

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Бударина Александра Михайловича на тему «Разработка модели пластичного деформирования и разрушения бетона с учётом повреждаемости и её применение для оценки сопротивляемости плоских плит перекрытий продавливанию», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9.

Строительная механика

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационное исследование А. М. Бударина посвящено решению актуальных задач: совершенствованию методики расчета железобетонных плит на продавливание, а также разработке модели нелинейного деформирования бетона.

В современном строительстве широкое распространение получили монолитные железобетонные каркасы с безбалочными бескапитальными плитами перекрытия. Особенностью данного конструктивного решения является концентрация значительных усилий на относительно небольшой площади опоры, что может вызвать разрушение плиты от продавливания. Опасность данного механизма разрушения заключается в его хрупком характере. Как справедливо отмечает автор, современные исследования, выполненные отечественными и зарубежными авторами, показывают, что методика расчета железобетонных плит на продавливание, представленная в действующем нормативном документе СП 63.13330.2018 не в полной мере учитывает ряд ключевых факторов, влияющих на несущую способность конструкции: масштабный эффект, пролет среза плиты, относительный размер и форма опоры, тип поперечного армирования. Более совершенная расчетная методика может быть получена на основании результатов лабораторных испытаний. Однако большая часть испытаний выполняется на плитах с относительно малой рабочей высотой сечения, что не позволяет оценить влияние масштабного эффекта. Плиты с рабочей высотой сечения 0,48 м и более составляют менее 4% от общего числа испытаний и обладают малым пролетом среза, что затрудняет оценку влияния масштабного эффекта.

Результаты испытания плит с большой рабочей высотой сечения могут быть получены с помощью метода конечных элементов с использованием нелинейных моделей материала. Однако проведенный в работе анализ показал, что существующие модели бетона, реализованные в «тяжелых» конечно-элементных комплексах, обладают рядом недостатков: значительные отклонения предельных поверхностей от экспериментальных данных, отсутствие корректного учета дилатации и контракции, а также механизмов регуляризации, приводящих к патологической зависимости результатов от размера сетки. Таким образом, разработка новой модели бетона, лишенной этих недостатков, выполнение численных исследований механизма разрушения железобетонных плит с большой рабочей высотой сечения от продавливания, а

также разработка усовершенствованной инженерной методики являются актуальными задачами.

Общая характеристика, структура и содержание работы

Диссертационная работа А. М. Бударина состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Работа изложена на 165 страницах, содержит 21 таблицу и 112 рисунков. Список использованной литературы включает 186 наименований. Содержание работы полностью соответствует заявленной научной специальности 2.1.9. Строительная механика.

Во введении выполнено обоснование актуальности темы исследования, проведен анализ степени разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Определены объект и предмет исследования, а также методологическая основа работы.

Первая глава представляет собой комплексный аналитический обзор. Автором детально проанализированы теоретические и экспериментальные исследования механизма разрушения плит от продавливания, выявлены основные факторы, влияющие на несущую способность плит. На обширной выборке из 590 лабораторных испытаний проведен критический анализ методик расчета, представленных в современных российских и зарубежных нормативных документах (СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25, Model Code 2020). Результаты этого анализа убедительно демонстрируют недостаточную точность и ограничения существующих подходов. Также в главе дан глубокий обзор существующих нелинейных моделей бетона (Г.А. Гениева, В.И. Корсуна, Concrete, Menetrey-Willam, CDPM2), выявлены их сильные и слабые стороны, что позволило автору сформулировать требования к разрабатываемой модели и поставить конкретные задачи исследования.

Во второй главе изложено теоретическое ядро диссертации. Автором разработана новая нелинейная модель бетона, базирующаяся на комбинации теории пластического течения и механики разрушения. Модель отражает влияние основных особенностей напряженно-деформированного состояния бетона, характерных для статического кратковременного нагружения. Для разделения областей упругой и пластической работы модели используется предельная поверхность Менетри-Виллама, модифицированная автором путем добавления шатра сжатия. Для учета эффектов контракции и дилатации в модели используется комбинированная поверхность пластического потенциала в совокупности с двойным независимым упрочнением предельной поверхности. Для моделирования разупрочнения в модели используется механизм накопления повреждений. Для регуляризации проблемы локализации деформаций и учета масштабного эффекта в модели использован энергетический подход.

Третья глава посвящена валидации разработанной модели. Модель была реализована в ПК «ANSYS» в качестве пользовательской. Верификация проведена путем сопоставления результатов численных расчетов с данными широкого круга лабораторных экспериментов: от базовых испытаний бетонных

образцов при двухосном и трехосном нагружении (опыты Н. Kupfer, I. Imran) до сложных испытаний железобетонных балок и плит на продавливание (включая плиты большой толщины из работы S. Guandalini). Полученное хорошее совпадение результатов (погрешность по предельным нагрузкам не превысила 9,4%) подтверждает корректность модели и ее пригодность для дальнейших исследований механизма разрушения железобетонных плит при продавливании.

В **четвертой главе** представлены результаты обширных численных исследований (107 расчетов), выполненных с использованием разработанной модели. Исследования были разделены на четыре серии, в каждой из которых изучалось влияние одного из ключевых параметров: рабочей высоты плиты (масштабный эффект), пролета среза, относительного размера опоры и процента продольного армирования плиты. Полученные данные позволили количественно оценить степень влияния этих факторов на несущую способность и деформативность плит, в том числе для диапазона параметров (плиты большой толщины), слабо представленного в лабораторных испытаниях.

В **пятой главе** на основе регрессионного анализа результатов 590 лабораторных испытаний разработана новая инженерная методика расчета плит на продавливание. Предложенная методика сохраняет логику действующего СП 63.13330.2018, но дополнена эмпирическими функциями, учитывающими все выявленные ранее факторы. Сравнение с данными лабораторных и численных экспериментов (включая 107 собственных расчетов автора) показало, что разработанная методика обладает наилучшей сходимостью (наименьший коэффициент вариации и наибольший коэффициент детерминации) среди всех рассмотренных нормативных документов в сравнении с результатами лабораторных испытаний.

В **заключении** подведены итоги работы, сформулированы основные выводы, соответствующие поставленным задачам, и намечены перспективы дальнейших исследований.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, обладают высокой степенью обоснованности. Это достигается за счет корректного использования фундаментальных положений механики деформируемого твердого тела (теории пластического течения, механики разрушения) и строгого математического аппарата.

Теоретические построения базируются на апробированных концепциях, представленных в трудах классиков и современных ученых (D.C. Drucker, W. Prager, Ю.Н. Работнов, P. Grassl и др.). Все вводимые допущения и гипотезы четко сформулированы и логически обоснованы.

Одной из сильных сторон работы и ее выводов является выполненная автором всесторонняя валидация. Автор использует классические и широко признанные в мировом научном сообществе экспериментальные данные для валидации модели бетона. Хорошее совпадение результатов (в пределах

инженерной погрешности) на всех этапах валидации служит доказательством адекватности модели и достоверности полученных на ее основе выводов.

Обоснованность предложенной инженерной методики расчета на продавливание подтверждается ее построением на представительной выборке экспериментальных данных (590 образцов) с использованием строгих статистических методов (регрессионный анализ методом наименьших квадратов с алгоритмом Левенберга-Марквардта) и последующей проверкой на независимой выборке численных экспериментов, выполненных автором.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна работы носит комплексный характер и зафиксирована в положениях, выносимых на защиту:

1. Разработана новая модель нелинейного деформирования бетона, использующая в основе комбинацию теории пластического течения и механики разрушения. Модель отражает основные особенности напряженно-деформированного состояния бетона и позволяет с хорошей точностью моделировать работу бетонных и железобетонных конструкций при разных видах напряженно-деформированного состояния в рамках статического кратковременного нагружения. Для использования модели необходимо 15 параметров, которые могут быть найдены с помощью эмпирических зависимостей, представленных в работе.

2. Выполнены численные исследования влияния масштабного эффекта, пролета среза, относительного размера опоры и процента продольного армирования плиты на несущую способность при продавливании для плит с параметрами, характерными для реальных строительных объектов (всего 107 образцов), но не представленных в базе лабораторных данных. Получены новые количественные зависимости, уточняющие вклад каждого фактора.

3. Разработана новая инженерная методика расчета плит на продавливание. Методика построена на основе регрессионного анализа, выполненного с использованием обширной базы экспериментальных данных, отражает влияние основных конструктивных параметров и показывает более высокую точность по сравнению с методиками, представленными в действующих нормативных документах СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25, Model Code 2020.

Достоверность результатов достигнута за счет использования апробированных математических и статистических методов анализа результатов, согласованности результатов численных исследований и экспериментальных данных, а также использования программного обеспечения, верифицированного в системе РААСН для проведения численных исследований.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В главе 4 диссертационной работы автор выполняет численные исследования прочности плит на продавливание в зависимости от следующих параметров: рабочей высоты сечения плиты, относительного пролета среза, относительного значения периметра продавливания, процента продольного армирования плиты, количества поперечного армирования и его формы расположения в плане. Представляется целесообразным выполнить подобное исследование включая изменение прочности бетона плиты.
2. В главе 5 диссертации, в рамках разработки инженерной методики расчета прочности железобетонных плит на продавливание автором используется один из методов математической статистики для отыскания функции прочности – множественная регрессия, при этом ключевые факторы, входящие в уравнение регрессии и влияющие на прочность при продавливании, принимаются по результатам ранее проведенного обзора действующих нормативных требований и исследований других авторов. Учитывая большое многообразие существующих расчетных моделей прочности железобетонных плит на продавливание, представляется желательным перед выбором уравнения регрессии провести статистический анализ коэффициентов парной корреляции (коэффициент Пирсона) для рассматриваемых входящих параметров, а также определить уровень значимости (альфа-уровень) каждого из них на итоговое значение прочности с целью оценки их влияния.
3. В разработанной автором инженерной методике расчета прочности железобетонных плит на продавливание предлагается учитывать в том числе, предел текучести продольной арматуры. В диссертации не приведены возможные причины влияния данного фактора, учитывая, что при продавливании усилия в плите не достигают ее прочности при изгибе и напряжения в продольной арматуре, как правило, не достигают предела текучести продольной арматуры.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Бударина Александра Михайловича является самостоятельно выполненной на высоком уровне научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. Работа содержит научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся новизной. Диссертация на тему «Разработка модели пластичного деформирования и разрушения бетона с учётом повреждаемости и её применение для оценки сопротивляемости плоских плит перекрытий продавливанию» соответствует критериям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. 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.

Даю согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационное дело соискателя, а также на размещение отзыва в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» на сайте Казанского государственного энергетического университета.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,
(специальность 05.23.01 –
Строительные конструкции, здания
и сооружения), 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»)



Болгов Андрей Николаевич

«16» марта 2026 г.

Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5
Тел.: +7-499-174-75-70
E-mail: 200651@mail.ru



Согласие Болгова А.Н. удостоверено
Начальник Отдела кадров Севостьянова Ю.Б.