

## **Отзыв официального оппонента**

**Попова Александра Леонидовича**

**на диссертационную работу Пак Сонги**

«Статическая и динамическая устойчивость тонкостенных конструкций, содержащих жидкость», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность работы** обусловлена широким применением в современных технических устройствах и сооружениях осесимметричных тонкостенных конструктивных блоков и элементов, контактирующих с жидкостью. Такие конструктивные элементы могут в рабочем состоянии подвергаться значительным статическим и динамическим воздействиям. В первом случае возможна потеря статической устойчивости конструкции, во втором, - развитие нежелательных динамических явлений, например, - значительных амплитуд неосесимметричных вибраций, обусловленных параметрическим возбуждением. В работе предложены эффективные методики исследования указанных проблем применительно к осесимметричным конструкциям, находящимся под действием осесимметричных нагрузок.

**Научная новизна** диссертационной работы. Для исследования статической устойчивости описанного класса конструкций предложен эффективный метод, основанный на пространственном Фурье-анализе спектра статически нагруженной конструкции. Предложенный в работе, метод численного интегрирования нелинейных модальных уравнений, включающих как коэффициенты осесимметричных тонов конструкции, так и неосесимметричных тонов, показал высокую точность при построении областей параметрического возбуждения неосесимметричных колебаний.

**Достоверность полученных результатов** основана на корректности использованных механико-математических моделей и строгости математических подходов к их исследованию. Приведены сравнения с известными аналитическими и численными решениями для конструкций, содержащих жидкость, а также, - с экспериментальными данными.

### **Практическая значимость.**

1. Разработанная автором методика, реализованная в табличном процессоре Excel, показала высокую эффективность при многофакторном анализе статической устойчивости в одномерном, двумерном и трехмерном пространствах варьируемых параметров. Созданные алгоритмы и программы расчета динамических характеристик осесимметричных тонкостенных упругих кон-

струкций, содержащих объемы идеальной несжимаемой жидкости, с использованием метода конечных элементов, реализованные на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA), позволяют проводить исследования на персональных компьютерах без использования дорогостоящих специализированных программно-аппаратных комплексов.

2. С использованием численного интегрирования построены границы областей параметрических резонансов не только основного - 1-го порядка, но и резонансов более высоких порядков, уточнены, полученные ранее, приближенные результаты, на которые ориентируются в практических расчётах устойчивости ответственных элементов конструкций.

**Основные результаты** диссертационной работы опубликованы в 9 работах. В том числе две работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, и две входят в перечень Scopus.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 144 страницы.

**Во введении** приводится характеристика исследований, связанных с подготовкой диссертационной работы, описываются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, приводятся данные о структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе** приведен обзор литературных источников по состоянию исследований в области устойчивости тонкостенных конструкций, содержащих жидкость. Рассмотрены работы по вопросам нелинейной теории упругости, а также работы, посвященные экспериментальным и численным исследованиям динамики оболочек с жидкостью.

**Во второй главе** сформулированы основные уравнения, описывающие совместные колебания упругого тела и находящегося в контакте с ним ограниченного объема жидкости. Жидкость при этом считается идеальной и несжимаемой, а вся система находится под действием однородного гравитационного поля. Направление вектора гравитации определяет положение свободной поверхности жидкости в состоянии покоя. Колебания полагаются малыми, так что уравнения колебаний сводятся к линейным. В системе учитываются также гравитационная энергия колебаний свободной поверхности жидкости и, связанная с ней, энергия контактного взаимодействия жидкости со смоченной поверхностью упругого тела.

Рассмотрена схема конечно-элементного моделирования колебаний описанной системы с учетом влияния начального статического напряженно-

деформированного состояния применительно к осесимметричным конструкциям. Подробно описана программа расчета динамических характеристик осесимметричных тонкостенных конструкций, взаимодействующих с ограниченными объемами жидкостей, реализованная в табличном процессоре Excel.

**В третьей главе** приводится методика исследования статической устойчивости осесимметричных тонкостенных конструкций, контактирующих с объемами несжимаемой жидкости, при действии гравитационного поля и осесимметричных силовых факторов. Описана методика исследования устойчивости осесимметричной тонкостенной конструкции с жидкостью, основанная на пространственном Фурье-анализе спектра нагруженной конструкции. Представлены примеры исследования статической устойчивости осесимметричных конструкций, взаимодействующих с ограниченными объемами жидкостей. Здесь следует отметить, что благодаря дополнительной аналитической подготовке исходных уравнений и ожидаемых решений задач, автору удалось перейти в численном решении от пространственного разбиения конструкции и жидкости объёмными элементами к решению в осевом сечении, которое на порядок снизило ресурсоёмкость численных решений, обеспечив их реализацию на обычном персональном компьютере в течении несколько секунд, в то время как при использовании стандартных подходов к решению таких задач на основе объёмных элементов в Ansys workbench или Abaqus решение этих задач потребовало бы часов, а то и суток машинного времени, причём, не факт, что могло быть реализовано на персональном компьютере.

**В четвёртой главе** приводится методика исследования динамической устойчивости гармонических колебаний осесимметричных тонкостенных конструкций, контактирующих с жидкостью, возбуждаемых продольным периодическим воздействием. Выведены уравнения в нормальных координатах, описывающие нелинейные колебания осесимметричных тонкостенных конструкций с жидкостью.

Методом гармонического баланса исследована динамическая устойчивость осесимметричных колебаний тонкостенного цилиндра с плоским дном и динамическая устойчивость осесимметричных колебаний тонкостенного цилиндра с полусферическим дном по отношению к низшему тону с четырьмя волнами по окружности в зоне основного параметрического резонанса.

Методом численного интегрирования нелинейных модальных уравнений выполнено уточнение границы основного параметрического резонанса для цилиндра с полусферическим дном, а также построены пики границ областей параметрических резонансов 2-го, 3-го и 4-го порядков.

**В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.**

**Замечания по диссертационной работе:**

1. В своей работе Пак Сонги учла многие особенности задач статической и динамической устойчивости оболочек, контактирующих с жидкостью, оставаясь при этом в рамках рассмотрения жидкости как несжимаемой. Не ясно, что помешало ей использовать более общую модель сжимаемой жидкости, широко применяемую при описании колебаний жидкости, совместных с колебаниями тонкостенной конструкции.

2. В одном из примеров исследования статической устойчивости осесимметричных конструкций, взаимодействующих с ограниченными объемами жидкостей, приведенном на с. 79-85 диссертации, для конструкции, состоящей из двух соосных оболочек, полость между которыми заполнена жидкостью, автор, с целью наглядного показа снижения низших собственных частот осесимметричных колебаний, вычисленных при различных значениях давления на внешнюю и внутреннюю стенки конструкции, допустила чрезмерное увеличение давлений, которых, по-видимому, не выдержала бы данная конструкция в статике.

3. Для оценки качественных параметров программы расчета собственных частот и форм колебаний осесимметричных тонкостенных конструкций с жидкостью следовало бы привести результаты тестирования, показывающего сходимость получаемых значений собственных частот к точным значениям при увеличении числа степеней свободы для нескольких вариантов конструкции.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Пак Сонги, в которой предложен и реализован единый теоретический подход к рассмотрению задач статической и динамической устойчивости не только гладких, но и подкреплённых оболочек, контактирующих с жидкостью, разработан и программно воплощён оригинальный алгоритм решения таких задач в общедоступном табличном процессоре Excel, выполнена отработка и верификация подхода на известных решениях подобных задач. Автор диссертация показала себя исследователем, владеющим как аналитическими методами решения поставленного круга задач, так и численными методами и их программной реализацией.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает основное содержание диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Пак Сонги «Статическая и динамическая устойчивость тонкостенных конструкций, содержащих жидкость»

представляет собой законченное научное исследование, которое по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Считаю, что автор диссертационной работы - Пак Сонги заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

**Официальный оппонент**

**Попов Александр Леонидович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
механики прочности и разрушения материалов и конструкций  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского  
Российской Академии Наук (ИПМех РАН)»



Адрес места работы:

119256, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1  
popov@ipmnet.ru, +7 (915) 434-67-82

Подпись Попова Александра Леонидовича удостоверяю


Учёный секретарь ИПМех РАН

кандидат физико-математических наук



Котов М.А.  
(Фамилия И.О.)

04.12.2023

С отзывом ознакомлена  
 08.12.2023