

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук

Горынина Арсения Глебовича

на тему: «Математические модели расчёта напряжённо-деформированного
состояния композитных элементов конструкций на основе метода
асимптотического расщепления»
по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Становление механики композитов в виде отдельной дисциплины как в рамках цикла механики деформированного твёрдого тела, так и постепенно формирующегося нового цикла в механике, обусловлено применением математического аппарата разрывных и обобщённых функций, теорий осреднения и других свойственных именно этой дисциплине математических методов и подходов. Поскольку в рецензируемой диссертации одной из главных целей являлось развитие численно-аналитических методов исследования тонкостенных композитных стержней, пластин и оболочек, включая вопросы прочности и устойчивости, тематику работы следует признать **актуальной и важной**.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 166 наименований, и приложения; её объём – 150 страниц.

Во **введении** описывается степень разработанности темы исследования, приводится краткий обзор теорий деформирования стержней, различных асимптотических и вариационно-асимптотических методов в механике стержней, пластин и оболочек, обосновывается актуальность выбранного направления, идёт также речь об объектах и предметах исследования диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию осесимметричного напряжённо-деформированного состояния в композитных цилиндрических оболочках, выполненных из ортотропного упругого материала. Проводится процедура

асимптотического расщепления по малому геометрическому параметру, равному отношению толщины оболочки к её длине. Идея расщепления состоит в сведении двумерной постановки к двум одномерным (по длине и по толщине). Подробно рассматривается первое приближение метода, позволяющее определить все компоненты вектора перемещений и тензора напряжений.

В главе 2 решаются задачи деформирования анизотропных (в самом общем случае анизотропии) композитных стержней с учётом взаимосвязанности их растяжения-сжатия, кручения и изгиба. Метод асимптотического расщепления сводит исходную трёхмерную постановку к двумерным в плоскости сечения и к одной одномерной в направлении длины. Выделяется частный случай деформирования слоистых стержней с поперечной плоскостью симметрии анизотропных свойств.

Глава 3 посвящена численному анализу двумерных задач в плоскости сечения именно для этого случая. Формулируются математические модели GN-FOBT, GN-BESVBT, GN-RWBT, проводится их сравнение и валидация на экспериментальных данных. Предлагается конечноэлементный численный алгоритм, верифицированный на тестовых примерах с известными аналитическими решениями. Реализуется процедура распараллеливания, оптимизирующая вычислительные сложности. Приведённый графический материал иллюстрирует качественные эффекты в задачах о кручении и изгибе композитных коробчатых стержня и двутавра, о четырёхточечном изгибе трёхслойной панели с мягким заполнителем.

В главе 4 на основе выбранной модели GN-RWBT исследуется стеснённое кручение слоистых стержней сплошного прямоугольного сечения, либо замкнутого коробчатого сечения, либо открытого, поперечного сечения (двутавры, корытные и уголкового сечения).

В **заключении** перечисляются решённые задачи, формулируются перспективные направления для дальнейших исследований с учётом полной анизотропии материала, анализа асимптотик более высоких порядков, учёта термоупругих и нелинейных факторов.

В **приложении** приводится свидетельство о государственной регистрации и описание программы BASA для расчёта прочности слоистых композитных стержней сложного поперечного сечения.

Научная новизна работы состоит в существенном и продуктивном численно-аналитическом развитии метода асимптотического расщепления, предложенного ранее Г.Л. Горыниным и Ю.В. Немировским, применительно к нахождению напряжённо-деформированного состояния в нагруженных композитных элементах конструкций, таких как слоистые цилиндрические оболочки и слоистые анизотропные стержни произвольного поперечного сечения. Разработан и верифицирован оригинальный конечноэлементный алгоритм решения соответствующих краевых задач.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и верификации новых математических моделей механики композитов, с достаточной степенью точности описывающих поведение тонкостенных слоистых стержней, пластин и осесимметричных оболочек в самых разнообразных технологических процессах и режимах эксплуатации, в том числе высокоточных. Результаты работы могут быть использованы в научной и образовательной практике таких организаций как МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, ИГИЛ СО РАН, Красноярский научный центр СО РАН.

Достоверность результатов обеспечивается применением хорошо апробированных классических алгоритмов и методов механики деформируемого твёрдого тела, математического анализа, функционального анализа, теории обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в

частных производных, асимптотических методов, а также сравнением с известными тестовыми результатами.

Основные результаты работы отражены в трёх публикациях автора в изданиях, рекомендованных ВАК, среди которых стоит выделить статьи [163] в журнале «Прикладная механика и техническая физика» и [164] в «Известиях вузов. Строительство» и ряде других публикаций. Результаты апробированы на многих представительных международных научных конференциях, индексируемых в Web of Science и Scopus, и научно-исследовательских семинарах. Выделим здесь XXVIII Всероссийскую конференцию по численным методам в теории упругости и пластичности (Красноярск, 2023). Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет читателю составить достаточно полное представление о ней.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**.

1) В тексте работы отсутствуют в явном виде рассуждения о факте и характере сходимости асимптотических рядов типа (1.9), (1.10), используемых в методе асимптотического расщепления. Если результаты такого анализа есть в работах авторов этого метода, об этом надлежало бы упомянуть. Когда быстрее уменьшается невязка частичной суммы с точным решением – по мере увеличения числа членов ряда или по мере уменьшения асимптотического параметра ϵ ? Имеет ли место сильная асимптотичность (в смысле Пуанкаре) во всех точках областей тел в каждой из задач? Важность последнего вопроса и примеры отрицательного на него ответа иллюстрируют работы, в которых также используется и аналитически развивается метод асимптотических разложений применительно к деформированию тонких тел:

- *Георгиевский Д.В.* Асимптотический анализ пластического течения вдоль образующей в тонком пластическом слое // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 5. С. 111-119.

- Георгиевский Д.В. Асимптотическое интегрирование задачи Прандтля в динамической постановке // Изв. РАН. МТТ. 2013. № 1. С. 97-105.
- Georgievskii D.V., Pobedria B.E. Asymptotic Analysis of Evolution of a Neck in Extended Thin Rigid Plastic Solids // Russian J. Math. Phys. 2016. V. 23. No. 2. P. 200-206.
- Георгиевский Д.В. Динамические режимы растяжения стержня из идеально жёсткопластического материала // ПМТФ. 2021. Т. 62. № 5. С. 119-130.

2) В задаче о четырёхточечном изгибе сэндвич-панели (с. 95-99), составленной из материалов с сильно различающимися механическими свойствами, требуется дополнительное обоснование применимости геометрически линейной теории по всей толщине панели.

3) Для понимания читателю смысла текста было бы удобнее:

- вместо термина «высота стержня» (с. 46, формула (2.4)) использовать «характерный размер поперечного сечения стержня»;
- разъяснить дословный перевод термина «стеснение депланации в сечении» (с. 75, 76, 79);

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и не влияют на его общую положительную оценку. Диссертация содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора в развитие важных направлений механики деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа «Математические модели расчёта напряжённо-деформированного состояния композитных элементов конструкций на основе метода асимптотического расщепления» удовлетворяет пунктам 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» № 842 (в редакции от 16 октября 2024 года), утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации 24

сентября 2013 года, а именно, является законченной научно-квалификационной работой, демонстрирующей возможность нахождения напряжённо-деформированного состояния в композитных стержнях, пластинах и оболочках при сложном комбинированном нагружении. Результаты, полученные в работе, имеют существенное значение для количественного и качественного моделирования эффектов, происходящих в нагруженных элементах конструкций.

Считаю, что диссертационная работа «Математические модели расчёта напряжённо-деформированного состояния композитных элементов конструкций на основе метода асимптотического расщепления» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Горынин Арсений Глебович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессор, заведующий кафедрой теории упругости механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Георгиевский Дмитрий Владимирович

27.12.2024

Контактные данные:

тел.: +7(495)9395539, e-mail: georgiev@mech.math.msu.su

Адрес организации: Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1.

Подпись сотрудника механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Д.В. Георгиевского удостоверяю:

Декан механико-математического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова, член-корреспондент РАН

