

## УТВЕРЖДАЮ:

ВРИО директора ФГБУН  
«Институт прикладной механики  
Российской академии наук»  
(ИПРИМ РАН)

к.ф.-м.н. ЖАВОРОНОК С.И.



« 23 » сентября 2024 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию СКОПИНЦЕВА Павла Дмитриевича  
**«Нестационарная динамика анизотропных  
упругих цилиндрических оболочек»**,  
представленную к защите на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

### **Актуальность диссертационного исследования.**

Динамика тонкостенных элементов конструкций при нестационарных внешних воздействиях характеризуется рядом эффектов, затрудняющих решение инженерных задач стандартными программными средствами, основанными на методе конечных элементов, без предварительного качественного анализа процессов деформирования: динамическими краевыми эффектами и пограничными слоями, областями преобладания моментного напряжённого состояния, и т. п. Пренебрежение подобными предварительными оценками, положенными в основу моделирования переходных процессов на базе численных методов может приводить как к потере устойчивости численных решений, так и к заметному искажению их точности при необоснованном выборе параметров конечно-элементной сетки, алгоритма численного интегрирования уравнений движения, в том числе параметров схемной вязкости, и т. д. В силу сложности проблемы исследования переходных процессов в тонкостенных оболочках, указанные качественные оценки существуют только в некоторых классах задач; динамика тонкостенных конструкций, выполненных из неоднородных анизотропных материалов, при наличии дискретно расположенных опор для формирования достаточной теоретической базы для обоснования достоверности проведения инженерных расчётов изучена недостаточно. Следовательно, тематика диссертационного исследования, посвящённого разработке аналитических и численно-аналитических методов описания нестационарного напряжённо-деформированного состояния тонкостенных композиционных оболочек является **актуальной**.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

24.09.2024 г.

**Цель** диссертационного исследования заключается в построении метода аналитического решения задач нестационарной динамики композиционных замкнутых и незамкнутых цилиндрических оболочек с дискретно расположенными опорами на базе переходных функций.

**Научную новизну** диссертационной работы составляют следующие полученные автором результаты:

- 1) новые фундаментальные решения задач нестационарной динамики тонких неограниченных и свободно опёртых по торцам анизотропных цилиндрических оболочек, описываемых теорией Кирхгоффа-Лява;
- 2) новый метод решения задач нестационарной динамики панелей тонкостенных анизотропных цилиндрических оболочек с определёнными на контуре локальными кинематическими связями двух типов, соответствующих свободному опиранию либо скользящему защемлению контура на множестве произвольно расположенных точек, основанный на применении фундаментальных решений и компенсирующих нагрузок;
- 3) новый алгоритм анализа сходимости численного обращения преобразования Фурье при решении задач нестационарной динамики оболочек на основе метода переходных функций;
- 4) новые результаты параметрического исследования переходных процессов при нестационарных воздействиях на анизотропные цилиндрические оболочки.

**Достоверность** результатов диссертационного исследования обеспечивается строгостью постановки задачи нестационарной динамики оболочки, адекватном выборе апробированного метода решения задачи, модификация которого применительно к рассматриваемому классу задач выносится автором на защиту, а также критическим качественным и количественным анализом полученных результатов.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в построении аналитического метода, обеспечивающего достоверное описание переходных процессов в тонкостенных анизотропных цилиндрических оболочках и панелях оболочек с локальными произвольно расположенными опорами. Наличие данного метода обеспечивает инженера-расчётчика предварительными оценками нестационарного напряжённо-деформированного состояния, которые могут быть положены в основу непротиворечивого моделирования тонкостенных элементов конструкций на базе стандартных программных комплексов.

**Апробация** результатов работы проведена в достаточной мере на семинарах и конференциях:

- 1) XXVI-XXIX Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Россия, Кремёнки, 2020-2023 г.г.);
- 2) X Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (Россия, Москва, 2020 г.);

- 3) Научной конференции «Ломоносовские чтения» (Россия, Москва, 2020-2023 г.г.);
- 4) XXII Конференции «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Россия, Пермь, 2021 г.);
- 5) X–XII Международных научно-практических конференциях «Проблемы безопасности на транспорте» (Беларусь, Гомель, 2020-2022 г.г.).

**Публикация результатов диссертационного исследования.** Результаты, составляющие основу диссертационной работы и выносимые автором на защиту, опубликованы в 20 печатных работах, в том числе в 4 статьях в периодических изданиях, включённых в Перечень ВАК РФ и 2 журналах, включённых в международную систему цитирования Scopus. Как перечисленные публикации, так и автореферат в должной мере отражают содержание диссертации.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа объёмом 147 страниц состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка из 147 позиций и содержит 28 иллюстраций.

**Во введении** приведены основные сведения о структуре и содержании диссертационной работы, приведено краткое обоснование актуальности темы, сформулирована цель работы, поставлены задачи, необходимые для достижения заявленной цели, перечислены методы, необходимые для решения поставленных задач, кратко изложены важнейшие результаты, полученные автором, обоснована их достоверность, указана их новизна и практическая значимость, а также приведены сведения об апробации результатов и их публикации в открытых источниках.

**В первой главе** приведён обзор важнейших результатов, полученных к моменту, предшествующему диссертационному исследованию, и краткое обоснование новизны его результатов, приведены основные соотношения канонической теории Кирхгоффа-Лява, приведён список используемых обозначений, а также выполнена постановка начально-краевой задачи нестационарной динамики тонкостенной анизотропной оболочки на базе канонической теории. Приведён вывод уравнений движения оболочки в цилиндрической системе координат, введены безразмерные переменные, получены безразмерные уравнения движения относительно компонентов вектора перемещения точки срединной поверхности оболочки.

**Во второй главе** введено определение фундаментального решения нестационарной задачи динамики замкнутой цилиндрической оболочки неограниченной длины, выполнена соответствующая постановка начально-краевой задачи динамики оболочки, получены фундаментальные решения для цилиндрической оболочки неограниченной длины и цилиндрической оболочки конечной длины, свободно опертой по торцевым сечениям, изложен алгоритм оценки сходимости процесса численного определения оригинала фундаментального решения, приведены фундаментальные решения для оболочек с различными параметрами.

**В третьей главе** описан метод компенсирующих нагрузок для решения задачи нестационарной динамики панели цилиндрической



оболочки с локальными опорами и приведены решения задач динамики замкнутых цилиндрических оболочек бесконечной и ограниченной длины и панелей оболочек с локальными опорами, приведены результаты параметрического исследования полученных решений.

**В заключении** перечислены ключевые результаты диссертационного исследования, выносимые соискателем на защиту.

**Замечания по диссертационной работе.**

1. Структура диссертационной работы не вполне удовлетворительна. Так, в первую главу работы, помимо анализа современного состояния проблемы, включена не только постановка задачи, но и подробный вывод уравнений теории оболочек в цилиндрических координатах, включая развёрнутую запись ковариантных производных. Поскольку подобные выкладки не представляют какой-либо научной новизны (тем более, что уравнения теории оболочек приняты автором в соответствии с источником [27]), представляется необходимым приводить их в разделе «Приложения». Постановку задачи динамики тонкостенной оболочки следовало перенести в Главу 2, также как и описание метода компенсирующих нагрузок и его приложения в рассматриваемом классе задач, так как аналитическое описание переходных процессов в панели оболочки с локальными опорами на основе метода переходных функций является одним из ключевых результатов соискателя.
2. Обзорная часть работы сводится к перечислению полученных ранее результатов, в том числе вне области интересов диссертанта (нелинейные задачи, статические задачи и т. п.), и перегружена упоминаниями различных вариантов теорий оболочек без анализа их применимости в различных классах задач динамики тонкостенных конструкций, что при ограничении диссертационного исследования приложением канонической теории Кирхгоффа-Лява к нестационарным задачам динамики анизотропных оболочек выглядит излишним. В то же время ряд ключевых работ, например, в области асимптотического анализа решения задачи динамики тонкой оболочки, автор ограничивается только работой [57], более поздние исследования данной школы, результаты которых непосредственно связаны с темой диссертационного исследования, в список цитируемых источников не включены. Анализ достоинств и недостатков различных методов решения поставленной задачи практически отсутствует, преимущества метода переходных функций перед другими методами не доказываются, также как не содержится анализ применения метода компенсирующих нагрузок. Данная недоработка диссертанта несколько затрудняет оценку новизны полученных им результатов.
3. Автором вводятся определяющие соотношения теории оболочек в виде (1.3.52-53), соответствующие гипотезе  $\varepsilon_{33} = 0$ , но не  $\sigma_{33} = 0$ , что приводит к известному завышению оценки тангенциальной и изгибной жёсткостей. Включение в текст работы трёхмерных соотношений закона Гука (1.3.9-10) при этом не имеет смысла, так как физические константы

$c_{i3}$ ,  $i = 1, 2$ , также как и  $c_{36}$ , в рассмотренном варианте теории оболочек не используются, а трансверсальные сдвиговые жёсткости  $c_{44}$ ,  $c_{45} = c_{54}$ ,  $c_{55}$  в формулировку канонической теории оболочек, пренебрегающей деформацией поперечного сдвига, не входят.

4. Операторы  $K_{ij}$ , входящие в уравнения движения оболочки в безразмерных переменных (1.3.61-63), также как и следующие из них уравнения в пространстве изображений по Лапласу и Фурье (2.2.15) или уравнения (2.3.4-6) содержат комплексы  $(1 \pm f^2)$ , где в соответствии с (1.3.59)  $f = (2\sqrt{3})^{-1}h/R \ll 1$  в классе тонких оболочек (далее рассмотрены оболочки с  $h/R = 60 \dots 80$ , чему соответствует величина  $f^2 \approx 1.3 \dots 2.3 \cdot 10^{-5}$ , пренебрежимо малая по сравнению с единицей. Таким образом, удержание членов порядка  $f^2$  по сравнению с единицей загромождает уравнения и при этом не вносит никакого уточнения в решение. Более того,  $f^2 n^2 \sim 1$ , где  $n$  – номер гармоники, выполняется при  $n \sim 100$ , однако удержание 100 членов частичной суммы ряда по тригонометрическим функциям окружной координаты  $\alpha$  соответствует длине полуволны  $\pi R/n \sim \pi R f \sim h$ ; такой характер деформирования оболочки является явно трёхмерным и не описывается канонической теорией Кирхгоффа-Лява, поэтому удержание до 100 членов частичной суммы ряда по функциям  $e^{in\alpha}$  (п. п. 2.4 и 2.5 гл. 2) также не имеет смысла, так как сходимость приближенного представления фундаментального решения в данном случае не означает приближения решения трёхмерной задачи теории упругости тонкого тела решением задачи динамики оболочки, и, следовательно, удержание членов  $f^2 n^2$  в уравнениях движения также не является обоснованным.
5. Алгоритм оценки сходимости численного обращения преобразования Фурье (с. 63-64) изложен автором не вполне удовлетворительно, так как, очевидно, соотношение (2.2.44) соответствует оценке нормы разности двух приближений фундаментального решения в зависимости от числа  $R_{lj}$  членов частичной суммы ряда по функциям  $e^{in\alpha}$  окружной координаты  $\alpha$ , тогда как в (2.2.42) и (2.2.43) рассматриваются коэффициенты ряда; при этом во всех соотношениях (2.2.42-44) обозначения соответствуют сумме ряда. Кроме того, в (2.2.42) не указано явно, что на шаге 2 алгоритма вычисление производится как для приближения  $G_j$ , так и для последующего приближения  $G_{j+1}$  с расширенными границами области интегрирования  $J_{lj+1} = J_{lj} + \Delta J_l$ .
6. При введении в рассмотрение безразмерных компонентов тензора напряжения отнесение размерных величин к физическим постоянным не вполне целесообразно, так как не даёт никакой практически важной информации о прочности материала оболочки. Также нецелесообразно отнесение размерных величин физических компонентов вектора перемещения к характерному размеру  $L$  порядка длины или радиуса кривизны базисной поверхности оболочки; предпочтительно отнесение перемещения к толщине оболочки  $h$ , так как полученные безразмерные величины трансверсальных перемещений, близкие к единице,

свидетельствуют о исчерпании точности кинематически линейного варианта теории. Следует заметить, что в тексте работы не указано, какая именно величина понимается под характерным размером  $L$ .

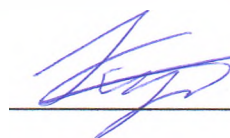
7. Текст диссертационной работы содержит терминологические неточности, например, вместо «равномерная норма» используется «непрерывная норма», вместо «частичная сумма ряда» – «конечная сумма», вводится термин «безразмерная секунда», и т. д.

Перечисленные недостатки, однако, не ставят под сомнение результаты, полученные соискателем, и не являются препятствием для положительной оценки диссертационной работы.

**Заключение.** Перечисленные выше замечания не снижают теоретической и практической значимости полученных соискателем результатов. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук п.п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней ВАК РФ, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения учёных степеней» (с изменениями и дополнениями). Автор диссертации, СКОПИНЦЕВ Павел Дмитриевич, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Диссертация заслушана и обсуждена на заседании семинара Отдела механики адаптивных и композиционных материалов и систем ИПРИМ РАН. Отзыв утверждён на заседании Учёного совета института прикладной механики Российской академии наук, протокол №06/24 от 3 сентября 2024 г.

Старший научный сотрудник  
ИПРИМ РАН к. ф.-м. н.



КУРБАТОВ  
Алексей Сергеевич

**Контактные данные организации:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук.

Адрес: 125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр. 1.

Телефон: +7 (495) 946-18-06

e-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)

Официальный сайт: <https://iam.ras.ru>

Учёный секретарь ИПРИМ РАН  
к. ф.-м. н.



КАРНЕТ  
Юлия Николаевна

*С отзывом ознакомлен*  
27.09.2024 *Скоп*