

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор ИПРИМ РАН  
Д.Ф.-м.н., профессор.

Власов А. Н.

«27» ноября 2015 г.



## **ОТЗЫВ**

### **ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**на диссертационную работу**

**ВУ БА ЗУИ**

**«Разработка метода и исследование напряжённого состояния физически ортотропных цилиндрических оболочек при локализованных термосиловых нагрузках»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

#### **Общие сведения о диссертационной работе.**

На рассмотрение ведущей организации представлена диссертационная работа Ву Ба Зуи общим объемом 148 страниц, включающая 38 рисунков и 17 таблиц, структурно подразделенная на введение, четыре главы, заключение, библиографический список из 100 наименования, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.

#### **9. Актуальность темы диссертационной работы**

В современной инженерной практике основным инструментом расчетчика является комплекс прикладных программ на базе метода конечных элементов. Существующие комплексы обеспечивают быстрое получение количественных результатов для конструктивных элементов сложной конфигурации, в нелинейной постановке при больших деформациях, неупругом состоянии материала, при комплексных силовых, температурных и иных



нагрузках, обеспечивают построение процессов многокритериальной оптимизации и т. д. В то же время численные методы, включая наиболее совершенные, не предоставляют возможности качественного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции, при отсутствии которого процесс проектирования и поверочный расчет недостаточно эффективны, требуют применения сложных моделей «с запасом точности», что приводит к повышению реурсоемкости.

Качественный анализ обеспечивает понимание особенностей функционирования конструкции, обеспечивающее как эффективное проектирование, так и грамотное применение метода конечных элементов. В частном случае тонкостенных оболочек прямое применение численных методов осложняется характерной особенностью систем с вырожденной размерностью – наличием локальных областей с быстроизменяющимся напряженно-деформированным состоянием, для описания которого требуется либо локальное сгущение сетки вручную – что требует предварительного качественного анализа, либо сгущение сетки во всей расчетной области, которое приводит к неоправданному повышению размерности дискретной задачи. Численные методы разделения области расчета на подобласти основного и локального напряженного состояния, ориентированные на применение в составе программных комплексов, находятся в стадии разработки, а их совершенствование требует тех же аналитических оценок. Кроме того, численное решение задач механики тонкостенных систем сталкивается со специфическими вычислительными трудностями.

Для обеспечения качественного анализа тонкостенных механических систем необходимо развитие асимптотического подхода, уточнение границ применимости приближенных моделей в зависимости от параметров конструкции и внешнего воздействия и т. д. Несмотря на большое число работ в области теории анизотропных оболочек, разработка приближенных методов качественного анализа их напряженного состояния и методов проектировочного расчета тонкостенных элементов конструкций не завершена. В частности, метод синтеза элементарных состояний разработан только для оболочек положительной гауссовой кривизны; оценки областей применимости приближенных теорий оболочек получены только для частных случаев, не исчерпывающих потребностей инженерной практики; отсутствует система рекомендаций по применению проектировщиками простых расчетных формул на основе приближенных теорий оболочек.

*Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.*



## 2. Оценка содержания диссертационной работы, ее завершенность.

**Основными целями** диссертационной работы являлись:

- развитие методов асимптотического синтеза напряженного состояния применительно к ортотропным цилиндрическим и слабokonическим оболочкам, подверженным действию локальных нагрузок;
- развитие метода сращиваемых аналитических решений, т. е. объединения приближенных решений, полученных на базе различных уравнений, описывающих элементарные состояния – безмоментное, полубзмоментное, краевой эффект, тангенциальное и изгибное состояния, обоснование границ областей их применимости;
- обеспечение возможности применения к расчету напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек дифференциальных уравнений с частными производными не выше четвертого порядка, допускающих аналитическое решение.

Практическими целями диссертации являлись:

- приближенное аналитическое решение задач о деформировании ортотропных цилиндрических оболочек, являющихся моделями отсеков летательных аппаратов с частичным заполнением жидким топливом, при локальном силовом и тепловом воздействии на базе метода асимптотического синтеза;
- построение на основе полученных аналитических решений приближенных формул, пригодных для применения на этапе проектирования ортотропных оболочечных элементов конструкций летательных аппаратов, подверженных локальному силовому и тепловому воздействию;
- построение приближенных аналитических решений для ортотропной цилиндрической оболочки при действии локальной тангенциальной нагрузки и их применение к исследованию нагружения цилиндрической оболочки сосредоточенной силой через шпангоут;
- исследование влияния ортотропии материала на напряженно-деформированное состояние цилиндрической оболочки при локальном воздействии.

Для достижения сформулированной цели диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- построить на базе уравнения восьмого порядка общей теории ортотропных цилиндрических оболочек описание элементарных напряженных состояний;



- разработать алгоритм сращивания аналитических решений уравнений приближенных теорий ортотропных оболочек, описывающих элементарные состояния – безмоментное, полубезмоментное, краевой эффект, тангенциальное и изгибное состояния в окрестности сосредоточенной силы;
- построить решения задач о деформировании цилиндрических ортотропных оболочек на базе точного и приближенных решений, установить границы применимости приближенных уравнений теории оболочек, описывающих элементарные напряженные состояния, и обосновать применимость приближенных решений.

Описание постановки и решения описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Во **введении** кратко обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведен краткий обзор известных автору результатов, полученных ранее в области исследования, сформулированы цели работы, задачи, решаемые для достижения целей, обоснован выбор объекта и метода исследования, указана научная новизна полученных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость, представлены сведения о личном вкладе соискателя, апробации работы, публикациях автора, структуре и объеме диссертации, а также перечислены результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнена постановка задачи о деформировании ортотропной цилиндрической оболочки при силовом и тепловом внешнем воздействии. Приведены уравнения статики, кинематические и определяющие соотношения общей теории ортотропных цилиндрических оболочек. Получена система разрешающих уравнений относительно компонентов перемещения точки срединной поверхности оболочки. Введены разрешающие функции, позволяющие привести поставленную задачу теории оболочек к краевой задаче для дифференциального уравнения в частных производных восьмого порядка относительно скалярной неизвестной. Приведены линейные дифференциальные операторы восьмого порядка, выражения для компонентов вектора перемещения и обобщенных сил, действующих в оболочке в соответствии с моделью Кирхгофа, через разрешающие функции.

Приведены критерии упрощения уравнений общей теории оболочек, описана процедура их приведения к уравнениям Доннелла-Власова. Проведен асимптотический анализ уравнений Доннелла-Власова и показано, что при большой изменчивости решения уравнение приводится к паре бигармонических операторов, описывающих тангенциальное состояние при продольной и изгибное состояние при нормальной нагрузке. Приведены



уравнения полубезмоментной теории оболочек, получаемые на основе критерия В.В.Новожилова сравнения абсолютных величин вторых производных. Получено уравнение краевого эффекта, записанное относительно нормального перемещения точки срединной поверхности. Описан подход к декомпозиции напряженного состояния цилиндрической оболочки с использованием асимптотических оценок погрешности уравнений теории оболочек. Сформулирована задача асимптотического синтеза элементарных напряженных состояний – основного, краевого эффекта, быстроизменяющегося состояния, тангенциального и изгибного состояний, описываемых дифференциальными уравнениями четвертого порядка, и поиска границ применимости каждой из приближенных теорий. Сформулирован принцип наименьшей асимптотической погрешности приближенного решения, описаны два метода асимптотического синтеза, предложен метод сращивания аналитических решений на базе принципа наименьшей погрешности.

**Во второй главе** построены решения краевых задач для ортотропных цилиндрических оболочек, нагруженных неравномерным внутренним давлением, соответствующим частичному заполнению жидкостью. Получено обобщение известного решения для шарнирно опертой по торцам оболочки на случай ортотропного материала.

Рассмотрены частные случаи кусочно-постоянной вдоль образующей и кусочно-косинусоидальной вдоль контура нагрузки и получены аналитические решения на базе общей теории оболочек и с использованием приближенных решений, описывающих элементарные напряженные состояния. На основе анализа результатов, полученных на основе точных и приближенных уравнений теории оболочек, обосновано применение метода сращиваемых аналитических решений к данному классу задач.

Рассмотрено деформирование цилиндрической оболочки с произвольным закреплением торцов при действии гидростатического давления на основе уравнений общей теории ортотропных оболочек и уравнений, описывающих элементарные напряженные состояния, для случая постоянной вдоль образующей и кусочно-косинусоидальной вдоль контура нагрузки. На основе сращиваемых приближенных аналитических решений, описывающих элементарные напряженные состояния оболочки – основное и краевой эффект, изучено напряженное состояние в окрестности жестко защемленного края оболочки. Обосновано применение метода сращиваемых аналитических решений к данному классу задач.



**В третьей главе** рассмотрено решение краевых задач для цилиндрических ортотропных оболочек при действии локализованных продольных нагрузок. В частности, на основе уравнений общей теории ортотропных оболочек и уравнений, упрощенных в соответствии с подходом Власова-Доннелла изучено деформирование оболочек конечной длины с шарнирным закреплением краев при действии локальной тангенциальной нагрузки. Введены в рассмотрение элементарные напряженные состояния оболочки для данного случая – основное и тангенциальное. Проведен анализ решений, получаемых на основе общих уравнений и уравнений с упрощающими допущениями для напряженных состояний оболочки, характеризующихся различной изменчивостью.

Рассмотрена модель бесконечно длинной оболочки, подверженной действию локальных тангенциальных нагрузок, и проведена декомпозиция напряженного состояния на элементарные – основное состояние, описываемое уравнениями, аналогичными полубезмоментной теории, и локальное тангенциальное состояние, описываемое уравнениями, аналогичными обобщенному плоскому напряженному состоянию пластины. Рассмотрена задача о деформировании оболочки кусочной нагрузкой на контуре. Решена краевая задача для полубесконечной оболочки со свободным краем при действии продольной нагрузки, локализованной на части контура. Рассмотрено применение полученного решения к исследованию практически важного случая передачи продольной нагрузки на цилиндрическую оболочку через шпангоут.

**В четвертой главе** методы решения задач, предложенные автором, распространены на краевые задачи для термоупругих ортотропных оболочек при температурных полях различной локализации. Рассмотрена бесконечно длинная цилиндрическая оболочка при воздействии постоянного по толщине поля температуры, локализованного в некоторой конечной области срединной поверхности, и бесконечно длинная цилиндрическая оболочка при действии поля температуры, линейно изменяющейся по толщине, и также локализованного в некоторой ограниченной области.

На основе общей теории оболочек получено решение для цилиндрической оболочки конечной длины с шарнирно закрепленными краями при действии постоянного по длине и толщине и кусочно-постоянного вдоль контура температурного поля. Рассмотрено упрощение решения данной задачи с использованием приближенных теорий оболочек: теории Власова - Доннелла, полубезмоментной теории и уравнений, описывающих состояние типа краевого эффекта. Получено решение задачи для нагружения оболочки температурным



полем, неоднородным по толщине. Изучено влияние краевых условий и физических констант материала на напряженно-деформированное состояние оболочек при локализованных температурных полях.

**В заключении** сформулированы основные выводы, сделанные автором на базе полученных результатов работы.

### **3. Степень достоверности результатов и выводов.**

*Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы* обеспечивается:

- применением апробированных методов асимптотического анализа в теории оболочек;
- оценкой границ применимости предлагаемых автором приближенных решений, сопоставлением результатов, полученных на базе метода сращиваемых аналитических решений, с решениями на основе точных уравнений теории оболочек Кирхгофа;
- сопоставлений ряда решений с известными экспериментальными данными.

Обоснованность положений и выводов диссертационной работы подтверждается опубликованием ее результатов в ведущих рецензируемых периодических изданиях. Основные положения диссертации опубликованы в 7 работах, в том числе 5 – в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

### **4. Научная новизна основных результатов диссертации.**

По результатам рассмотрения содержания диссертации по главам представляется возможным выделить следующие новые, полученные лично автором научные результаты, выносимые им на защиту:

- метод сращиваемых аналитических решений дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка, описывающих элементарные напряженные состояния оболочек ортотропных цилиндрических и слабokonических оболочек – основное состояние и краевой эффект;
- метод расчета напряженно-деформированного состояния ортотропных цилиндрических оболочек при силовых и температурных внешних полях, имеющих существенно меньшую изменчивость вдоль образующей, чем вдоль контура;



- теория элементарных напряженных состояний оболочки – основного состояния, состояния с высокой изменяемостью и тангенциального напряженного состояния, построенная на основе анализа дифференциального уравнения восьмого порядка общей теории ортотропных цилиндрических оболочек.

### **5. Научная и практическая значимость результатов диссертации.**

Научно-практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- получено обобщение решения задачи В. З. Власова о напряженном состоянии цилиндрических оболочек, являющихся моделями отсеков летательных аппаратов, частично заполненных жидкостью, на случай ортотропного материала при действии несимметрично распределенного давления и температурного поля, а также при произвольных краевых условиях, соответствующих различным способам закрепления;
- построены алгоритмы аналитического приближенного расчета напряженно-деформированного состояния ортотропных оболочек при действии локальных силовых и температурных нагрузок, а для некоторых частных случаев – и расчетных формул.
- построены решения для бесконечно длинной, полубесконечной и конечной цилиндрических оболочек со свободным краем при действии локальной продольной нагрузки, пригодные для описания нагружения оболочки через шпангоут продольной сосредоточенной силой;
- на основе полученных аналитических решений проведен анализ зависимости напряженно-деформированного состояния цилиндрических ортотропных оболочек от физических констант материала (модулей упругости и коэффициентов линейного расширения), условий силового и теплового нагружения, краевых условий.

### **6. Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Автором обеспечена возможность приближенного аналитического расчета напряженного состояния цилиндрических и слабokonических отсеков летательных аппаратов, частично заполненных жидкостью, нагруженных локальными тангенциальными нагрузками в направлении оси и тепловыми полями. Для ряда случаев получены достаточно простые формулы, применение которых представляется целесообразным на этапе проектировочных расчетов.



## **7. Оценка стиля диссертации и автореферата.**

Стиль изложения теоретического материала, использование математического аппарата и терминологии соответствуют требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Механика деформированного твердого тела».

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

## **8. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации.**

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Обзор результатов в области исследования, полученных на момент подготовки диссертационной работы, является неоправданно скудным. Ссылка на два цитируемых автором обзора, опубликованных в 1975 и 1988 годах, т. е. более 20 лет назад, ни в коей мере не «...освобождает от перечисления других работ» (с. 6), тем более что в соответствии с требованиями к диссертационным работам обзорная глава не может сводиться к простому перечислению, но обязана содержать критический анализ современного автору состояния проблемы и обоснование на его основе актуальности, значимости и, главное, новизны полученных автором результатов. Так, например, на с. 7 работы по ортотропным и анизотропным оболочкам перечислены вообще без какого-либо анализа. На той же странице присутствует фраза «...работы диссертанта ... в которых, вероятно, впервые дан систематический анализ влияния...»; в диссертационной работе применение термина «вероятно» к элементу новизны, составляющему ее основу, представляется недопустимым. В то же время в рассмотренной диссертации обзор литературы содержит крайне мало современных источников; более 30% ссылок в библиографическом списке сделаны на работы научного руководителя диссертанта. Данный недостаток затрудняет оценку новизны полученных в диссертации результатов, выносимых автором на защиту. Следует отметить и то, что обзор фрагментирован и разнесен по главам работы (например, в главе 1 приводится сравнение подходов к упрощению уравнений общей теории оболочек), что не вполне соответствует требованиям к оформлению диссертационных работ.
2. Ряд задач, приведенных в диссертации, решен автором при неудачном выборе сочетания геометрических параметров оболочки, физических постоянных материала и действующих нагрузок. Так, например, решение, приведенное на с. 47-52, по величинам максимального нормального



перемещения значительно выходит за рамки применимости линейной теории оболочек (см. рис. 2.3, табл. 2.1). Аналогичное замечание следует сделать и по задаче, решение которой описано на с. 61 (см. рис. 2.12(a)). По крайней мере, упомянутые результаты не могут трактоваться как примеры решения практических задач.

3. В тексте работы имеются опечатки, в ряде случаев искажающие смысл написанного, в том числе неточности в формулах, например, обозначение производных в (2.13) и на с. 62.

Указанные недостатки снижают качество диссертационной работы, однако в целом не препятствуют ее положительной оценке.

С учетом перечисленного выше следует заключить, что *диссертационная работа представляет собой завершенное исследование, выполненное на высоком научном и методическом уровне.*

#### **4. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.**

*Представленная к защите диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой получено решение задачи построения метода приближенного аналитического решения задач теории ортотропных композиционных цилиндрических оболочек при локализованных термосиловых воздействиях на базе метода сращиваемых аналитических решений. Автором достигнута и обоснована возможность постановки для анализа напряженно-деформированного состояния ортотропной цилиндрической оболочки при неосесимметричном локальном нагружении краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка вместо краевой задачи для уравнения восьмого порядка, соответствующей общей теории оболочек. Обоснованы границы применимости решений на базе уравнений, описывающих элементарные напряженно-деформированные состояния: основное, описываемое уравнениями полубезмоментной теории; краевой эффект; тангенциальное и изгибное напряженное состояния в окрестности локализованного силового и теплового воздействия, описываемые уравнениями обобщенного плоского напряженного состояния и изгибного деформирования плоской пластины, а также области необходимого применения уравнений, описывающих быстроизменяющееся состояние. Разработан метод решения задач о напряженно-деформированном состоянии цилиндрических отсеков летательных аппаратов, частично заполненных жидкостью,*



подверженных действию локальных тангенциальных нагрузок, а также локализованных тепловых полей. Для ряда задач получены приближенные формулы, допускающие применение в инженерной практике на этапе проектировочного расчета.

Полученные автором результаты базируются на апробированном теоретическом фундаменте, обоснованы достаточным количеством модельных задач, решения которых, полученные в предложенной автором приближенной постановке, коррелируют с аналитическими решениями в точной постановке общей теории цилиндрических оболочек Доннелла-Власова, а в ряде задач и с существующими экспериментальными данными.

Язык изложения материала и терминология в целом соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам.

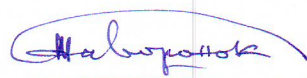
Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, являются новыми, обладают как теоретической, так и практической значимостью, опубликованы в достаточном количестве в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, обсуждены на научных конференциях, симпозиумах и семинарах с участием ведущих специалистов в области диссертационного исследования.

Область исследования и основные результаты диссертационной работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

*В целом, работу следует оценить положительно.*

Диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Ву Ба Зуи, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Старший научный сотрудник отдела  
механики адаптивных и композиционных  
материалов и систем  
кандидат физико-математических наук



Жаворонок С. И.

125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д. 7  
Телефон: +7 (495) 946-18-06  
E-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)