

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Бударина Александра Михайловича

на тему «РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И
ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ПЛОСКИХ
ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРОДАВЛИВАНИЮ»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.1.9. Строительная механика

Актуальность избранной темы. В современном строительстве широкое распространение получили железобетонные каркасы с безбалочными плитами перекрытий. Их использование позволяет снизить трудоемкость работ и увеличить полезную высоту помещений. Однако особенностью таких конструкций является концентрация усилий на небольшой площади опоры, что может привести к хрупкому и внезапному разрушению плиты от продавливания. Опасность этого явления заключается в его скрытом характере: разрушение часто происходит без видимых внешних признаков, что подтверждает важность и актуальность изучения данного механизма.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что на несущую способность плиты при продавливании влияет ряд факторов: масштабный эффект, пролет среза, относительный размер опоры, процент продольного армирования и тип поперечной арматуры. Отсутствие корректного учета этих параметров негативно сказывается на точности существующих нормативных методик расчета (СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25). Анализ имеющихся в открытом доступе опубликованных данных по экспериментальным исследованиям в данной области показывает, что действующие методики могут существенно завышать несущую способность конструкций, что очевидно ставит под угрозу достоверность и надежность проектирования. Кроме того, значительная часть лабораторных экспериментов выполнена на образцах, которые не соответствуют параметрам актуальных проектных решений. Очевидно, что высокая стоимость и трудоемкость не позволяют

восполнить этот пробел только экспериментальным путем. В связи с этим все более актуальным становится вопрос о применении вычислительных моделей для исследования работы плит.

Дополнительно, уже неоднократно демонстрировалось, что существующие нелинейные модели бетона, реализованные в универсальных конечно-элементных комплексах, имеют ряд недостатков. Они зачастую демонстрируют отклонение формы предельной поверхности от опытных данных, не учитывают или не полностью учитывают сложные физические эффекты, возникающие при нелинейном деформировании бетона, а также не содержат эффективных механизмов регуляризации, что делает модели крайне чувствительными к параметрам дискретизации сетки.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки новой нелинейной модели бетона, лишенной указанных недостатков и пригодной для выполнения эффективного численного прогноза механического поведения плит с реальными геометрическими параметрами при продавливании. На основе результатов таких исследований становится возможным создание новой уточненной инженерной методики расчета.

Структура и объем работы. Представленная на отзыв диссертационная работа Бударина А.М. состоит из введения, 5-х глав, заключения, списка литературы и 2-х приложений. Полный объем работы составляет 170 страниц, в том числе 165 страниц основного текста, который проиллюстрирован 112 рисунками и 21 таблицей. Список литературы содержит 186 наименований.

Целью диссертационного исследования является разработка и валидация нелинейной модели пластического деформирования и разрушения бетона, учитывающей эффекты повреждаемости, дилатации, контракции, масштабный эффект, а также создание на основе численных и лабораторных данных инженерной методики расчета плоских железобетонных плит перекрытий на продавливание, отражающей влияние ключевых конструктивных параметров (рабочей высоты, пролета среза, относительного размера опоры и процента армирования) и обеспечивающей более высокую точность по сравнению с существующими нормативными подходами.

Во введении обоснована актуальность решаемой научно-технической задачи и выбор направления исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, приводятся объект и предмет исследования. Указан личный вклад автора, а также каким образом проводилась апробация работы, включая основные публикации, приведено соответствие диссертационной работы паспорту специальности 2.1.9. Строительная механика.

Первая глава состоит из пяти подразделов. Здесь приведен достаточно полный обзор теоретических и экспериментальных исследований механизма продавливания. Проанализировано влияние различных факторов (процент армирования, пролет среза, масштабный эффект) на несущую способность плит. Проведен критический анализ современных нормативных методик (СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25, Model Code 2020) путем сравнения с базой данных из 590 лабораторных испытаний. Рассмотрены существующие нелинейные модели бетона, выявлены их недостатки (некорректная форма предельных поверхностей, отсутствие учета дилатации/контракции, проблемы локализации деформаций) и сформулированы требования к разрабатываемой модели.

Во второй главе диссертации представлена новая модель бетона, основанная на комбинации теории пластического течения и механики разрушения. Описана модифицированная трехинвариантная предельная поверхность, комбинированная поверхность пластического потенциала и механизм двойного независимого упрочнения для учета дилатации и контракции. Для моделирования разупрочнения и циклического нагружения введены отдельные параметры поврежденности при сжатии и растяжении. Регуляризация проблемы локализации деформаций и учет масштабного эффекта выполнены с помощью энергетического подхода. Приведен алгоритм реализации модели в ПК «ANSYS».

В третьей главе выполнена верификация разработанной модели путем сопоставления результатов численного анализа с данными лабораторных испытаний. Валидация проведена на различных уровнях: бетонные образцы при двухосном и трехосном нагружении (опыты Kupfer, Imran), образцы при циклическом нагружении, бетонные балки с надрезом (для проверки регуляризации), а также железобетонные конструкции – балки без поперечной арматуры

и серия плит на продавливание. Результаты демонстрируют хорошую согласованность и устойчивость по отношению к параметрам дискретизации.

В четвертой главе диссертации Представлены результаты 107 численных экспериментов, разделенных условно на четыре серии для изолированного изучения влияния ключевых параметров:

- влияние рабочей высоты (масштабный эффект) для плит с различной интенсивностью поперечного армирования;
- влияние пролета среза;
- влияние относительного размера опоры;
- влияние процента продольного армирования.

Для каждого случая построены графики «нагрузка-перемещение», картины трещинообразования и количественные зависимости изменения несущей способности. Проведено сравнение результатов численного моделирования с расчетами по нормативным методикам.

В пятой главе с применением регрессионного анализа (метод наименьших квадратов), по результатам 590 лабораторных испытаний, разработана новая инженерная методика расчета. Предложены эмпирические зависимости, обобщающие результаты численных и лабораторных данных и учитывающие влияние масштабного эффекта, пролета среза, относительного размера опоры и процента армирования. Выполнена оценка точности разработанной методики путем сравнения с лабораторными и численными данными, а также с существующими нормативными документами. Показано, что предложенная методика обладает наилучшими статистическими показателями (коэффициент вариации, коэффициент детерминации).

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы. Приведены рекомендации по использованию разработанной модели и методик, а также намечены перспективы дальнейших исследований.

В приложениях приводятся вспомогательные математические формулы, а также данные о внедрении результатов диссертационного исследования.

В целом, автором получены результаты оригинального исследования по разработке численной модели продавливания плит с использованием новой экспериментально верифицированной нелинейной модели бетона.

Научная новизна исследований и наиболее важные результаты. Новизна работы заключается в том, что:

1. Разработана оригинальная нелинейная модель бетона, сочетающая теорию пластического течения (учет контракции/дилатации) и механику разрушения. В отличие от существующих аналогов, модель включает двойное независимое упрочнение предельной поверхности и отдельные параметры поврежденности при сжатии и растяжении. Для решения проблемы локализации деформаций впервые в рамках данной постановки задачи применен энергетический подход с использованием теории полосы трещин, что позволяет корректно учитывать масштабный эффект при численном моделировании.

2. Впервые получены новые данные о влиянии конструктивных параметров на несущую способность железобетонных плит при продавливании. Выполнена серия из 107 численных экспериментов для диапазонов параметров, слабо представленных в мировой базе лабораторных исследований (плиты с рабочей высотой более 480 мм, варьирование относительного размера опоры). Установлены количественные закономерности изменения относительной несущей способности (τ_n/R_{bt}) в зависимости от масштабного эффекта, пролета среза, процента армирования и размера опоры, включая оценку их взаимного влияния.

3. Предложена новая эмпирическая методика расчета плит на продавливание, построенная на основе регрессионного анализа (метод наименьших квадратов с алгоритмом Левенберга-Марквардта) по выборке из 590 лабораторных испытаний. Методика позволяет учесть в комплексе основные влияющие факторы (масштабный эффект, пролет среза, процент продольного армирования, относительный размер опоры и тип поперечной арматуры), что позволяет добиться наилучших статистических показателей по сравнению с нормативными документами СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25 и Model Code 2020.

Научная и практическая ценность работы. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии теоретических основ строительной механики железобетона в части моделирования нелинейного деформирования и разрушения. Автором разработана оригинальная физико-математическая модель бетона, которая, в отличие от существующих подходов, сочетает теорию пластического течения (с двойным независимым

упрочнением для описания дилатации и контракции) и механику разрушения (с отдельными параметрами поврежденности при сжатии и растяжении). Принципиально важным является применение энергетического подхода для регуляризации краевой задачи, что позволяет корректно учитывать масштабный эффект и преодолеть проблему зависимости результатов от размера конечно-элементной сетки. Кроме того, получены новые количественные данные о закономерностях влияния основных конструктивных параметров (рабочая высота, пролет среза, размер опоры, процент армирования) на несущую способность плит при продавливании для диапазонов значений, ранее не изученных экспериментально.

Практическая ценность исследования заключается в создании инженерного инструментария, пригодного для непосредственного использования в проектной деятельности:

1. Разработана и верифицирована инженерная методика расчета, которая позволяет с высокой точностью оценивать несущую способность плоских железобетонных плит перекрытий на продавливание. Методика учитывает ключевые факторы: масштабный эффект, пролет среза, процент продольного армирования, размер и форму опоры, а также тип поперечного армирования, что делает ее существенно более точной по сравнению с действующими нормами (СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25, Model Code 2020).

2. Создана и адаптирована для использования в ПК «ANSYS» нелинейная модель бетона, которая может быть использована для численного моделирования широкого спектра бетонных и железобетонных конструкций при статическом кратковременном нагружении. Разработанная модель позволяет проводить вычислительные эксперименты повышенной сложности, в том числе для конструкций с параметрами, выходящими за рамки существующей базы лабораторных испытаний.

3. Результаты исследования внедрены в инженерную практику, что подтверждено соответствующими актами:

- в деятельность АО «Институт Гидропроект» для обоснования прочности конструкций при реконструкции объектов;

- в разработку программного комплекса SCAD++ (ООО НПФ «СКАД СОФТ»);

- в учебный процесс УрФУ при подготовке инженеров-строителей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, результатов и выводов. Достоверность результатов подтверждается использованием фундаментальных положений строительной механики, строгой и конкретной постановкой задач, строгостью математических формулировок, применением известных, апробированных численных методов решения задач, верификацией разработанных моделей посредством сравнения с экспериментальными данными. Основные результаты работы автора прошли апробацию на ряде международных конференций и симпозиумов.

Публикации и апробация результатов работы. Автореферат. Основное содержание диссертации в полной мере отражено в 8 публикациях диссертанта, в том числе в рецензируемых научных журналах. 6 печатных работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Имеются 2 публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в научных базах данных SCOPUS и WEB OF SCIENCE. Основные результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на следующих международных и всероссийских 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); 10 th 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).

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Язык, стиль и оформление диссертации. Диссертация Бударина А.М. написана общепринятым в научной литературе языком, с использованием известной терминологии, оформлена в компьютерном наборе в соответствии с требованиями ВАК и действующими стандартами.

По содержанию диссертации и автореферата есть ряд замечаний:

1. Критика существующих моделей, применяемых в современных расчетных комплексах (видимо имеются ввиду ANSYS, COMSOL, ABAQUS, SAP2000 и другие), представляется не вполне корректной. На странице 5 автор утверждает, что современные модели бетона в тяжелых конечно-элементных комплексах имеют значительные отклонения от экспериментов и не решают проблему локализации деформаций. Полагаю, что значительное количество публикаций в отечественных и зарубежных научных журналах, вполне может поставить под сомнение данное утверждение. В частности, работы научной школы А.М. Белостоцкого, успешно реализуемые в том числе на базе НИЦ СтаДиО, показывают, что, к примеру, модель Менетри-Виллама (Menetrey-Willam) при надлежащей калибровке, показывает весьма высокую сходимость с экспериментальными данными. Кроме того, вопрос регуляризации и локализации деформаций успешно решается с помощью нелокальных моделей (например, работы Zreid и Kaliske), которые уже успешно внедрены в ПК «ANSYS» и широко применяются при решении сложных прикладных задач. Кроме того, автор не приводит сравнений с критикуемыми моделями, возможно их точность также позволила бы эффективно решить поставленные в диссертации задачи.

2. Обзор отечественных и зарубежных исследований (глава 1) оставляет ряд вопросов. Во-первых, упоминая работы Друкера и Прагера в новизне, автор не включил их в исторический обзор. Во-вторых, рассматривая эффекты дилатации и разносопротивляемости в бетоне, автор обошел вниманием труды таких авторитетных исследователей в данной области, как Л.А. Толоконников, А.А. Трещев, А.А. Маркин и Н.М. Матченко, а также других. В-третьих, в данном обзоре не проведен анализ методов расчета узлов сопряжения плит и колонн, используемых в современных российских программных комплексах, таких как SCAD++, ЛИРА САПР и Stark ES. Данные возможности реализованы в

указанных программных продуктах и применяются уже на протяжении значительного времени, их отсутствие в обзоре ограничивает широту проведенного анализа. Кроме того, при формировании списка источников автором не учтены актуальные научные работы, опубликованные в 2024-2025 годах, посвященные численным методам расчета железобетонных конструкций.

3. Сомнительная валидация на независимость результатов от густоты сетки присутствует в разделе 3.1.4. Автор делает вывод о несущественном различии результатов для балки с надрезом при разном размере конечно-элементной сетки (рисунок 3.6). Однако анализ представленных графиков вызывает сомнения в корректности данного вывода. На ниспадающей ветви наблюдается легко заметная глазом разница в значениях (визуально до 100%) для крупной сетки (7,5 мм) по сравнению с мелкой (1,5 мм). Для получения объективного вывода следовало бы привести количественные оценки сходимости (например, нормы невязок или значения энергии разрушения), а также рассмотреть более мелкие размеры сетки для подтверждения стабилизации решения. Подробный анализ сходимости очень важен для оценки результатов любого численного анализа.

4. В работе не приводится убедительного обоснования выбора конечных элементов для моделирования бетона (предположительно SOLID186) и арматуры (REINF264). Использование элемента REINF264, реализующего механизм распределенного («smeared») армирования может вносить дополнительную погрешность по сравнению с явным моделированием арматуры элементами BEAM или LINK. Его использование требует верификации. Также следовало бы обосновать применение квадратичных элементов (SOLID186) по сравнению с линейными (SOLID185) с точки зрения соотношения точности и вычислительных затрат, особенно при выполнении нелинейных расчетов по 107 образцам.

5. Автор не приводит в работе одно из своих главных достижений – разработанную программу в форме подпрограммы USERMAT (пользовательского материала), что обеспечивает реализацию предлагаемых методик в ПК «ANSYS». Нет листинга программы и/или информации о ее регистрации. Отсутствие этих данных затрудняет оценку возможности воспроизведения результатов другими исследователями.

6. При численном моделировании железобетонных конструкций (глава 3) автор использовал конечные элементы BEAM188, моделирующие «идеальное сцепление» между арматурой и бетоном (с. 97). Такой подход не учитывает такие важные явления, как проскальзывание арматуры, анкеровка и «нагельный эффект», что может вносить погрешность в оценку ширины раскрытия трещин и деформативности плит, особенно при высоком проценте армирования.

7. Несмотря на физическую обоснованность разработанной модели бетона, итоговая инженерная методика расчета на продавливание (глава 5) носит сугубо эмпирический характер. Коэффициенты $x_1 \dots x_9$ подобраны методом наименьших квадратов по базе экспериментальных данных. Это означает, что точность методики гарантирована только в тех диапазонах параметров, которые были представлены в выборке, и требует осторожности при экстраполяции на случаи, выходящие за пределы варьирования исходных данных.

8. В предложенной методике для учета масштабного эффекта используется классический «закон 3. Бажанта» (формула $(1+h_0/d_0)^{-1/2}$ на с. 140). Автор справедливо критикует подход Model Code 2020, но не приводит в работе сравнительного анализа, почему выбрана именно эта функция (например, с показателем степени $-1/2$), а не другие известные зависимости. Выбор переходного размера $d_0 = 0,1$ м также нуждается в более детальном обосновании для различных классов бетона.

Перечисленные замечания не затрагивают существа результатов и не изменяют общей положительной оценки диссертации.

Заключение. Диссертация Бударина Александра Михайловича на соискание учёной степени кандидата технических наук представляет собой научно-квалификационную работу, содержащую оригинальное исследование задачи по разработке и валидации нелинейной модели пластичного деформирования и разрушения бетона, учитывающей эффекты повреждаемости, дилатации, контракции, масштабный эффект, а также создания на основе численных и лабораторных данных инженерной методики расчета плоских железобетонных плит перекрытий на продавливание. Диссертация, судя по представленному материалу, выполнена автором самостоятельно и на высоком научно-техническом уровне.

Считаю, что представленная диссертационная работа на тему «Разработка модели пластичного деформирования и разрушения бетона с учетом повреждаемости и ее применение для оценки сопротивляемости плоских плит перекрытий продавливанию» отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Бударин Александр Михайлович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Официальный оппонент

доктор технических наук (2.1.9. Строительная механика), профессор кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», доцент


16.03.2026

Теличко
Виктор
Григорьевич

300012, г.Тула, пр. Ленина, д. 92, ФГБОУ ВО «ТулГУ», кафедра «Строительство, строительные материалы и конструкции»

Тел: +7 (4872) 25-71-08 (раб.),

+7 (952) 019-84-65 (сот.)

e-mail: katranv@yandex.ru

