

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертацию Михайловой Елены Юрьевны «Удар сферической оболочки по упругому полупространству», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

### **Актуальность темы**

В аэрокосмической отрасли актуальными являются проблемы обеспечения минимума массы конструкции при необходимом запасе прочности. Это достигается широким использованием оболочечных элементов в конструкциях обшивок летательных аппаратов. При их эксплуатации и взаимодействии с другими объектами возникают задачи механики контактного взаимодействия деформируемых тел. При этом задачи взаимодействия относятся к нестационарным задачам динамики оболочек, взаимодействующих с деформируемой упругой средой, которая влияет на напряженно-деформированное состояние (НДС) движущейся оболочки. Прогнозирование несущей способности оболочек при их ударе о деформируемую среду, при жесткой посадке летательного аппарата, проникновении в грунт, жидкость и при взаимодействии с твердыми телами являются актуальными еще на этапе проектирования конструкций. Об актуальности данной проблемы свидетельствуют и многочисленные публикации по представленной тематике, в чем можно убедиться из представленного обзора литературы в диссертации. Развитие постановки задачи об ударе упругих тел по упругому полупространству и ее решение сдерживалось отсутствием быстродействующих вычислительных машин, математических пакетов и программных комплексов. К настоящему времени эти трудности преодолеваются и развитие методов решения сложных задач механики контактного взаимодействия твердых тел продолжается. Представленная работа является актуальной в этой области и является очередным шагом в преодолении этих трудностей.

### **Оценка новизны и достоверности полученных результатов**

В настоящее время наименее изученными являются нестационарные контактные задачи с подвижной границей области взаимодействия. Прежде всего, это связано с тем, что построение решений значительно усложняется смешанным и нелинейным характером граничных условий, необходимостью учета начальных условий и неопределенности границы области контакта, которая изменяется в процессе взаимодействия. Поэтому представленная постановка задачи, развитие аналитических и численных методов ее решения являются новыми. Впервые приведены совместные уравнения движения сферической оболочки типа Тимошенко и уравнения движения упругого полупространства, найдена функция влияния



упругой оболочки. Построена система разрешающих уравнений, включающая в себя уравнения движения оболочки, в правой части которых имеется интегральное представление для контактного давления. Для построения решения системы уравнений используется метод Фурье разделения переменных, с помощью которого, система разрешающих уравнений сводится к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов рядов, зависящих от времени. Приведен численно-аналитический алгоритм решения этой системы. Также предложен более общий подход к решению, пригодный для произвольного временного интервала, основанный на сведении задачи к системе интегральных уравнений с учетом дополнительного соотношения для определения положения границы области контакта.

Данные методы реализованы в разработанных авторских программах «Расчет нестационарного НДС сферического обтекателя спускаемого космического аппарата при ударе о грунт» и «Расчет сверхзвукового этапа контактного взаимодействия обтекателя летательного аппарата сферической формы при ударе о скальный грунт».

К новым научным результатам диссертационной работы Михайловой Е.Ю. можно отнести следующие:

- Дана постановка и получено решение новой осесимметричной нестационарной контактной задачи с подвижными границами о вертикальном ударе тонкой сферической оболочки по упругому полупространству.
- Построена и исследована функция влияния для сферической оболочки с использованием аппарата разложения в ряды Фурье по системе собственных функций и интегрального преобразования Лапласа по времени.
- Разработана численно-аналитическая методика решения задачи на произвольном временном интервале, основанная на методе механических квадратур, с помощью которой получено решение системы разрешающих уравнений, содержащей двумерное интегральное уравнение типа Вольтера с ядрами в виде функций влияния для взаимодействующих тел, интегральное уравнение движения оболочки как абсолютно твердого тела и определяющее соотношение для нахождения границы области контакта.
- Представлены результаты исследования процесса нестационарного контактного взаимодействия при различных параметрах материала оболочки и полупространства, даны рекомендации для их выбора с точки зрения оптимизации НДС.

Достоверность научных положений и полученных результатов обеспечивается:

- строгим использованием концепций классической теории деформирования оболочек вращения, теории упругости и математического аппарата.

-Проверкой разработанного алгоритма и программы расчета на модельных и тестовых задачах.

-Сопоставлением и совпадением полученных численных результатов с численными данными, полученными другими авторами.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

По результатам работы созданы и зарегистрированы программные комплексы для построения решений поставленных задач. Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении работ по проекту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках реализации мероприятия № 2.2, соглашение № 14.586.21.0019.

### **Оценка содержания и оформления диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 154 наименований. Работа включает в себя 125 страниц машинописного текста, содержащие 35 рисунков.

Во введении обсуждается актуальность работы, сформулирована цель диссертации, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приводится обзор работ, в которых исследуются нестационарные задачи об ударе тонких деформируемых оболочек по деформируемому пространству, приводятся уравнения движения упругого полупространства и сферической оболочки типа Тимошенко.

Во второй главе исследуется сверхзвуковой этап ударного взаимодействия сферической оболочки и упругого полупространства. Здесь скорость границы области контакта превышает скорость волн растяжения-сжатия в упругой среде, возмущения не выходят за пределы области взаимодействия. Приведен численно-аналитический алгоритм решения задачи.

В третьей главе рассматривается контактное взаимодействие оболочки и упругого полупространства на произвольном временном интервале. Система разрешающих уравнений включает в себя уравнение движения оболочки как абсолютно твердого тела; соотношения



связывающие радиус границы области контакта с глубиной погружения ударника и основное уравнение, вытекающее из граничного условия. Для решения задачи построен и реализован на ЭВМ численно-аналитический алгоритм, основанный на методе механических квадратур. Приводятся примеры расчетов.

Диссертация качественно оформлена, написана хорошим и понятным для читателя языком, ее автор Е.Ю. Михайлова продемонстрировала хорошее знание литературы по рассматриваемой тематике. Е.Ю. Михайловой опубликовано 19 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Автореферат полно и точно отражает содержание и результаты диссертации.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Во введении было бы целесообразно привести определение изучаемого объекта - что понимается под функцией влияния упругого полупространства и функцией влияния оболочки.

2. При анализе рассматриваемых задач и определении места решаемой задачи следовало бы список цитируемой литературы начать с основополагающих работ: (9. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами, 1995; 56. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Нестационарная аэрогидроупругость тел сферической формы, 1990; 109. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью. Удар и погружение, 1976.)

3. Основным достоинством представленной работы является создание программных комплексов решения поставленных задач. Достоверность полученных по программам результатов проводится путем сравнения с других авторов. В работе нет сравнения времени счета по этим программам.

4. Все расчеты проводились в предположении упругих деформаций при больших перемещениях (нелинейная задача). Было бы целесообразно привести значения возникающих напряжений и сравнить их с пределом пропорциональности рассматриваемых материалов.

5. На графиках зависимости контактного давления от времени взаимодействия на рассматриваемом диапазоне времени наблюдается малое изменение рассчитанных величин  $p$  от времени. Видимо это может быть охарактеризовано как стационарный процесс и это явление сократит время счета и поможет упростить рассматриваемую модель взаимодействия оболочки с полупространством.

## Заключение

Диссертационная работа Е.Ю. Михайловой является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой поставлена и решена важная теоретическая и прикладная научно-техническая проблема, связанная с исследованием НДС оболочечных элементов, используемых в конструкциях летательных аппаратов. Диссертация отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Михайлова Елена Юрьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

К.т.н.,  
профессор кафедры Динамики и прочности машин  
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет  
«МЭИ»

Адрес: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14.

Тел.: 8(495) 362-77-00

e-mail: [khromatovvy@mpei.ru](mailto:khromatovvy@mpei.ru)

Хроматов  
Василий Ефимович

22.04.2016

Подпись профессора кафедры ДИМ  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
В.Е. Хроматова удостоверяю  
Заместитель начальника управления  
Управление по работе с персоналом



Е.Ю. Баранова