

*В диссертационный совет ПДС 2022.009
при ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов имени Патриса
Лумумбы» по адресу: 115419, г. Москва,
ул. Орджоникидзе, д. 3*

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Марковича Алексея Семеновича

**«Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на
основе метода конечных элементов»,**

представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.1.9. Строительная механика

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена исследованию различных нелинейных моделей бетона, включающие как модели хрупкого разрушения, так и упругопластические модели, а также принципы учета трещинообразования. Учитывая, что в настоящее время в отечественных нормах отсутствуют положения по прочности бетонов в случае двух- и трехосного сжатия, разработка методики и алгоритма нелинейного расчета железобетонных конструкций, находящихся в условиях объемного напряженного состояния, является актуальной.

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении дана оценка актуальности работы, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе автором рассмотрены вопросы тензорного представления напряженного состояния в точке твердого тела. Выработана единая форма записи уравнений для главных и октаэдрических напряжений, инвариантов напряженного состояния; сформулирована геометрическая интерпретация напряженного

состояния в точке, тесно связанная с определением главных напряжений в тригонометрической форме. Приведена общая концепция представления критериев разрушения в трехмерном пространстве.

Во второй главе рассмотрены основные предпосылки для построения расчетных моделей бетонных и железобетонных конструкций с использованием четырех- и восьмиузловых конечных элементов сплошной среды.

Приведены основные положения и результаты выполненных автором экспериментальных исследований трубобетонных образцов на трехосное сжатие. В ходе испытаний отмечено, что в условиях неравномерного трехосного сжатия бетону присущ явно выраженный пластический характер деформирования. В результате проведенных исследований получены координаты точек предельной поверхности и нормируемые значения прочности бетона, выраженные через напряжения на октаэдрических площадках.

Для верификации моделей деформирования бетона и сравнения механизма разрушения изгибаемых элементов были испытаны образцы бетонных и железобетонных балок. Дополнительно, посредством тензометрии, был проведен анализ напряженно-деформированного состояния отдельных образцов. Автором получены усредненные значения разрушающей нагрузки, нагрузки трещинообразования, а также прогибы, соответствующие определенным значениям нагрузки; представлены поля главных деформаций, а также эпюры напряжений в продольной арматуре.

В третьей главе автор рассматривает наиболее достоверные феноменологические критерии прочности бетона и критерии текучести для арматурной стали, приведенные автором в виде, удобном для создания реализующих их расчетных моделей на основе метода конечных элементов. Так, на основании экспериментальных данных сформулирован модифицированный критерий Друкера-Прагера, дополненный параметрами критерия Мора-Кулона для бетонов. Представлены трехпараметрические критерии разрушения бетона Бреслера-Пистера, Виллама-Варнке, Чена-Чена, Отозенна, Реймана, Се-Тин-Чена; приведен пятипараметрический критерий Виллама-Варнке для бетона, который

является вариантом усовершенствования критерия разрушения для хрупких материалов путем добавления двух дополнительных параметров для описания искривленных меридианов растяжения и сжатия предельной поверхности.

Автором предложен и экспериментально подтвержден шестипараметрический критерий разрушения бетона для случая двух- и трехосного сжатия, который обобщает наиболее удачные формулировки известных критериев прочности. Отмечено, что разработанный критерий является универсальным и позволяет получать достоверные показатели прочности различных видов бетонов как при трехосном нагружении в режимах низкой и высокой боковой компрессии, так и в случае двухосного равномерного и неравномерного сжатия.

В четвертой главе предложены теоретические положения, касающиеся получения физических уравнений пластического течения бетона. Сформулирован общий подход к построению идеально упругопластической модели и упругопластической модели бетона с деформационным упрочнением.

Построена модифицированная модель течения Мизеса-Губера для идеально упругопластического материала, применяемая для арматурной стали и бетона при высоких гидростатических напряжениях. Предложена модель течения Друкера-Прагера, дополненная параметрами критерия Мора-Кулона для бетона. Построена пятипараметрическая модель идеально упругопластического бетона на основе критерия разрушения Виллама-Варнке для хрупких материалов.

Автором предложена модифицированная модель Друкера-Прагера с учетом изотропного упрочнения и разупрочнения, позволяющая учитывать дилатацию бетона, и модифицированная пятипараметрическая модель Виллама-Варнке с изотропным упрочнением. Также для стержневой стальной арматуры и жесткого армирования сформулирована модель течения Мизеса-Губера с учетом смешанного типа упрочнения.

В пятой главе рассмотрены сопряженные с явлением ползучести вопросы теории железобетона – выводы уравнений механического состояния для идеального и стареющего бетона в приращениях путем наложения приращений мгновенных и запаздывающих деформаций.

Построены уравнения релаксации и ползучести бетона в приращениях для случая одномерного и объемного напряженного состояния элемента. Сформулированы предпосылки для разработки трехмерных моделей ползучести бетона на основе механических моделей вязкоупругих и вязкопластических тел, в том числе комбинированных, включающих в себя упругий, вязкий и жесткопластический элементы.

В шестой главе на основании сформулированных в работе критериев разрушения и пластичности бетона приведена методика и алгоритм нелинейного расчета железобетонных конструкций, находящихся в условиях объемного напряженного состояния, с учетом как хрупкого разрушения, так и упругопластического деформирования сжатого бетона.

Представлен метод ускорения сходимости, применяемый при решении системы нелинейных уравнений. Рассмотрена процедура определения приведенного модуля упругости для различных моделей деформирования бетона при разгрузке из сжатой зоны с переходом в растянутую и наоборот; также изложена методика учета трещинообразования в бетоне, рассмотрены принципы построения физической матрицы для элемента с трещинами в одном, двух и трех взаимно ортогональных направлениях.

Автором выполнены верификационные расчеты бетонных и железобетонных конструкций с учетом трехосного напряженного состояния бетона. Результаты расчетов сопоставлялись с данными экспериментов и показали приемлемую точность, достоверность и сходимость.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации. Автореферат соответствует основным положениям диссертации, дает целостное и полное представление о содержании и результатах работы.

Достоверность и новизна результатов диссертации обеспечивается использованием общепринятых принципов и положений классической теории железобетона, строительной механики, механики деформируемого твердого тела.

Верификация разработанного конечного элемента сплошной среды, реализующего предлагаемые модели деформирования бетона, проводилась на основе опытных данных, полученных автором в лаборатории строительных конструкций и материалов инженерной академии РУДН с применением современного аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений, а также путем сравнения результатов, полученных с применением альтернативных программ, реализующих расчеты данного класса конструкций.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- на основании критериев Друкера-Прагера и Мора-Кулона сформулирован общий критерий прочности применительно к бетону и при добавлении двух дополнительных параметров для описания криволинейных меридианов растяжения и сжатия предельной поверхности модифицирован критерий разрушения Виллама-Варнке для хрупких материалов, отвечающий испытаниям бетона на трехосное сжатие;
- разработан и экспериментально подтвержден шестипараметрический критерий разрушения бетона для случая двух- и трехосного сжатия;
- получены физические уравнения для идеально упругопластической модели деформирования бетона на основании ассоциированного и неассоциированного закона течения и на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама-Варнке для хрупких материалов;
- предложена новая формулировка идеально упругопластической модели Мизеса-Губера для арматурной стали и бетона при высоких гидростатических напряжениях, а также идеально упругопластической модели Друкера-Прагера, дополненной постоянными Мора-Кулона для бетонов и условием растрескивания бетона при растяжении;
- получены физические уравнения для упругопластической модели бетона с учетом деформационного упрочнения на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама-Варнке для хрупких материалов;

- предложена модифицированная упругопластическая модель Друкера-Прагера (с параметрами критерия Мора-Кулона для бетонов) с учетом изотропного упрочнения и разупрочнения, позволяющая учитывать дилатацию бетона, наблюдаемую в ряде экспериментов;
- сформулирована модифицированная модель течения Мизеса-Губера для стальной стержневой арматуры и жесткого армирования с учетом смешанного упрочнения, позволяющая в полной мере учитывать эффект Баушингера;
- получены уравнения механического состояния для идеального и стареющего бетона в приращениях путем наложения приращений мгновенных и запаздывающих деформаций;
- получены уравнения релаксации и ползучести бетона в приращениях для случая одномерного и объемного напряженного состояния элемента, а также сопряженные с ними физические матрицы, учитывающие влияние мгновенных и запаздывающих деформаций.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Сформулированные в диссертации научные положения обоснованы корректной постановкой задачи с использованием общепринятых гипотез и допущений, применением классических положений теории железобетона, методов строительной механики, механики деформируемого твердого тела и положений, установленных на основе обширного анализа существующих феноменологических критериев прочности и пластичности железобетона.

Ценность для науки и практики результатов работы. Научная значимость обусловлена тем, что полученные результаты диссертационного исследования вносят существенный вклад в развитие нелинейных методов расчета железобетонных конструкций. Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные модели хрупкого разрушения и упругопластического деформирования бетона сформулированы в удобном для практической реализации

на основе метода конечных элементов виде, алгоритмизированы и интегрированы в нелинейный решатель программы ПРИНС. Указанные расчетные модели прошли экспериментальную проверку и позволяют получить достоверное значение прочности бетонных и железобетонных конструкций, находящихся в условиях двух- и трехосного напряженного состояния при низких и средних значениях гидростатического напряжения.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати. По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ. Из них: 1 монография, 10 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ / РУДН и 9 статей в журналах, представленных в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.1.9. Строительная механика: 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», п. 6. «Теория и методы расчета зданий, сооружений и их элементов на надежность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость)», п. 9. «Теория и методы оценки ресурса несущей способности зданий, сооружений и их элементов», п. 11. «Экспериментальные методы исследования зданий, сооружений и их элементов».

Замечания по работе

1. В диссертации приведена теория, на основе которой построены и рассмотрены расчетные модели железобетона для случая статического

нагрузки. При дальнейшем развитии указанных моделей автору следовало бы разработать процедуру решения задач в динамической постановке, в том числе с применением методов прямого интегрирования уравнений движения.

2. Для повышения достоверности разработанных расчетных моделей железобетона автору следовало бы прибегнуть к натурным испытаниям железобетонных конструкций.

3. В диссертации недостаточно полно обосновано насколько идеальная упругопластическая модель деформирования бетона отвечает реальному поведению материала.

4. В методике учета трещинообразования, приведенной в разделе 6.1.5 диссертации, ничего не сказано об определении ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций.

5. В работе не освещен вопрос расчета железобетонных элементов с предварительным напряжением согласно приведенным моделям деформирования бетона

6. В работе не изложен алгоритм учета разгрузки бетона в узле железобетонного элемента в растянутой зоне бетона.

Указанные замечания не снижают научную значимость диссертационной работы, не влияют на общую положительную оценку.

Заключение

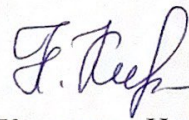
Диссертационное исследование Марковича Алексея Семеновича «Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы в области нелинейных методов расчета железобетонных конструкций, имеющей важное научно-техническое значение для строительной отрасли России.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном

автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Маркович Алексей Семенович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Официальный оппонент:

Профессор Кафедры математики
Факультета информационных технологий
и анализа больших данных федерального
государственного образовательного
бюджетного учреждения высшего образования
"Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации",
доктор физико-математических наук
(специальность – 01.02.04), доцент



Кирсанова Наталья Анатольевна

125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2
Тел.: +7 (499) 503-47-02, e-mail: NAGureeva@fa.ru

