



Российский университет
дружбы народов (РУДН)

ул. Минлухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198
ОГРН 1027739189323; ОКПО 02066463; ИНН 7728073720

Телефон: +7495 434 53 00, факс: +7495 433 15 11
www.rudn.ru; rudn@rudn.ru

07 февраля 2022
№ 2022-10-20/04

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



ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Российский университет
дружбы народов» (РУДН)

на диссертационную работу **Андреева Александра Сергеевича**
«Совершенствование численного метода расчета оболочек в
геометрически нелинейной постановке при использовании векторной
интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.1.9 – «Строительная механика»

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 143 наименований, и приложения. Диссертационная работа аккуратно оформлена и логично структурирована, наглядно и подробно иллюстрирована. Автореферат в полной мере отражает ее содержание и основные результаты исследования.

Актуальность темы диссертационного исследования.

Конструкции, состоящие из тонких оболочек и их фрагментов нашли свое широкое применение в различных отраслях науки и техники. Несмотря на имеющееся большое разнообразие литературы, посвященной проблеме расчета тонких оболочек и имеющих программных комплексов, определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) таких конструкций, часто возникают задачи, связанные с проведением дополнительных исследований. Расчет инженерных конструкций наиболее часто выполняют с применением численных методов. В большинстве известных программных комплексов (NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, ЛИРА САПР, СКАД и др.) расчеты на прочность конструкций производят с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Тем не менее, как

показывают исследования, в расчете пространственных конструкций типа оболочек МКЭ не всегда приводит к требуемой точности и надежности анализа НДС оболочечной конструкции сложной геометрии. В связи с этим диссертационная работа, посвященная разработке алгоритмов расчета тонких оболочечных конструкций в геометрически нелинейной постановке на основе векторной интерполяции с учетом деформации поперечного сдвига, позволяющей учитывать смещения конечных элементов как твердого целого, является актуальной.

В работе автором поставлены и решены следующие задачи:

- получение на шаге нагружения геометрических соотношений между приращениями деформаций и приращениями компонент вектора перемещения и приращениями компонент вектора углов поворота нормали и их производными;
- получение разрешающих соотношений для разработки алгоритма компоновки матрицы жесткости четырехугольного конечного элемента для расчета тонких оболочек на основе векторной и стандартной форм интерполяционных процедур в геометрически нелинейной постановке с учетом деформаций поперечного сдвига;
- разработка алгоритма формирования матриц жесткостей четырехугольного конечного элемента для расчёта тонких оболочек на основе векторной и стандартной форм интерполяционных процедур с учетом деформации поперечного сдвига в геометрически нелинейной постановке;
- разработка пакетов программ для нахождения численных значений напряжений под действием различного рода нагрузок, действующих на тонкостенную оболочку в геометрически нелинейной постановке;
- проведение сопоставительного анализа численных прочностных расчетов НДС тонких оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига в геометрически нелинейной постановке при различных вариантах интерполяционной процедуры искомых величин на шаге нагружения.

Задачи исследования сформулированы исходя из цели диссертационной работы - разработать алгоритмы расчёта на прочность оболочечных конструкций при использовании векторной формы интерполяционной процедуры в геометрически нелинейной постановке с учётом деформации поперечного сдвига при реализации разработанных алгоритмов в пакетах авторских прикладных программ.

Структура работы

Общий объем диссертационной работы составляет 154 страницы и включает 12 таблиц и 32 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указаны цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость диссертационной работы, применяемые методы исследований, методология исследования, положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится краткий обзор существующих российских и зарубежных работ по исследуемой теме и показано, что в большинстве статей авторы используют классическую теорию пластин и оболочек, которая была проверена временем и нашла широкое применение на практике. При использовании классической теории возникает погрешность, связанная с гипотезой Кирхгофа. В качестве решения проблемы в диссертационной работе предлагается провести учет деформаций поперечного сдвига. В обзоре также показано, что

расчет оболочек с учетом геометрической и физической нелинейностей на основе метода конечных элементов требует дальнейшего развития и совершенствования.

Вторая глава посвящена анализу НДС тонких оболочек в линейной постановке с учетом сдвиговых деформаций. Приводится вывод основных геометрических и физических соотношений упругих оболочек, представлен алгоритм формирования матрицы жесткости четырехузлового конечного элемента при использовании стандартной для МКЭ интерполяционной процедуры и альтернативной формы векторной интерполяции искомых величин.

В третьей главе получены основные геометрические соотношения тонких оболочек с учетом сдвиговых деформаций в геометрически нелинейной постановке, определяющие связь между приращениями деформаций и компонентами шагового вектора перемещения, компонентами шагового вектора угла наклона нормали, а также первыми производными вышеуказанных компонент.

В четвертой главе представлен вывод новых интерполяционных зависимостей для компонент вектора шагового перемещения и компонент шагового вектора углов наклона нормали. Во второй, третьей и четвертой главах приведены примеры расчета и анализ полученных результатов.

В приложении приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования, что подтверждается наличием последовательного плана исследования. Выдвигаемые соискателем теоретические и методологические положения, а также сформированные в диссертации выводы и предложения, как результаты исследования, являются новыми.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследования

Достоверность полученных результатов в научной работе обоснована строгой математической процедурой выводов основных геометрических и физических соотношений, корректной постановкой математической задачи с применением векторного и тензорного анализов, дифференциальной геометрии, положений теории интерполяции искомых величин. Результаты исследований соответствуют физической картине исследуемых процессов деформирования. Наблюдается совпадение количественных результатов, полученных автором при реализации разработанных им алгоритмов, с результатами исследований других авторов и результатами, полученными аналитическим путем. В приведенных примерах расчета тонких оболочек исследовалась сходимость вычислительного процесса, что является необходимым условием адекватности численного метода анализа НДС инженерных конструкций.

Научная новизна диссертационной работы

Соискателем разработаны методика и алгоритмы расчета НДС тонких оболочек в геометрически нелинейной постановке с учетом деформаций сдвига с использованием стандартной в МКЭ и векторной интерполяционных процедур искомых величин. Проведены расчеты в геометрически нелинейной постановке и анализ НДС тонких оболочек, имеющих различные условия опирания и находящихся под действием различного рода нагрузок, исследована сходимость вычислительного процесса. На основе выполненных расчетов тонких оболочек и

их фрагментов в геометрически нелинейной постановке, была показана высокая степень точности применения векторного способа интерполяции искомых величин на шаге нагружения и необходимость учета деформаций поперечного сдвига.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

1. Разработаны алгоритмы расчета НДС тонких оболочек в геометрически нелинейной постановке с учетом деформаций поперечного сдвига на основе стандартной в МКЭ и векторной интерполяционных процедур искомых величин.
2. Показана высокая точность и корректность алгоритма расчета тонких оболочек с различными видами граничных условий на основе векторной интерполяции искомых величин.
3. Предложенную методику и полученные программы можно применять в расчетной инженерной практике проектно-конструкторских и научно-исследовательских организаций при реальном проектировании элементов, состоящих из тонкостенных оболочечных конструкций.
4. Использование МКЭ с векторной формой интерполяции искомых величин в учебном процессе в курсах строительной механики и расчета тонких оболочек.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях: научно-практической конференции с международным участием "Инженерные системы - 2018" (Москва, РУДН, 2018); XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, Башкирский государственный университет, 2019); XXIX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020) и других. Полностью работа докладывалась на расширенном заседании кафедры «Высшая математика» Волгоградского государственного аграрного университета 11 февраля 2021 г. Основные положения диссертации полностью представлены в 21 опубликованной работе, из них: 4 статьи в журналах, проиндексированных в базах данных SCOPUS / Web of Science; 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки РФ; 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ; 7 статей опубликованы в других изданиях.

Замечания по диссертационной работе

1. Обозначения функционала Лагранжа в главах 2, 3 и 4 отличаются друг от друга. Отсюда возникает некоторая неясность, с какой целью были введены различные обозначения одного и того же функционала.
2. В примерах диссертации автором используются разные единицы измерения, к примеру: в примерах 2.5, 2.6 геометрические параметры конструкции измеряются в сантиметрах, а в примерах 3.5, 3.6, 4.3 - в метрах. Для лучшего восприятия и понимания поставленной задачи желательно пользоваться одной единицей измерения.
3. В работе указывается, что её целью является разработка алгоритмов

расчёта на прочность оболочечных конструкций при использовании векторной формы интерполяционной процедуры в геометрически нелинейной постановке с учётом деформации поперечного сдвига. Не лишним было бы, для лучшего восприятия разработанных в диссертационной работе вычислительных алгоритмов, представить их в виде блок-схем.

Указанные замечания не снижают высокого уровня работы Андреева Александра Сергеевича и ее значимости в решении проблемы совершенствования численных методов расчета на прочность тонких оболочек в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения.

Заключение

На основе вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работы **Андреева Александра Сергеевича на тему «Совершенствование численного метода расчета оболочек в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения»** является завершенной самостоятельной научно-исследовательской работой, характеризуется внутренним единством, содержательностью и достаточностью совокупных научных результатов, выносимых автором на публичную защиту, подтверждает личный вклад соискателя в развитие строительной механики, именно в разработку численных методов расчета напряженно-деформированного состояния оболочек с произвольной геометрией. Заявленная цель диссертации достигнута, поставленные задачи комплексно и успешно решены, основные научные положения, вследствие своей оригинальности и перспективности, в полном объеме могут использоваться для последующих профильных научных исследований. Диссертация написана технически грамотным языком, материал изложен последовательно и соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.1.9 Строительная механика: п. 2. Линейная и нелинейная механика конструкций и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета; п. 4. Численные методы расчета сооружений и их элементов.

Автореферат и научные публикации соискателя в должной мере раскрывают содержание диссертации. Считаем, что представленная к защите диссертационная работа Андреева Александра Сергеевича на тему «Совершенствование численного метода расчета оболочек в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения» соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Андреев Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. – Строительная механика.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Андреева Александра Сергеевича на тему «Совершенствование численного метода расчета оболочек в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения» подготовлен к.т.н., доцентом, директором департамента строительства инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Российский университет дружбы народов» Рынковской М.И., рассмотрен и одобрен на заседании департамента строительства инженерной академии. По результатам обсуждения диссертации сформулировано положительное заключение. На заседании присутствовало 24 человека, из них 5 докторов наук. Протокол №5, от 18.01.2022.

Директор инженерной академии,
доктор технических наук (05.07.09),
профессор



Разумный Юрий Николаевич

Директор департамента строительства,
кандидат технических наук (05.23.17),
доцент



Рынковская Марина Игоревна

Профессор департамента строительства,
доктор технических наук (01.02.04), профессор



Зверев Евгений Михайлович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», департамент строительства.
Почтовый адрес: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 3
E-mail: rynkovskaya-mi@rudn.ru,
Тел.: +7(495)955-08-05
«18» 01 2022 г.



Российский университет дружбы народов (РУДН)

ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198
ОГРН 1027739189323; ОКПО 02066463; ИНН 7728073720

Телефон: +7495 434 53 00, факс: +7495 433 15 11
www.rudn.ru; rudn@rudn.ru

26 января 2022 г.
№ 2022-01-28/06

Председателю
Диссертационного совета
24.2.282.05 (Д 212.028.10),
созданного на базе Волгоградского
государственного технического
университета,
доктору технических наук,
профессору Калашникову С.Ю.

Уважаемый Сергей Юрьевич!

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» дает согласие на выполнение функций ведущей организации по диссертации Андреева Александра Сергеевича «Совершенствование численного метода расчета оболочек в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной интерполяции линейных и угловых параметров на шаге нагружения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Основные сведения об организации, а также перечень трудов работников по теме рассматриваемой диссертации представлены в Приложении.

Структурное подразделение, ответственное за подготовку отзыва – департамент строительства инженерной академии РУДН.

Приложение.

Сведения о ведущей организации – 2 л.

Первый проректор – проректор по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов», доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН



А. А. Костин

Сведения о ведущей организации

Полное и сокращенное наименование организации	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН)
Местонахождение	г. Москва
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес сайта	117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Телефон: +7 (495) 434-70-27 E-mail: rudn@rudn.ru http://www.rudn.ru
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и изданиях за последние 5 лет	
1. Кривошапко, С. Н. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. часть 1. подвиды и направления [Текст] / С. Н. Кривошапко, Л. А. Алборова, И. А. Мамиева // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 3. – С. 125 - 134. 2. Рынкoвская, М. И. Исследование возможностей современных компьютерных программ для расчета оболочек сложной геометрии [Текст] / М. И. Рынкoвская, Т. Эльбердов, Э. Серт, А. Экснер // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16. – №1. – С. 45-53. 3. Ермакова, Е. В. Формирование пластики оболочек в концертном зале [Текст] / Е. В. Ермакова, М. И. Рынкoвская // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. № 3(49). – С. 53-61. 4. Krivoshapko, S. N. Design of a Thin Metal Product with the Developable Middle Surface from a Sheet by Parabolic Bending [Электронный ресурс] / S. N. Krivoshapko, M. Rynkovskaya, A. Razin // Materials and Technologies in Engineering II, Materials Science Forum. – 2020. – Vol. – 986. – pp 78-85. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.986.78 5. Rynkovskaya, M. Numerical experiments on helicoids stress-strain state [Электронный ресурс] / M. Rynkovskaya, A. S. Markovich, M. Gil-Oulbe, S. V. Strashnov // Advanced Structured Materials (см. в книгах). – 2020. Т. – 113. – С. 95-104. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1_7 6. Rynkovskaya, M. Preliminary shape design for screws and helical structures [Электронный ресурс] / M. Rynkovskaya // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2020. – Vol. 9. – №. 5. – pp. 696-700. https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.5.696-700 7. Krivoshapko, S. N. Tangential developable surfaces and shells: new results of investigations [Электронный ресурс] / S. N. Krivoshapko, I. A. Mamieva, A. D. Razin // Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. – 2019. – № 1. – С. 324. https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.03.00031 8. Rynkovskaya, M. Plastic deformations occurring in shells with developable middle surfaces during bending [Электронный ресурс] / M. Rynkovskaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3. Сер. "2018 3rd International Conference on Building Materials and Construction, ICBMC 2018"– 2018.– С. 012054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/371/1/012054 9. Krivoshapko, S. N. Bending of a thin sheet into a circular cylinder with two free edges for the moon conditions [Текст] / S. N. Krivoshapko, M. Rynkovskaya, V. J. Paul // Advances in the Astronautical Sciences. 1st IAA/AAS SciTech Forum on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials. – 2018. – 2020. – С. 741-753.	

10. Filipova, J. Carved monge surfaces as new forms in the architecture [Электронный ресурс] / J. Filipova, M. Rynkovskaya // MATEC Web of Conferences. 3. Сер. "2016 the 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, ICMME 2016" – 2017. – С. 17006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179517006>
11. Krivoshapko, S. N. Five types of ruled helical surfaces for helical conveyers, support anchors and screws [Электронный ресурс] / S. N. Krivoshapko, M. Rynkovskaya // MATEC Web of Conferences. 3. Сер. "2016 the 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, ICMME 2016" – 2017. – С. 06002. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20179506002>
12. Romanova, V. A. Automatic modeling of surfaces with identical slopes [Электронный ресурс] / V. A. Romanova, M. Rynkovskaya, V. Ivanov / Advanced Structured Materials (см. в книгах). – 2019. – Т. 92. – С. 143-156. https://doi.org/10.1007/978-3-319-79005-3_10
13. Rynkovskaya, M. Analytical method to analyze right helicoid stress-strain [Текст] / M. Rynkovskaya, V. Ivanov // Advanced Structured Materials (см. в книгах). 2019. – Т. 92. – С. 157-171.
14. Rynkovskaya, M. Support draft calculation for a ramp in the form of developable helicoid [Электронный ресурс] / M. Rynkovskaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3. Сер. "2018 3rd International Conference on Building Materials and Construction, ICBMC 2018" – 2018. – С. 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/371/1/012041>
15. Rynkovskaya, M. Analysis of displacements in beam structures and shells with middle developable surfaces [Электронный ресурс] / M. Rynkovskaya // MATEC Web of Conferences. – 2017. – С. 16001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710816001>

Первый проректор – проректор по научной
работе федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Российский университет
дружбы народов», доктор медицинских наук,
профессор, член-корреспондент РАН
« 26 » 01 2022 г.



А. А. Костин