученные результаты характеризуются научной новизной и достоверностью. Выводы и положения, выносимые на защиту, обоснованы и логически вытекают из содержания работы.

Содержание диссертации соответствует пунктам 2 и 4 Паспорта научной специальности 2.1.9. «Строительная механика», в частности 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.

Диссертация соответствует критериям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пунктах 9-14 «Положения о присуждении научных степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г. в редакции от 16.10.2024 г.) к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бударин Александр Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. «Строительная механика».

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на заседании кафедры железобетонных, каменных и деревянных конструкций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» 3 марта 2026 года. Протокол №5 заседания кафедры от 03.03.2026 г. Присутствовало на заседании 11 человек. В голосовании приняло участие 10 человек, за – 10 человек, против – нет, воздержались – нет.

Председатель заседания:
заведующий кафедрой железобетонных,
каменных и деревянных конструкций
кандидат технических наук, доцент

Ламзин
Дмитрий Александрович


подпись

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 603000, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Ректорат: 8(831)280-84-01, E-mail: rector@nngasu.ru, <https://www.nngasu.ru>.


Подпись руки *Ламзин Д.А.* заверяю.
Отдел по работе с персоналом *заместитель начальника*

