

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научно-исследовательской

ности ФГАОУ ВО «Новосибирский
государственный университет, НГУ»

физ.-мат. наук, профессор РАН

Дмитрий Владимирович

июня 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» на диссертационную работу Нгуен Мань Кьонг «Методика расчета статического и динамического деформирования осесимметричных оболочек вращения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертации. Ввиду неуклонного увеличения вычислительных мощностей, развитие моделей механики сплошной среды и соответствующих алгоритмов решения для получения более точных результатов компьютерного моделирования в комплексных прикладных исследованиях и инженерно-конструкторских работах является актуальной задачей. Диссертация Нгуен Мань Кьонг посвящена разработке новых дифференциальных уравнений осесимметричного деформирования и гидроупругих колебаний ортотропных оболочек вращения, а также методики решения соответствующей краевой задачи на основе современного численного метода.

Оболочки вращения, взаимодействующие с жидкостью, используются в качестве математической модели баков. В частности, актуально решение задачи обеспечения продольной устойчивости баков с жидкостью при высокоскоростном движении. Механический аналог жидкостного бака строится по результатам расчета частот и форм гидроупругих колебаний оболочки. Разработанная Нгуен Мань Кьонг методика позволяет проводить расчет осесимметричных колебаний как отдельных баков, так и связок из нескольких баков с произвольной геометрией меридиана, выполненных из ортотропного материала, подкрепленных шпангоутами с дополнительными массами,

распределенными по окружности.

Содержание диссертационной работы. Текст диссертации содержит введение, четыре главы, заключение и три приложения. Во введении обосновывается актуальность исследований, формулируются цели и ставятся задачи работы. Изложены научная новизна и практическая значимость, обозначены методы исследования и обоснована их достоверность. Представлены выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе автора, связанными с работой научными публикациями. Приведена информация об объеме и структуре диссертационной работы.

Автор диссертации использует для решения поставленных задач теоретические методы исследования: методы теоретической механики, механики сплошных сред, а также численные методы: метод конечных разностей и метод конечных элементов (МКЭ). Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается строгостью используемого математического аппарата, применением проверенных алгоритмов при моделировании, исследованиями сходимости решения при уменьшении размеров элементов конечно-элементной сетки и разностной схемы, а также сравнением результатов, полученных по принципиально разным алгоритмам. Результаты, полученные в работе, находятся в соответствии с существующими модельными и экспериментальными результатами, полученными другими исследователями.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней обсуждаются основные теории упругих оболочек, методы расчета колебаний баков с жидкостью и обзор литературы по применению радиальных базисных функций. Вторая глава посвящена выводу системы дифференциальных уравнений статического деформирования осесимметричных оболочек с учетом поперечного сдвига и больших продольных деформаций. Уравнения получены для разрешающих функций в глобальной системе координат и представляют собой систему шести нелинейных уравнений первого порядка. Представлены результаты расчета тестовых задач раздутия оболочек внутренним давлением, имеется хорошее соответствие с конечно-элементным пакетом ANSYS.

В третьей главе на основе принципа Даламбера из уравнений статики получены уравнения динамического деформирования оболочек вращения, выполненных из ортотропного материала. Сформулирована задача о малых колебаниях оболочки, взаимодействующей с идеальной несжимаемой жидкостью, описываемой потенциалом перемещений. В качестве методики решения краевой задачи предложена комбинация классического метода конечных разностей второго порядка и его современной

разновидности на основе сплайн-интерполяции радиальными базисными функциями для построения шаблонов уравнения Лапласа и граничных условий на произвольной сетке узлов. Получены безразмерные уравнения для стыковки нескольких оболочек при моделировании связки нескольких баков с жидкостью.

Четвертая глава диссертации посвящена решению тестовых задач о колебаниях. Показано хорошее соответствие результатов расчета частот собственных колебаний ортотропных оболочек по предложенной методике и методом конечных разностей в двух разных программах. Также рассмотрен набор задач о моделировании гидроупругих задач, результаты сравниваются с опубликованными данными и решениями в ANSYS. Получено удовлетворительное соответствие в рамках разных постановок и подходов к расчету задач о гидроупругих колебаниях. Показана сходимость рассчитываемых по предлагаемой методике частот в зависимости от степени дискретизации модели и двух степенях четной полигармонической радиальной базисной функции. Для верификации расчета частот колебаний связок баков, укрепленных шпангоутами, использовалась специальная программа на основе метода конечных и граничных элементов за авторством Левина В.Е. Получено хорошее соответствие для сухих баков и при малых заливках, но имеются выбросы в отдельных частотах до 10-15% при среднем отклонении в 5% в спектре из 10 низших тонов. Полученное различие объясняется принципиально разными методами решения и естественным ограничением метода граничных элементов (МГЭ), приводящем к плохо обусловленной плотной матрице при увеличении числа узлов. Матрицы обобщенной проблемы собственных значений по предложенной Нгуен Мань Кыонг методике являются разреженными, а результаты расчета имеют выраженную асимптоту при измельчении сетки.

В заключении работы сформулированы полученные автором основные результаты. Заключение диссертации содержит обобщенные научные результаты, выносимые на защиту, В целом диссертация написана ясным языком, хорошо структурирована, и ее оформление, включая рисунки, качественное.

Основные научные результаты и их новизна:

1. Для вывода системы дифференциальных уравнений, описывающих геометрически нелинейное напряженно-деформированное состояние бесконечно малого элемента оболочки, используются разрешающие функции в виде проекций векторов в глобальной системе координат, а также кинематические соотношения на основе вектора Эйлера, который в явном виде описывает поворот тройки ортов, связанных с точками срединной поверхности оболочки. Такой подход позволил

получить систему разрешающих уравнений, которая содержит производные только первого порядка и учитывает поперечный сдвиг по типу модели Тимошенко. Использование глобальных координат позволяет относительно просто проводить стыковку нескольких оболочек в единую модель, а также не имеет ограничений на начальную геометрическую форму меридиана. Полученная система совместно с краевыми условиями решается численно методом конечных разностей второго порядка точности (центральная разность), результаты расчета тестовых задач раздутия внутренним давлением оболочек вращения с простой и сложной геометрической формой меридиана сравниваются с результатами моделирования в пакете ANSYS несколькими типами оболочечных конечных элементов типа SHELL. Получено очень хорошее соответствие с ANSYS как для тонких оболочек с учетом эффекта утонения при больших деформациях, так и для толстых оболочек с учетом поперечного сдвига.

2. На основе полученных дифференциальных уравнений сформулирована краевая задача о собственных колебаниях ортотропной оболочки вращения, взаимодействующей с идеальной несжимаемой жидкостью. Жидкость описывается с помощью потенциала перемещений, который должен удовлетворять уравнению Лапласа внутри области и граничным условиям: равенство нулю потенциала (по сути давления) на свободной поверхности, равенство нормальных перемещений жидкости нулю по оси симметрии и перемещениям оболочки на смоченной части. Предложена и реализована методика решения краевой задачи о совместных колебаниях оболочки и жидкости с помощью современной разновидности метода конечных разностей на основе сплайн-интерполяции радиальными базисными функциями (RBF-FD). Аппроксимация дифференциального оператора в центральной точке каждого шаблона определяется значениями неизвестных функций в окрестности заданного размера единственным образом благодаря введению нормирования дополнительным полиномом первой степени. Шаблон может иметь произвольно варьируемое число узлов (точек коллокации), а сгущение их множества в интересующих местах происходит путем простого добавления новых узлов и не требует трудоемких алгоритмов замощения расчетной области простейшими непересекающимися фигурами. Матрица получаемой системы линейных алгебраических уравнений для определения узловых значений разрешающих функций имеет разреженную структуру и хорошую обусловленность, что позволяет проводить исследование сходимости результатов расчета при существенном росте числа разбиений расчетной области. Разработанная методика расчета внедрена в отечественный программный комплекс.

3. Проведен ряд тестовых расчетов задач, исходные данные которых

опубликованы в литературе, исследована сходимость получаемых частот гидроупругих колебаний по предлагаемой методике и в программах, реализующих МКЭ и МГЭ. Показан разброс расчетных данных, полученных при решении задач с разными постановками и разными численными методами, а также с приближенными аналитическими решениями. Приведены результаты расчета по предлагаемой методике и в специальной программе по МКЭ-МГЭ нескольких жидкостных баков сложной формы, состоящих из двух отсеков, выполненных из ортотропного материала и подкрепленных шпангоутами по окружности. Сопоставление частот, полученных разными методами при одинаковой постановке задачи о движении жидкости показывает работоспособность предлагаемой методики, корректность формирования исходных данных. Сделан вывод о необходимости разрабатывать новые методики расчета колебаний оболочек, чему посвящена данная диссертация.

Новизна работы заключается в том, что:

1) Получены новые дифференциальные уравнения осесимметричного статического и динамического деформирования ортотропных оболочек вращения на основе разрешающих функций в глобальной системе координат.

2) Разработана новая методика расчета осесимметричных колебаний ортотропных оболочек вращения с идеальной несжимаемой жидкостью методом конечных разностей, в котором для генерирования весовых коэффициентов аппроксимации уравнения Лапласа и граничных условий на произвольном трафарете (шаблоне) узловых точек используется сплайн-интерполяция на основе полигармонических радиальных базисных функций.

3) Получены новые расчетные данные — частоты гидроупругих осесимметричных колебаний оболочек вращения, которые могут быть использованы другими исследователями для анализа достоверности существующих и новых подходов к расчету.

Значимость основных результатов для науки и практики и рекомендации по их использованию. Практическая значимость работы выражается в возможности моделировать продольные гидроупругие колебания связки баков для жидкости с учетом подкреплений шпангоутами и дополнительными массами от агрегатов.

Теоретическую значимость представляет подход к построению кинематических соотношений и уравнений равновесия оболочек на основе представления разрешающих функций в глобальной системе координат с использованием вектора Эйлера, что позволяет учитывать произвольную начальную геометрию срединной поверхности и поперечный сдвиг без использования в уравнениях пространственных производных

второго порядка и ввода дополнительных разрешающих функций.

Основное содержание и результаты работы изложено в 3 печатных изданиях, 2 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, из которых 1 индексируется в Scopus, 1 – в сборниках трудов конференций.

Замечания по диссертационной работе:

1. Во второй главе диссертации приведены примеры расчета раздутия оболочек внутренним давлением, при этом утверждается, что нелинейность построенных зависимостей обусловлена не геометрической нелинейностью, а эффектом утонения стенки. Автору следовало бы наложить кривые соответствующих зависимостей с учетом утонения и без него, чтобы подтвердить свой тезис.

2. В физических соотношениях вводится логарифмическая мера продольных деформаций, что подразумевает большие деформации и, следовательно, нелинейность материала, однако в приведенных примерах используется только идеальная упругость.

3. Дифференциальные уравнения (3.40) для амплитуд разрешающих функций получены путем рассмотрения смежного к деформированному состоянию (3.35) и описывают малые колебания относительно него, однако во всех тестовых задачах о колебаниях оболочек, приведенных в диссертации, начальное состояние принято недеформированным.

4. В четвертой главе приведены результаты исследования сходимости рассчитываемых по предложенной методике частот, в том числе при варьировании степени четной полигармонической радиальной функции $m=1$ и $m=2$ (рис. 4.3 и 4.4), при этом для последнего значения область разброса вычисляемых частот при изменении дискретизации меньше, что наталкивает на предположение, что дальнейшее увеличение параметра m будет приводить к более гладкой асимптотике, однако никакой информации, подтверждающей или опровергающей это логичное предположение в тексте диссертации не имеется.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, а носят уточняющий и рекомендательных характер.

Выносимые автором на защиту положения являются новыми, полученными лично им или в соавторстве, их достоверность, обоснованность и оригинальность не вызывают сомнения. Представленные в диссертации результаты освещались на международной и всероссийской конференциях, обсуждались на научных семинарах высших учебных заведений и институтах Российской академии наук, а также достаточно полно отражены в опубликованных автором статьях.

Автореферат отражает содержание, а диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития численных методов расчета на прочность летательных аппаратов. Диссертация «Методика расчета статического и динамического деформирования осесимметричных оболочек вращения» соответствует требованиям п.п. 9, 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени кандидата наук, а ее автор Нгуен Мань Кыонг достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры механики твердого тела Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) 04.06.2024 протокол № 10. На заседании присутствовали: академик РАН Аннин Б.Д., член-корр. РАН д.ф.-м.н. Карпов Е.В., д.ф.-м.н. Ре Хлуднев А.М., к.ф.-м.н. Ларичкин А.Ю.

Ведущий заседания, профессор кафедры
ФГАОУ ВО «НГУ»,
академик РАН, д.ф.-м.н., профессор _____

И.о. заведующего кафедрой механики твердого тела
ФГАОУ ВО «НГУ»,
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор РАН _____

Карпов Евгений Викторович

Контактные данные организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ),
630090, Новосибирская область, г. Новос
Телефон/факс: +7 (383) 363-40-00, +7 (38
Адрес электронной почты: rector@nsu.ru

Официальный сайт: //www.nsu.ru

Получен в печать 10.06.2024
с отзывом ознакомлен 11.06.2024