

## О Т З Ы В

официального оппонента Каюмова Рашита Абдулхаковича доктора физико-математических наук, профессора кафедры «Механика» Института строительства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», на диссертационную работу Ищанова Тлека Рахметоловича «Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния тонких оболочек с учетом поперечного сдвига при различных вариантах аппроксимации угловых перемещений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17. – Строительная механика

**Актуальность избранной темы.** В диссертационной работе Ищанова Т.Р. представлены результаты исследований актуальных проблем деформирования твердых тел, в частности тонких оболочек, связанных с потребностями практики, к которым относятся вопросы развития и применения метода конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений с учетом деформации поперечного сдвига на основе векторной аппроксимации.

**Цель и задачи исследования.** В диссертации разработан алгоритм конечно-элементного анализа НДС оболочек с учетом деформации поперечного сдвига на основе реализации пакета авторских прикладных программ по расчету на прочность оболочечных конструкций при инвариантной векторной аппроксимации полей перемещений. Обоснована необходимость учета деформаций поперечного сдвига при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) короткопролетных, в частности, жестко защемленных оболочек. Представлен вывод геометрических соотношений тонких оболочек с учетом деформации поперечного сдвига при различных вариантах отсчета угла поворота нормали. Разработан алгоритм формирования матриц жесткостей четырехугольных конечных элементов для расчета оболочек с учетом деформации поперечного сдвига при использовании скалярной и векторной форм аппроксимаций полей перемещений.

**Оценка достоверности и обоснованности научных положений и выводов.** Анализ численных результатов, представленных в работе, показывает, что использование векторной аппроксимации полей перемещений и углов поворота нормали дает возможность учитывать в неявной форме смещения КЭ как жесткого целого, в то время как при использовании скалярной аппроксимации искомых величин такая возможность отсутствует.

На основании численного анализа НДС оболочек, показана необходимость учета деформаций поперечного сдвига при расчете короткопролетных, жестко защемленных оболочечных конструкций. Показаны преимущества предложенного

варианта отсчета угла наклона нормали по сравнению с общепринятым вариантом в сочетании с интерполяцией полей векторов перемещений и векторов углов поворота нормали.

Результаты диссертационной работы являются **достоверными**, это обеспечивается математической обоснованностью вывода основных геометрических соотношений тонких оболочек, совпадением количественных результатов, полученных при использовании разработанных алгоритмов, с данными исследований других авторов, результатами, полученными по аналитическим формулам. Во всех примерах расчета оболочек контролировалась сходимость вычислительного процесса, как необходимого условия адекватности любого численного метода. Основные положения диссертации опубликованы в работах диссертанта.

#### **Научная новизна исследования и полученных результатов.**

Наиболее важными **научными результатами** работы можно считать следующие

1. Получены основные геометрические соотношения между деформациями и перемещениями при альтернативном общепринятому варианте отсчета угла поворота нормали.
2. Разработан алгоритм формирования матриц жесткостей четырехугольных конечных элементов при отсчете угла поворота нормали от ее исходного и деформированного состояния для расчета оболочек с учетом деформации поперечного сдвига на основании скалярной конечно-элементной интерполяционной процедуры.
3. Впервые разработан алгоритм формирования матриц жесткостей четырехугольных конечных элементов при отсчете угла поворота нормали от ее исходного и деформированного состояния для расчета оболочек с учетом деформации поперечного сдвига на основании векторной конечно-элементной интерполяционной процедуры.
4. Выполнен численный анализ НДС оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига при различных вариантах отсчета угла наклона нормали в процессе деформирования с использованием скалярной аппроксимации перемещений, показавший преимущества второго варианта расчета, когда отсчет угла поворота нормали осуществлялся от ее деформированного состояния.
5. Выполнен ряд численных экспериментов и анализ НДС оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига при различных вариантах отсчета угла наклона нормали в процессе деформирования при использовании векторной аппроксимации полей перемещений, показавший существенные преимущества расчетов с векторной интерполяционной процедурой.

**Практическая значимость результатов работы.** На основе результатов исследования разработаны программные модули, с использованием которых можно определять НДС оболочечных конструкций с учетом деформации поперечного сдвига. Представленные разработки включены в программы для ЭВМ, на которые получены 3 свидетельства о государственной регистрации.

**Апробация работы и внедрение результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы за период исследования обсуждались на различных семинарах, докладывались на международных и национальных конференциях, где получили одобрение ведущих ученых. К диссертации прилагается акт внедрения результатов работы в ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий».

У автора имеется 12 научных публикаций по теме диссертационной работы, 4 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одна – в SCOPUS / Web of Science.

**Личный вклад соискателя** заключается в разработке дискретных моделей оболочек, алгоритмов расчета, создании пакетов программ и выполнении анализа НДС оболочек.

**Оценка содержания диссертации.** Основные положения диссертационной работы изложены на 168 страницах, состоят из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка литературы и 2 приложений. Работа иллюстрирована 19 таблицами и 37 рисунками. Список литературы содержит 189 источников, в том числе 53 зарубежных авторов.

*Во введении* отражены актуальность темы исследования, цели и задачи, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, методология исследования, положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* были проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов, в которых исследовалось НДС оболочек согласно теории Кирхгофа-Лява и с учетом сдвиговых деформаций на основе МКЭ.

*Во второй главе* на основании теории тонких оболочек Новожилова В.В. были выполнены расчеты по определению НДС эллиптического цилиндра при различном характере воздействий (сосредоточенные и распределенные силы, внутреннее давление) и условий закрепления на границах (свободный край, шарнирное опирание, жесткая заделка). Расчеты проводились при использовании скалярной и векторной форм аппроксимаций полей перемещений. Анализ результатов расчетов показал, что скалярная аппроксимация не позволяет получать удовлетворительные по точности решения при расчете эллиптических цилиндров, в то время как использование векторной аппроксимации приводит к достижению приемлемых по точности значений параметров НДС с автоматическим учетом смещений КЭ как жесткого целого.

*В третьей главе* изложены два алгоритма расчета тонких оболочек с учетом деформации поперечного сдвига при использовании скалярной интерполяции полей перемещений. В первом варианте расчета отсчет угла поворота нормали осуществляется от ее исходного состояния, во втором – от ее деформированного состояния. На основании проведенного сравнительного анализа двух вариантов расчета эллиптического цилиндра был сделан вывод о том, что второй вариант позволяет получить удовлетворительные по точности значения напряжений при относительно редкой сетке элементов дискретизации. В то же время следует отметить, что и первый вариант компоновки матрицы жесткости четырехугольного

конечного элемента с учетом деформации поперечного сдвига позволяет получать приемлемые результаты, но только при весьма существенном сгущении сетки дискретизации рассчитываемой оболочки.

В четвертой главе изложены два алгоритма расчета тонких оболочек с учетом сдвиговых деформаций при использовании инвариантной интерполяционной процедуры векторных полей перемещений. В данной главе был выполнен сравнительный анализ первого и второго вариантов отсчета угла поворота нормали при использовании скалярной и векторной форм аппроксимаций. Показано, что векторная аппроксимация позволяет учесть смещения четырехугольного элемента дискретизации как жесткого целого.

После каждой главы сформулированы выводы.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного диссертационного исследования.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1) В ряде примеров, оценка достоверности решения производится только по проверке статических условий равновесия. Возникает вопрос о достаточности этого для проверки сходимости полученных решений к точным.

2) Во второй главе в качестве узловых неизвестных четырехугольного КЭ выбраны компоненты вектора перемещения, а также их первые и вторые производные. Однако в задачах об определении НДС неоднородных конструкций на границе тел, имеющих разные механические характеристики, должны возникать разрывы в деформациях. Это означает, что должны терпеть разрывы и первые производные от перемещений. С помощью методик, разработанных в диссертации, это можно описать лишь приближенно путем очень густой сетки. В диссертации желательно было исследовать и эту сторону вопроса, т.к. МКЭ должен быть эффективен и при анализе именно такого рода конструкций, т.к. он не требует выполнения дополнительных условий сопряжения решений на границах раздела разнородных тел.

3) Как обычно, можно сделать замечания по полноте обзора. Например, нет ссылок на работы одного из известных ученых Галимова Н.К., посвященные теории оболочек с учетом сдвига, на работы Сахарова А.С. с соавторами, посвященные разработке четырехугольных КЭ, позволяющих обойти особенности их применения, и др.

Указанные замечания не являются принципиальными и не снижают значимости диссертационной работы. В целом работа выполнена на хорошем уровне, достаточном для кандидатской диссертации, она подтверждает высокую квалификацию соискателя и является самостоятельным законченным научным исследованием с актуальной темой, научной новизной и практической значимостью.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

профессор кафедры «Механика»  
Института строительства  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»  
доктор физ.-мат. наук по специальности  
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела,  
тел.: +7 (917) 260-55-31  
e-mail: kavumov@rambler.ru

Karim

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»  
«7» мая 2018 г.

Собственноручную подпись  
Р.А. Каюмовъ Ю.Б. Макарова  
достоверяю  
Начальник Отдела кадров  
Рябов, Замирзалино  
«            »            20    г.

кандидат технических наук, доцент  
«7» ноября 2018 г.



Макаров Д.Б.

Волгоградский государственный  
технический университет  
Председателю диссертационного совета  
Д 212.028.10  
С.Ю. Калашникову

Я, Каюмов Рашит Абдулхакович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Ищанова Тлека Рахметоловича «Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния тонких оболочек с учетом поперечного сдвига при различных вариантах аппроксимации угловых перемещений» по специальности 05.23.17 «Строительная механика», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук. Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

#### Сведения об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Каюмов Рашит Абдулхакович
Ученая степень, шифр и наименование научной специальности в соответствии с номенклатурой, по которой защищена диссертация	доктор физ.-мат. наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела
Ученое звание	профессор
Полное наименование организации, являющейся местом работы в момент предоставления отзыва, должность	профессор кафедры «Механика» Института строительства ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Каюмов Р.А. Закритическое поведение сжатых стержней в упругой среде // Известия РАН. Механика твердого тела, 2017- №5.- с.122-129</li> <li>R A Kayumov, I Z Muhamedova , B F Tazyukov, F R Shakirzjanov. Parameter determination of hereditary models of deformation of composite materials based on identification method. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 973 (2018) 012006 doi :10.1088/1742-6596/973/1/012006</li> <li>Paimushin V.N., Firsov V.A., Gyunal I., Egorov A.G., Kayumov R.A. Theoretical-experimental method for determining the parameters of damping based on the study of damped flexural vibrations of test spec-imens. 3. Identification of the characteristics of internal damping // Mechanics of Composite Materials. 2014. T. 50. № 5. pp. 633-646</li> <li>Kayumov R.A., Mukhamedova I.Z., Tuisina E.B. Analysis of a beam with a crack under irregular cyclic load//Russian Aeronautics. 2016, Vol.59, pp.452-459</li> <li>R A Kayumov, B F Tazyukov, I Z Muhamedova. Nonlinear problems of stability cylindrical panels with imperfection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2016 V.158 01025</li> <li>R A Kayumov , I Z Muhamedova , A M Suleymanov, B F Tazyukov Development of film- and-fabric composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2016 V.158 010250.</li> <li>Паймушин В.Н., Каюмов Р.А., Холмогоров С.А., Шишкин В.М. Определяющие соотношения в механике перекрестно армированных волокнистых композитов при кратковременном и длительном одноосном нагружении//Известия вузов. Математика.-2018, №6, с. 85–91.</li> <li>Паймушин В.Н., Каюмов Р.А., Холмогоров С.А. Экспериментальные исследования механизмов формирования остаточных деформаций волокнистых композитов слоистой структуры при циклическом нагружении//Ученые записки Казанского университета.</li> </ol>	



9. Каюмов Р.А., Мангушева А.Р., Мухамедова И.З. Оценка долговечности пленочно-тканевых композитных материалов с учетом перепадов температуры//Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 101-104
10. Бутенко Ю.И., Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Краевые эффекты (погранслои) в однослойных полосах из ортотропного материала // Механика композиционных материалов и конструкций, 2014, том 20, №1, стр.132-147.
11. Каюмов Р.А. Большие прогибы балок, арок и панелей в упругой среде с учетом деформаций сдвига // В сборнике: Материалы XXII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 111-113.
12. Кудряшов А.В., Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Шакирзянов Ф.Р. Существование решения задачи о конечном деформировании круговой упругопластической оболочки // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 3. С. 251-253.
13. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Гаврюшин С.С. Моделирование процесса деформирования и оценка несущей способности системы грунт - тонкостенная конструкция // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 6 (651). С. 20-24.
14. Каюмов Р.А., Луканкин С.А., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2015. – Т. 157, кн. 4. – С. 112–132
15. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Ахметзянов Р.И. Моделирование процесса деформирования и оценка долговечности армированной балки// Известия КГАСУ.- 2017, №4 - С. 173-181

Официальный оппонент  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор кафедры «Механика»  
Института строительства  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»



Каюмов  
Рашит Абдулхакович

Подпись Каюмова Рашита Абдулхаковича заверяю



Собственноручную подпись <i>Р.А. Каюмова</i>
удостоверяю
Начальник Отдела кадров <i>Валерий Захарович</i>
«07» 11 2018 г.