



"УТВЕРЖДАЮ"

Первый проректор-  
проректор по научной работе РУДН  
доктор медицинских наук, профессор, член-корр. РАН

А.А. Костин

12.09.24

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) на основании решения, принятого на заседании кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии

Диссертация «Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов» выполнена на кафедре технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии РУДН.

Маркович Алексей Семенович 14.10.1987 года рождения, гражданин России, в 2009 году окончил с отличием государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» по специальности «Промышленное и гражданское строительство».

В 2013 году в диссертационном совете федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Определение расчетной нагрузки сыпучего материала, действующей на стены цилиндрических силосов, в результате экспериментальных и теоретических исследований» по специальности 05.23.17-строительная механика.

В 2023 году присвоено ученое звание доцента по специальности «Строительная механика».

В период подготовки диссертации являлся доцентом кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», где и работает по настоящее время.

Научный консультант – Агапов Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы».

Название темы диссертационного исследования в окончательной редакции было утверждено на заседании Ученого совета инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», 23.05.2023, протокол №2022-08/23-05/1.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы.** Современные строительные нормы и правила, принятые в нашей стране и за рубежом, предписывают проводить расчеты железобетонных конструкций в нелинейной постановке с учетом реальных свойств бетона и арматуры. При этом характерно, что методика расчета железобетонных конструкций, находящихся в объемном напряженном состоянии, за исключением руководства по расчету трубобетонных конструкций, отечественными нормами не регламентируется. Вместе с тем, предпосылки для успешного выполнения таких расчетов были созданы развитием компьютерных технологий, с одной стороны, и разработкой численных методов строительной механики, в первую очередь метода конечных элементов, с другой. Нелинейные методы расчета конструкций реализованы в ряде компьютерных программ, таких как NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, ADINA, DIANA и другие. Общим для всех этих программ является использование алгоритмов, базирующихся на выполнении шаговых процедур. Однако, следует отметить, что расчеты физически нелинейных конструкций в вышеупомянутых программах выполняются с использованием физических соотношений, базирующихся на определенных экспериментальных данных. Для повышения достоверности результатов такие расчеты следует проводить с использованием нескольких программ. Поэтому инженеры должны иметь в своем арсенале несколько доступных расчетных инструментов. В связи с этим разработка альтернативных вычислительных методов и соответствующих программ, особенно отечественных, является актуальной задачей. Отчасти, для решения данной задачи в настоящей работе на основании экспериментальных данных, в том числе полученных автором, разработаны различные модели деформирования бетона, включающие в себя как модель хрупкого разрушения сжатого бетона, так и упругопластические модели деформирования, а также принципы учета трещинообразования в растянутом бетоне. Приведена методика и алгоритм нелинейного расчета железобетонных конструкций, находящихся в условиях объемного напряженного состояния, в результате чего построен конечный элемент сплошной среды (тип solid). Данный конечный элемент реализован в ВК ПРИНС, разработка которого ведется профессором Агаповым В.П. совместно с его учеником – автором настоящей работы. Данный вычислительный комплекс предназначен для решения широкого класса инженерных задач и позволяет выполнять статические и динамические расчеты конструкций методом конечных элементов на прочность и устойчивость.

**Личное участие соискателя в получении результатов,** изложенных в диссертации, состоит в:

- проведении серии испытаний бетонных образцов в условиях трехосного сжатия, в результате которого с применением современных сертифицированных средств тензометрии были зарегистрированы деформации образцов и получены координаты точек предельной поверхности, выраженные через напряжения на октаэдрических площадках;

- проведении серии испытаний образцов бетонных и железобетонных балок в условиях трехточечного изгиба, в результате которых посредством тензометрии были определены значения разрушающей нагрузки, нагрузки трещинообразования, прогибы, напряжения в продольной арматуре;

- разработке модифицированного критерия прочности Друкера – Прагера, дополненного параметрами критерия Мора – Кулона для бетонов, а также усовершенствовании критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов путем добавления двух дополнительных параметров для описания искривленных меридианов растяжения и сжатия предельной поверхности;

- разработке критерия разрушения бетона для случая двух- и трехосного сжатия, предельная поверхность которого в пространстве главных напряжений может рассматриваться в качестве поверхности разрушения в случае модели хрупкого раздробления бетона сжатой зоны, а также интерпретироваться как предельная поверхность текучести в случае модели бетона как упругопластического материала;

- формулировании общего подхода к построению идеальной упругопластической модели деформирования бетона на основании ассоциированного и неассоциированного закона течения;

- разработке упругопластической модели течения Мизеса – Губера для арматурной стали и бетона при высоких гидростатических напряжениях, а также идеально упругопластической модели течения Друкера – Прагера, дополненной постоянными Мора – Кулона для бетонов и условием растрескивания бетона при растяжении;

- построении на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов модели идеально упругопластического бетона;

- формулировании общего подхода к построению упругопластической модели деформирования бетона с учетом упрочнения;

- разработке модифицированной упругопластической модели Друкера – Прагера (с параметрами критерия Мора – Кулона для бетонов) с учетом изотропного упрочнения и разупрочнения, позволяющей учитывать дилатацию бетона;

- разработке на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке модифицированной модели упругопластического деформирования бетона с упрочнением;

- модифицировании модели течения Мизеса – Губера применительно к стержневой стальной арматуры и жесткого армирования путем учета смешанного упрочнения;

- исследовании сопряженных с явлением ползучести вопросов теории железобетона – выводов уравнений механического состояния для идеального и стареющего бетона в приращениях;

- получении уравнений релаксации и ползучести бетона в приращениях для случая одномерного и объемного напряженного состояния;

- формулировании предпосылок для разработки на основе метода конечных элементов трехмерных моделей ползучести бетона как механических моделей вязкоупругих и вязкопластических тел, в том числе комбинированных;

- разработке для решателя ВК ПРИНС алгоритма и методики нелинейного расчета железобетонных конструкций, находящихся в условиях объемного напряженного состояния, с учетом как хрупкого разрушения, так и упругопластического деформирования сжатого бетона;

- выполнении с целью отладки разработанных алгоритмов для нелинейного решателя ВК ПРИНС верификационных расчетов бетонных и железобетонных конструкций с учетом трехосного напряженного состояния бетона и сравнении с экспериментальными данными и результатами, полученными с применением альтернативных программ, реализующих расчеты данного класса конструкций.

**Степень достоверности результатов** проведенных исследований обеспечивается 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. Верификация разработанного конечного элемента сплошной среды, реализующего предлагаемые модели деформирования бетона, проводилась на основе экспериментальных 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.

**Новизна результатов** проведенных исследований заключается в следующем:

- на основании критерием Друкера – Прагера и Мора – Кулона сформулирован общий критерий прочности применительно к бетону. В результате добавления 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;
- 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;
- на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов построена достоверная и эффективная модель идеально упругопластического бетона;
- получены физические уравнения для упругопластической модели деформирования бетона с учетом упрочнения;
- 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;
- разработана на основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов эффективная модель упругопластического деформирования бетона с учетом изотропного упрочнения;
- 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.

**Практическая значимость** проведенных исследований заключается в том, что разработанные модели хрупкого разрушения и упругопластического деформирования бетона сформулированы в удобном для практической реализации методом конечных элементов виде, алгоритмизированы и интегрированы в нелинейный решатель ВК ПРИНС, на основе которых построен объемный конечный элемент. Кроме того, 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. С некоторых

позиций данную работу следует рассматривать как руководство для разработки упругопластических моделей «трехмерного» бетона применительно к компьютерным программам, реализующим метод конечных элементов. Таким образом, на основании приведенных в работе теоретических положений и алгоритмов, касающихся построения указанных моделей «трехмерного» бетона, последние, в свою очередь, могут быть реализованы всеми заинтересованными лицами в компьютерных программах, предназначенных для инженерных расчетов методом конечных элементов.

**Ценность научных работ соискателя** заключается в разработке достоверных, экспериментально подтвержденных моделей разрушения и упругопластического деформирования бетона на основе метода конечных элементов и их реализации в ВК ПРИНС.

**Соответствие пунктам паспорта научной специальности.** Диссертация Марковича Алексея Семенович на тему «Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов» по своему содержанию, предмету и методам исследования соответствует специальности 2.1.9. Строительная механика и следующим пунктам Паспорта специальности: 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».

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.** По материалам диссертации опубликовано 20 научные работы. Из них: 1 монография, 10 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ / РУДН и 9 статей в журналах, представленных в международных базах цитирования.

#### **Публикации в журналах, индексируемых в МБЦ**

1. **Markovich, A.S.** Analysis Of The Theory Of Calculation Of Fiber-Reinforced Concrete With Non-Steel Fibers / **A.S. Markovich**, D.D. Koroteev, M.I. Abu Mahadi, D.A. Miloserdova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. - 675(1). - 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/675/1/012013

2. Abu Mahadi, M.I. The Problem of Numerical Analysis of Rigidity in Binded Reinforced Concrete Elements / M.I. Abu Mahadi, **A.S. Markovich**, K.S. Akifyeva, D.A. Miloserdova. // Journal of Mechanics of Continua and

Mathematical Sciences. – March 2019. - Special Issue-1. – P. 400-409.  
<https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.03.00039>

3. **Markovich, A.S.** Influence of Reinforcement of Contour High-Strength Reinforcement without Adhesion to Concrete on the Deflections of Monolithic Beams / **A.S. Markovich**, V.S. Kuznetsov, Yu. A. Shaposhnikova, M.I. Abu Mahadi // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. – March 2019. - Special Issue-1. – P. 390-399.  
<https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.03.00038>

4. **Markovich, A.S.** Deformations and Stresses in the Structural Reinforcement when using Wending Rods / **A.S. Markovich**, V.S. Kuznetsov, M.I. Abu Mahadi, Yu.A. Shaposhnikova // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. – November 2019. - №4. - P. 78-89.  
<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00009>

5. **Markovich, A.S.** The stress-strain state of the external wall panel with opening of residential building in case bias / **A.S. Markovich**, M.I. Abu Mahadi, D.A. Miloserdova, M.S.A. Asad // AIP Conf. Proc. - 2022. - 2559 (1). - 050013.  
<https://doi.org/10.1063/5.0099222>

6. Chiadighikaobi, P.C. Physicomechanical Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Cementitious Concrete – A Review / P.C. Chiadighikaobi, A.A. Abd Noor, J.P. Vladimir, **A.S. Markovich**, L.A. Saad, D. E. Ewa, S.K. Aderomose // Open Civil Engineering Journal. - 2023. - Vol.17. - P. 1-11. DOI: 10.2174/18748368-v17-230912-2023-6

7. **Markovich, A.S.** Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement / **A.S. Markovich**, D.A. Miloserdova // AIP Conf. Proc. - 2023. - 2936 (1). - 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0180333>

8. Agapov, V. Nonlinear analysis of solid reinforced concrete structures with cracks / V. Agapov, **A. Markovich** // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19. – No. 4. – P. 14–26.  
<https://doi.org/10.22337/2587-9618-2023-19-4-14-26>

9. Agapov, V.P. Failure criterion for concrete under volumetric stress state conditions / V.P. Agapov, **A.S. Markovich** // Construction Materials and Products. - 2023. - 6(6). - 7. – P. 1-12. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-7

#### **Публикации в изданиях, включенных в Перечень РУДН/ВАК**

10. **Маркович, А.С.** Проблема численного анализа жесткости изгибаемых железобетонных элементов / **А.С. Маркович**, М.И. Абу Махади, Д.А. Милосердова, К.С. Акифьева, М.А. Асад // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2018. - Т. 14. - №3. - С. 233-241.  
doi: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-233-241

11. Agapov, V.P. Dynamic method for determining critical loads in the PRINS computer program / V.P. Agapov, **A.S. Markovich** // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. - 2020. - Vol. 16. - N. 5. - P. 380-389. doi: 10.22363/1815-5235-2020-16-5-380-389

12. Agapov, V.P. Investigation of the accuracy and convergence of the results of thin shells analysis using the PRINS program / V.P. Agapov, **A.S. Markovich** // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. - 2021. - Vol. 17. - N. 6. - P. 617-627. doi: 10.22363/1815-5235-2021-17-6-617-627

13. **Маркович, А.С.** Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов / **А.С. Маркович**, Д.А. Милосердова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2022. - Т. 18. - №2. - С. 182-192. doi: 10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192

14. Агапов, В.П. Модели нелинейного деформирования бетона при трехосном напряженном состоянии и их реализация в вычислительном комплексе ПРИНС / В.П. Агапов, **А.С. Маркович**, К.Р. Айдемиров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2023. - Т. 19. - №2. - С. 162-177. doi: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-162-177

15. Агапов, В.П. Расчет массивных железобетонных конструкций с учетом трещинообразования / В.П. Агапов, **А.С. Маркович** // Промышленное и гражданское строительство. - 2023. - № 7. - С. 43-49. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.07.43-49

16. Агапов, В.П. Конечный элемент для расчета массивных железобетонных конструкций с учетом трещинообразования / В.П. Агапов, **А.С. Маркович** // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2023. - Т. 19. - №6. - С. 593-607. doi: 10.22363/1815-5235-2023-19-6-593-607

17. Агапов, В.П. Критерий прочности бетона для двух- и трехосного напряженного состояния / В.П. Агапов, **А.С. Маркович** // Транспортные сооружения. - 2023. - Т 10. -№ 4. - С. 1-25. <https://doi.org/10.15862/09SATS423>

18. Агапов, В.П. Шестипараметрический критерий прочности для бетона / В.П. Агапов, **А.С. Маркович** // Строительная механика и расчет сооружений. - 2023. - №6. - С. 20-32. DOI 10.37538/0039-2383.2023.6.20.32

19. Ларионов, Е.А. Релаксация напряжений в железобетонных элементах конструкций / Е.А. Ларионов, **А.С. Маркович**, Е.А. Гринько // Строительная механика и расчет сооружений. - 2024. - №1. - С. 32-38. DOI 10.37538/0039-2383.2024.1.32.38

### **Монографии:**

20. Агапов, В.П. Нелинейные модели бетонных и железобетонных конструкций. Теория и реализация в ВК ПРИНС : монография / В.П. Агапов, **А.С. Маркович**. - Москва : РУДН, 2023. - 264 с.



### **Участие в международных конференциях**

1. 05-07 июля 2017 года, International Conference on Scientists 2017 (ICS 2017), Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация (докладчик).
2. 03-05 мая 2018 года, 2nd International Congress of Scientists 2018 (ICS 2018), Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация (докладчик).
3. 04-05 апреля 2019 года, Инженерные системы – 2019, Научно-практическая конференция с международным участием, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация (докладчик).
4. 25 марта 2020 года, IX Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН), Москва, Российская Федерация (докладчик).
5. 25-28 мая 2021 года, Современные строительные материалы и технологии, IV Международная научно-практическая конференция, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Российская Федерация (докладчик).
6. 20-22 октября 2021 года, Международная конференция по инженерным исследованиям 2021 (ICER 2021), научно-практическая конференция с международным участием, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация (докладчик).
7. 06-08 апреля 2022 года, Международная конференция по инженерным системам 2022 (ICES 2022), научно-практическая конференция с международным участием, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация (докладчик).
8. 13 апреля 2023 года, Международная научно-техническая конференция «Строительная наука и образование в интегрированном пространстве с новыми регионами Российской Федерации», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация (докладчик).
9. 18-22 сентября 2023 года, Международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация (докладчик).
10. 21-22 сентября 2023 года, XI Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация (докладчик).

Текст диссертации был проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертационная работа Марковича Алексея Семеновича рекомендуется к публичной защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Заключение принято на заседании кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы».

Присутствовало на заседании 37 чел.

Результаты голосования: «за» – 37 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

21.02.2024, протокол №2022-10-04/05.

Председательствующий на заседании:  
профессор кафедры технологий строительства  
и конструкционных материалов  
инженерной академии РУДН  
доктор технических наук, профессор



Зверев Е.М.

Подпись Зверева Е.М. удостоверяю.  
Ученый секретарь Ученого совета  
инженерной академии РУДН



Самусенко О.Е.