

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор ИПРИМ РАН

д. т. н., профессор



А. Н. Власов

2016 г.

## **ОТЗЫВ**

### **ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**на диссертационную работу**

**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 твёрдого тела»

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

На рассмотрение ведущей организации представлена диссертационная работа Михайловой Елены Юрьевны объемом 125 страниц, включающая 35 рисунков, структурно подразделенная на введение, три главы, заключение, список литературы из 154 наименований, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

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

#### **1. Актуальность темы диссертационной работы**

Аналитическое решение задач о нестационарном контактном взаимодействии оболочек с деформируемыми препятствиями является весьма сложной проблемой, связанной с преодолением известных математических трудностей. Численное решение задач данного класса,

например, методом конечных элементов вследствие особенностей динамического поведения тонкой оболочки при локальном ударном нагружении также сопряжено с трудностями вычислительного характера, так что прямое применение конечно-элементного подхода и стандартизованных программных комплексов должно опираться на фундаментальные качественные результаты, полученные аналитически. Одним из перспективных методов аналитического описания взаимодействия оболочки с деформируемым препятствием является метод поверхностных переходных функций, позволяющий избежать одновременного решения задачи для оболочки и упругой среды и перейти к задаче о движении оболочки с интегральным оператором, описывающим контактное давление на поверхность оболочки со стороны сопротивляющегося внедрению упругого полупространства.

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

**Основными целями** диссертационной работы являлись:

- выбор формулировки нестационарной осесимметричной задачи о соударении сферической оболочки типа Тимошенко с упругим полупространством и разработка метода аналитического решения задачи на сверхзвуковом этапе взаимодействия;
- разработка метода решения задачи о произвольном этапе контактного взаимодействия оболочки с упругим полупространством;
- построение функции влияния для сферической оболочки;
- параметрический анализ полученных результатов.

Для достижения сформулированных целей диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выбор уравнения первого приближения для определение радиуса области контакта;
- получена системы разрешающих уравнений для сверхзвукового участка взаимодействия и ее решение методом разделения переменных;



- построение интегрального соотношения, связывающего контактное давление с нормальными перемещениями поверхности деформируемого полупространства;
- разработка алгоритма решения системы уравнений движения на основе метода Рунге-Кутты четвертого порядка;
- построение переходной функции для оболочки;
- разработка и реализация численно-аналитического алгоритма для произвольного этапа контактного взаимодействия оболочки с упругим полупространством, основанного на методе квадратур.

Постановка и решение описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертационной работы, выбор метода решения поставленных задач, научная новизна результатов работы, их теоретическая и практическая значимость, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, представлены сведения об апробации работы, публикациях соискателя, структуре и объеме диссертации, а также перечислены результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния исследований, приведена общая постановка контактной задачи для сферической оболочки типа Тимошенко (ударника) и упругого полупространства (основания). Рассмотрен вертикальный удар ударника по основанию. Приведены линеаризованные уравнения движения полупространства и оболочки, начальные и краевые условия, соответствующие взаимодействию без трения, а также поверхностные функции влияния для упругого изотропного полупространства.

Во **второй главе** исследуется сверхзвуковой этап контактного взаимодействия сферической оболочки и упругого полупространства при скорости движения границы области контакта, превышающей скорость звука в упругой среде. С использованием поверхностной функции влияния для полупространства, принципа суперпозиции и граничных условий система



разрешающих уравнений сводится к системе уравнений движения оболочки и дополнительных уравнений для определения зоны контакта (уравнения движения оболочки как абсолютно твердого тела и геометрического соотношения для определения радиуса области контакта). При этом воздействие на оболочку со стороны полупространства описывается интегральным соотношением для контактного давления, входящим в правые части уравнений движения ударника. Для решения задачи на сверхзвуковом этапе взаимодействия применяется метод разделения переменных, при этом все искомые и заданные функции представляются рядами по полиномам Лежандра и их производным. Уравнения задачи сводятся к системе относительно коэффициентов разложения, зависящих от времени. В основу алгоритма решения полученной системы положен модифицированный метод Рунге-Кутты четвертого порядка; в отличие от классического метода Рунге-Кутты в предложенном алгоритме реализовано использование квадратурных формул для вычисления интегралов, входящих в интегро-дифференциальные уравнения. Для интегралов с сингулярной особенностью с использованием метода весовых коэффициентов и канонической регуляризации построены специальные квадратурные формулы. Значения полных эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода вычисляются с помощью аппроксимации многочленами, неполных – методом Симпсона. Рассмотрен вертикальный удар стальной сферической оболочкой по стальному полупространству. Проведено сравнение результатов при варьировании параметров материала оболочки и полупространства (оболочка и полупространство – сталь, оболочка – алюминий и полупространство – сталь, оболочка – сталь и полупространство – медь).

**В третьей главе** исследуется контактное взаимодействие на произвольном временном интервале, который состоит из двух этапов: сверхзвукового, описанного выше, и дозвукового при скорости границы области контакта, не превышающей скорость волн расширения-сжатия в среде. Основное разрешающее уравнение следует из краевых условий и



интегральных представлений для нормальных перемещений оболочки и полупространства, полученных на базе принципа суперпозиции с использованием переходных функций для ударника и основания. Замыкают данную систему уравнение движения оболочки как абсолютно твердого тела, геометрическое соотношение первого приближения для определения радиуса области контакта и начальные условия. Приведена постановка и получено решение задачи о переходной функции для оболочки. Предложен численно-аналитический алгоритм, основанный на методе квадратур, построен дискретный аналог системы, содержащий интегралы с интегрируемой и неинтегрируемой особенностями. Разработаны квадратурные формулы, позволяющие учесть вклад сингулярных особенностей. Представлены результаты расчетов и проведено сравнение результатов, полученных с помощью методов и алгоритмов второй и третьей глав. На втором примере исследовано влияние начальной скорости движения оболочки на контактное взаимодействие, приведено сравнение с результатами других авторов.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

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

Достоверность результатов диссертационной работы обоснована применением апробированного математического аппарата, достаточным уровнем математической строгости, сравнением результатов, полученных автором различными методами и сопоставлением с известными решениями других авторов.

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

Научная новизна работы заключается в построении новых аналитических решений задачи о нестационарном контактном взаимодействии сферической оболочки с упругим полупространством на сверхзвуковом этапе взаимодействия, построении новой функции влияния для сферической оболочки, разработке оригинальных алгоритмов решения нестационарной контактной задачи о взаимодействии оболочки с упругим полупространством.



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

Ценность результатов диссертационной работы заключается в:

- построении и реализации алгоритма решения задачи о сверхзвуковом этапе контактного взаимодействия упругой оболочки и упругого полупространства;
- разработке и реализации алгоритма для решения задачи о контактном взаимодействии оболочки и полупространства на произвольном временном интервале;
- построении переходной функции для упругой сферической оболочки.

Практическая ценность результатов работы заключается в возможности использования полученных результатов в качестве эталона для апробации численных методов решения нестационарных контактных задач с подвижными границами.

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

Результаты работы представляется возможным использовать для качественного анализа контактного взаимодействия сферической оболочки и упругого полупространства, а также в качестве эталона для тестирования решений контактных задач, полученных с использованием различных численных методов.

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

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

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Выносимые на защиту результаты диссертации опубликованы в девятнадцати печатных работах, в том числе в двух статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Также зарегистрированы два авторских свидетельства на программы для электронных вычислительных машин.



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

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Аналитический обзор специальной литературы (п. 1. 1) сводится к перечислению результатов, полученных в области исследования и, главным образом, в смежных областях (напр. соударение оболочки с жидкостью). Методам решения контактной задачи для оболочки, взаимодействующей с деформируемым препятствием, их возможностям, преимуществам и недостаткам уделено сравнительно мало внимания, вследствие чего оценка новизны полученных результатов, выносимых на защиту, затруднена.
2. Из принятых обозначений постоянных Ламе (с. 25) не очевидно, какие именно физические константы используются в определяющих соотношениях (1.9), постоянные для тонкой оболочки, приведенные с учетом условия обращения в нуль трансверсального нормального напряжения и обеспечивающие правильное вычисление цилиндрической жесткости, или исходные постоянные Ламе трехмерной задачи, применение которых приводит к завышенному значению изгибной жесткости оболочки.
3. Постановка задачи о контактном взаимодействии оболочки с упругим полупространством (п. 1.4) описана излишне лаконично. В частности, не приводится обоснование выбора приближенного выражения (1.22) определяющего подвижную границу области контакта как кривую, совпадающую с линией пересечения срединной поверхности недеформированной оболочки и границы недеформированного полупространства и его соответствие случаю тонкой оболочки с относительно низкой величиной изгибной жесткости.
4. Судя по рис. 2.1, наибольший радиус области контакта на сверхзвуковом этапе взаимодействия составляет величину около 2 – 2,5 толщины оболочки, т. е. нагружение оболочки на сверхзвуковом этапе контакта является локальным. Пренебрежение поперечным волновым



движением и применение классической сдвиговой модели, не включающей трансверсальные степени свободы, учет которых существенно изменяет динамические характеристики оболочки в коротковолновом диапазоне, представляется недостаточно обоснованным.

5. Применение геометрически и физически линейной модели оболочки и упругой среды при скорости движения оболочки перед соударением, составляющей 10% скорости волны дилатации в материале оболочки и упругой среды, т.е. около 2,5 М, представляется недостаточно обоснованной. Оценка уровня максимального напряжения в оболочке не произведена, его сравнение с пределом текучести для материала оболочки в тексте работы отсутствует.
6. В тексте диссертационной работы содержится некоторое количество опечаток, в том числе искажающих смысл написанного. Так, например, на с. 42 присутствует фраза «... функции, зависящие от радиальной  $\tau$  и временной переменной  $\theta$  ...», тогда как и выше, судя по рис. 1.1 и правилам обезразмеривания (1.11), и ниже, судя по формулам (2.8), (2.11) и др.,  $\tau$  обозначает время, а  $\theta$  - угловую координату.

Перечисленные выше замечания не препятствуют положительной оценке диссертации.

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

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

*Представленная к защите диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой получено численно-аналитическое решение важной, актуальной как теоретически, так и в прикладном отношении задачи.*



Структура диссертации, язык изложения материала и терминология соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам.

Результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно, являются новыми, обладают как теоретической, так и практической значимостью, опубликованы в достаточном количестве в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, обсуждены на международных и российских научных конференциях, симпозиумах и семинарах с участием ведущих специалистов в области 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, Михайлова Елена Юрьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

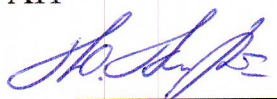
Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета ИПРИМ РАН, протокол № 04/16 от 21 апреля 2016 г.

Старший научный сотрудник

ФГБУН «Институт прикладной механики

Российской академии наук» – ИПРИМ РАН

кандидат физико-математических наук



КАРNET

Юлия Николаевна

125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д. 7

Телефон: +7 (495) 946-18-06

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