

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кирилловой Ирины Васильевны «Асимптотическая теория нестационарных процессов в тонких упругих оболочках вращения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Основываясь на глубоком анализе и классификации проведенных к настоящему времени исследований и имеющихся результатов, которые создали базу для системного подхода, в представленной диссертационной работе И.В. Кириллова поставила перед собой достойную цель: разработка единой асимптотической теории расчета нестационарного напряженно-деформируемого состояния (НДС) оболочек вращения произвольного профиля при ударных воздействиях всех возможных типов. Разработанная теория должна, в частности, обобщать и дополнять существующие классические теории (Кирхгофа-Лява, Тимошенко и др.), преодолевая присущие им ограничения и окончательно определяя область их применимости.

### Актуальность темы диссертации

Асимптотическая теория тонких упругих оболочек, разработанная А.Л. Гольденвейзером, позволила кардинально решить вопрос о применении приближённых двумерных теорий в задачах статики и стационарной динамики тонкостенных конструкций. Метод асимптотического интегрирования точных трёхмерных уравнений теории упругости, основанный на введённых базовых понятиях изменяемости напряжённо-деформированного состояния по пространственным координатам и динамичности по времени, позволил построить систему составляющих НДС, описывающих путём наложения искомое трёхмерное состояние с заданной асимптотической погрешностью. В эту систему входят как различные двумерные компоненты по уточнённой теории Кирхгофа-Лява, так и

ПОЛУЧЕНО 13  
ИПРИМ РАН от 02.02.2026,  
*Ирина Широбокова*

погранслои, реализующие принцип Сен-Венана в малых пограничных областях. Однако эти методы, разработанные для задач статики, не применимы в случае нестационарного, особенно ударного, воздействия.

В диссертационной работе эти ограничения систематически преодолеваются на основе модификации метода срациваемых разложений на разных участках фазовой плоскости, что дает в результате единую асимптотически оптимальную теорию, применимую на всей фазовой плоскости. Ее создание имеет не только важное теоретическое, но и большое прикладное значение, что и определяет актуальность диссертационной работы.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация И.В. Кирилловой состоит из введения, шести глав, заключения, списка основных обозначений и списка литературы. Общее количество страниц диссертации – 283, рисунков 28. В списке литературы – 241 источник.

Во **введении** диссертации обоснована её актуальность, сформулированы цель и задачи исследования; описаны научная новизна вместе с теоретической и практической значимостью работы, а также методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приводится общая постановка задачи диссертации, описаны уравнения трёхмерной теории упругости применительно к оболочке вращения; определены основные виды торцевых граничных условий, приводящие к трём различным видам нестационарного НДС; представлен набор компонент нестационарного НДС, применяемых к описанию всех его типов: двумерные составляющие теории Кирхгофа-Лява, погранслои трёх видов – параболического, гиперболического и эллиптического, а также малоамплитудная коротковолновая высокочастотная составляющая. Также в этой главе описаны асимптотические уравнения безмоментной и моментной составляющих теории Кирхгофа-Лява, коротковолновой высокочастотной составляющей и параболического погранслоя.

**В главе 2** разрабатывается асимптотическая теория гиперболического погранслоя, имеющего место в малых окрестностях фронтов волн расширения и сдвига во всех случаях ударных торцевых воздействий. При этом, сначала строится асимптотическое представление передних фронтов через повернутые нормали к срединной поверхности. Асимптотическое интегрирование исходных трёхмерных уравнений теории упругости с целью вывода асимптотических уравнений рассматриваемого погранслоя производится в прифронтовой системе координат, связанной с указанным выше представлением передних фронтов. Построены асимптотически оптимальные уравнения симметричного и антисимметричного по нормальной координате гиперболического погранслоя в окрестности фронта волны расширения и асимптотически оптимальные уравнения антисимметричного погранслоя в окрестности фронта волны сдвига.

**В главе 3** асимптотическая теория строится для первого типа торцевых граничных условий, определяющих действие вида LT (продольное действие тангенциального типа). Используются безмоментная составляющая теории Кирхгофа-Лява, описывающая распространение двумерной волны растяжения-сжатия; параболический погранслой в малой окрестности ложного фронта двумерной волны растяжения-сжатия, с точки зрения трёхмерной теории упругости воспринимаемого как квазифронт; симметричная по нормальной координате коротковолновая высокочастотная составляющая, имеющая малую амплитуду и не представляющая интереса с точки зрения практического применения; симметричный по нормальной координате гиперболический погранслой в окрестности фронта волны расширения. Полнота представления искомого НДС указанными составляющими доказана наличием областей согласования безмоментной составляющей и параболического погранслоя, параболического погранслоя и коротковолновой высокочастотной составляющей, коротковолновой высокочастотной составляющей и гиперболического погранслоя. Построены асимптотические методы решения краевых задач для всех основных

составляющих в общем случае геометрии оболочек вращения. Эффективность разработанных аналитических методов иллюстрируется на примере расчёта компонент НДС для сферической оболочки.

В главе 4 асимптотическая теория строится для второго типа торцевых граничных условий, определяющих воздействие вида LM (продольное воздействие изгибающего типа). Используются изгибная составляющая теории Кирхгофа-Лява (динамический аналог простого краевого эффекта в статической теории оболочек); малоамплитудная антисимметричная коротковолновая высокочастотная составляющая, не представляющая, как и ранее, практического интереса; антисимметричный гиперболический погранслой в окрестности фронта волны расширения. Полнота представления рассматриваемого типа НДС указанными составляющими доказана наличием областей согласования изгибной составляющей и коротковолновой высокочастотной составляющей, коротковолновой высокочастотной составляющей и гиперболического погранслоя. Также построены асимптотические методы решения краевых задач для изгибной составляющей и гиперболического погранслоя в общем случае оболочек вращения, эффективность которых иллюстрируется задачей расчёта компонент НДС для сферической оболочки.

В главе 5 рассматривается теория эллиптического погранслоя, имеющего место в малой окрестности условного фронта поверхностных волн Рэлея. Теория строится на базе вывода асимптотически оптимальных разрешающих уравнений в задаче о поверхностных волнах Рэлея в полуплоскости с криволинейной границей при действии ударной поверхностной нагрузки. Асимптотическое интегрирование исходных трёхмерных уравнений теории упругости с целью вывода асимптотических уравнений эллиптического погранслоя в оболочках вращения произвольного профиля при действии ударной нагрузки на лицевые поверхности производится в прифронтовой системе координат, связанной с условным фронтом поверхностных волн Рэлея. Название рассматриваемого погранслоя определяется эллиптическим

типов его асимптотически оптимальных разрешающих уравнений; однако граничные условия на лицевых поверхностях задаются уравнениями гиперболического типа. Асимптотическое интегрирование уравнений теории упругости в случае торцевых граничных условий проводится после выделения частного решения, отвечающего заданным торцевым граничным условиям, с целью сведения исходной задачи к определению эллиптического погранслоя для эквивалентной задачи составляющей предыдущему случаю действия ударной нагрузки на лицевые поверхности.

В главе 6 асимптотическая теория строится для граничных условий, определяющих действие вида NW при поверхностных и торцевых нормальных воздействиях. Используются изгибная составляющая теории Кирхгофа-Лява; малоамплитудная антисимметричная коротковолновая высокочастотная составляющая; эллиптический погранслой в окрестности условного фронта поверхностных волн Рэлея; гиперболический антисимметричный погранслой в окрестности фронта волны сдвига. Полнота представления данного типа НДС указанными составляющими доказывается наличием областей согласования коротковолновой высокочастотной составляющей с изгибной составляющей, эллиптическим и гиперболическим погранслоями. Построены также асимптотические методы решения для основных составляющих НДС. Как и для предыдущих видов воздействий, проведён численный расчёт компонент НДС для сферической оболочки, подтверждающий эффективность аналитических алгоритмов решения краевых задач для общего случая оболочек вращения.

В заключении диссертации приведены основные результаты исследований.

## **Научная новизна**

Разработана оптимальная система асимптотически приближённых теорий, описывающих в совокупности нестационарные волны в оболочках вращения в разных областях фазовой плоскости, отличающихся изменяемостью нестационарного НДС по пространственным координатам и его динамичностью по времени.

## **Достоверность результатов работы**

Достоверность описания нестационарного НДС оболочек вращения системой предложенных теорий обеспечивается двумя главными факторами:

- корректность асимптотического интегрирования трёхмерных уравнений теории упругости в соответствии со значениями показателей изменяемости и динамичности для соответствующих областей фазовой плоскости;
- доказательство полноты представленных составляющих для каждого типа нестационарного НДС.

Кроме того, проводилось тестовое сопоставление с точными решениями базовых задач, полученными для цилиндрических и сферических оболочек с помощью интегральных преобразований и метода экспоненциальных представлений в пространстве изображений.

## **Практическая значимость работы**

Практическая значимость результатов состоит прежде всего в разработке замкнутой системы приближённых теорий, открывающей возможности малозатратного полуаналитического моделирования волновых процессов в оболочках произвольного профиля, которое полностью описывает нестационарное НДС при ударных воздействиях во всем диапазоне изменения их параметров. Такое полное описание недоступно существующим классическим теориям, в то время как широко используемые в инженерной практике численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) или конечных разностей, нередко сопряжены с большими вычислительными затратами и/или потерей численной устойчивости из-за большого градиента НДС в разных областях конструкции или на фронтах волнового поля, что

требует существенной модификации численных схем в этих зонах. Поэтому следует перед такими расчётами прорабатывать аналитические модели рассматриваемых процессов и разработанная теория хорошо подходит для этой цели.

Кроме того, наряду с рассмотренными в диссертации примерами, она может быть применена и в случае оболочек из других материалов, например, анизотропных или вязкоупругих, широко встречающихся в важных практических приложениях.

### **Апробация результатов работы**

Всего по материалам диссертации опубликовано 18 работ в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты исследования докладывались на конференциях и Всероссийских съездах по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Для проверки достоверности проводились сопоставления с точными решениями для канонических сферических оболочек, но нет сравнений с результатами прямого численного моделирования (например, с помощью МКЭ) или экспериментальными данными для оболочек более сложной формы. Такая верификация была бы полезна для подтверждения возможностей теории по моделированию волновых процессов в оболочках произвольного профиля, а также для оценки точности и практической значимости предложенных асимптотических решений, особенно в задачах с быстропеременными и ударными нагрузками, где точность моделей особенно критична.

Для иллюстрации новых возможностей разработанной теории хорошо бы также смотрелись демонстрационные численные примеры для тех диапазонов, в которых неприменимы асимптотические решения классических теорий оболочек.

2. Разработанные асимптотические методы решения краевых задач для различных типов погранслоёв (эллиптического, гиперболического, параболического) носят сложный аналитический характер и требуют высокой математической подготовки. Для их эффективного использования следует разработать алгоритмизированные методики или программные реализации, которые позволили бы инженерам-расчётчикам применять их без глубокого погружения в асимптотическую теорию.

3. В реальных тонкостенных конструкциях под ударными нагрузками могут возникать значительные деформации, пластические эффекты и геометрическая нелинейность. Полученные асимптотические решения, однако, базируются на линейной теории упругости, что сужает область их применения, не позволяя использовать при наличии таких нелинейных эффектов.

4. Хотя в работе и декларируется, что аналогичный подход может быть реализован и в более сложных случаях, в диссертации недостаточно раскрывается, как именно предложенные методы могут быть адаптированы к более общим геометриям (неосесимметричные оболочки, оболочки с переменной толщиной) или к неупругим материалам, что ограничивает универсальность результатов.

Эти замечания не умаляют научной значимости работы, а носят скорее рекомендательный характер. Они указывают на возможные направления её развития и углубления, а также на ограничения, которые следует учитывать при практическом применении результатов.

Текст автореферата диссертации корректно отражает содержание диссертационной работы, тема и содержание исследования соответствуют паспорту специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Кирилловой Ирины Васильевны «Асимптотическая теория нестационарных процессов в тонких упругих оболочках вращения» является законченным научным трудом, выполненным на высоком профессиональном уровне и удовлетворяет всем

требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемых к докторским диссертациям по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела, а ее автор **Кириллова Ирина Васильевна** заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

*Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

**Официальный оппонент**

Глушков Евгений Викторович

доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела),

профессор, главный научный сотрудник

Института математики, механики и информатики (<https://www.immi.kubsu.ru>)

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149, комната А508

тел.: +7 (861) 2199-501 \*315

e-mail: [evg@math.kubsu.ru](mailto:evg@math.kubsu.ru)

Подпись Е.В. Глушкова удостоверяю:

