

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной и
исследовательской деятельности
Южного федерального университета,
доктор химических наук А.В. Метелица



« 12 » мая 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» на диссертационную работу Яковенко Анастасии Александровны «Моделирование дискретного контакта упругих и вязкоупругих тел», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-механических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Яковенко А.А. посвящена развитию аналитических подходов к решению задач дискретного контакта и контакта вязкоупругих тел. Несмотря на то, что современная вычислительная техника позволяет решать широкий круг контактных задач с применением различных численных методов, разработка аналитических моделей контактного взаимодействия тел представляет собой актуальную проблему. Связано это прежде всего с тем, что решения задач, найденные в аналитическом виде, позволяют сразу выделить наиболее значимые параметры модели, например, геометрические характеристики и механические свойства контактирующих тел, а также произвести количественную и качественную оценку их влияния

на исследуемые зависимости. Помимо этого необходимость в аналитических зависимостях возникает при обработке экспериментов, а также при исследовании более сложных систем, например, при разработке робототехнического оборудования.

2. Краткий анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц.

Во **введении** в общем виде дана постановка задачи дискретного контакта, которой посвящена диссертационная работа. Далее следует обзор существующих на данный момент исследований на тему постановки и решения задач дискретного контакта, какие существуют аналитические подходы к их решению, а также к решению задач контакта вязкоупругих тел. Представленный обзор содержит публикации отечественных и зарубежных авторов как прошлого века, так и опубликованные в последние годы. Помимо этого, автор упоминает и о существующих численных подходах к решению задач множественного контакта упругих и вязкоупругих тел, приводя в качестве аргументов ряд публикаций. Обсуждена актуальность построения именно аналитических решений такого рода задач и показана их практическая значимость. Во **введении** сформулирована цель диссертационной работы, ее научная новизна, а также результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** дано решение задачи контакта с упругим полупространством ограниченной системы штампов двух форм: сферической и узкой в плане. Для сферических штампов с использованием существующего решения дан полный анализ влияния пространственного расположения штампов на НДС. Для узких в плане штампов автором получено аналитическое решение, которое позволило также исследовать влияние пространственного расположения штампов на исследуемые контактные характеристики. К главному научному результату первой главы,

помимо построенной контактной модели для узких в плане штампов, можно отнести подробный анализ геометрических характеристик системы штампов на зависимость нагрузка – глубина внедрения и на нагруженность отдельных штампов.

Во **второй главе** построены решения задач внедрения с постоянной скоростью в вязкоупругое полупространство и вязкоупругий слой единичного цилиндрического штампа. Для контакта штампа с вязкоупругим полупространством получено аналитическое выражение зависимости нагрузки, приложенной к штампу от времени, которое справедливо для штампа произвольной осесимметричной формы, описываемой степенной функцией. Для контакта штампа с вязкоупругим тонким и толстым слоем получены аналитические выражения зависимости от времени нагрузки и контактного давления при добавлении к стадии внедрения дополнительной стадии удержания. Основным результатом этой главы можно считать исследование влияния формы штампа на временные зависимости контактных характеристик (для задачи с полупространством) и анализ влияния вязкоупругих свойств слоя на вид зависимости нагрузки от времени (для задачи со слоем).

В **третьей главе** представлены решения периодических контактных задач с упругим и вязкоупругим полупространством. С использованием существующего метода локализации решения при исследовании такого рода задач даны аналитические выражения, позволяющие определить контактное давление, размеры пятен контакта и смещение системы для периодических систем осесимметричных штампов. В упругом случае также получено решение для разноуровневой системы штампов. Во всех случаях дан анализ влияния плотности расположения штампов на характеристики контактного взаимодействия. Применение метода локализации для решения задач периодического контакта вязкоупругих тел представляет собой значительный научный результат.

Четвертая глава посвящена контакту шероховатых тел и представляет собой логическое продолжение третьей главы, так как рассмотренная в ней периодическая система штампов подходит для моделирования шероховатости тел на макроуровне. Полученная в третьей главе функция дополнительного смещения для вязкоупругого полупространства используется для построения решения задачи контакта с тонким вязкоупругим слоем цилиндра с плоским шероховатым основанием. Получены аналитические выражения, позволяющие определить зависимость глубины внедрения штампа в слой от времени, а также относительные размеры фактической области контакта. Построенное решение и анализ влияния параметров шероховатости цилиндра на контактные характеристики несут теоретическую и практическую ценность.

В заключении работы сформулированы основные результаты проведенного исследования.

3. Оценка научной значимости результатов

Как уже отмечалось, в работе получен ряд новых научных результатов в области моделирования контактного взаимодействия при множественном контакте. К наиболее значимым, на наш взгляд, можно отнести следующие

- построение модели контактного взаимодействия с упругим полупространством ограниченной системы узких в плане штампов и анализ влияния их пространственного расположения на НДС .
- получение аналитической зависимости от времени нагрузки, приложенной к цилиндрическому штампу с различной формой торцевой поверхности, при внедрении его в вязкоупругое полупространство и вязкоупругий слой;
- расширение области применения принципа локализации на периодические контактные задачи вязкоупругих тел и решение задачи контакта с вязкоупругим полупространством периодической системы осесимметричных штампов;

- постановка и решение контактной задачи о внедрении в вязкоупругий слой цилиндрического штампа с учетом шероховатости его торцевой поверхности, а также анализ влияния параметров шероховатости на изменение во времени глубины внедрения и фактической области контакта.

4. Оценка практической значимости результатов

Сформулированные научные результаты несут в себе не только теоретическую, но и практическую значимость. Так, построенная в первой главе модель взаимодействия с упругим телом системы узких штампов может быть использована для описания взаимодействия с мягкими тканями зажимных инструментов, которые на своей рабочей поверхности зачастую имеют систему выступов такой формы. Полученные аналитические зависимости при этом являются необходимым звеном при создании нового медицинского оборудования, включая роботизированные системы.

Аналитические зависимости нагрузки, приложенной к одному штампу, от времени и выделенные характерные особенности поведения этой зависимости в течение всего процесса взаимодействия с вязкоупругим основанием, полученные во второй главе, актуальны при планировании экспериментов по индентированию материалов, обладающих реологическими свойствами, а также при обработке результатов с целью определения механических характеристик.

Что касается результатов двух последних глав, то они несут практическую значимость при оценке влияния поверхностной микрогеометрии контактирующих тел на такие характеристики контактного взаимодействия, как размер фактической области контакта и величина глубины внедрения, которые в свою очередь определяют многие практически важные свойства сопряжений деталей.

5. Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается корректной постановкой контактных задач, использованием апробированных численных методов анализа, сравнением полученных решений новых контактных задач с известными аналитическими решениями. Так, например, решения вязкоупругих задач при малых и больших скоростях внедрения, а также на больших временах удержания, сравнивались с известными упругими решениями при мгновенных и длительных значениях упругих характеристик. В случае задач множественного контакта рассматривались большие расстояния между штампами, а полученные при этом результаты сравнивались с известными решениями контактных задач для отдельных штампов.

По работе имеются следующие замечания.

1. Отметим, что список работ, посвященных теме диссертационной работы, неполон. Из поля зрения автора ускользнула книга И. И. Аргатов, Н.Н. Дмитриев « Основы теории упругого дискретного контакта», 2003, в которой освещены многие из вопросов моделирования исследуемых объектов.
2. В работе представлена схема моделирования при множественном контакте, когда повороты штампов относительно вертикальной оси отсутствуют, соответственно условий на моменты не требуется. Было бы интересно выяснить, какова погрешность отыскания решений контактных задач при пренебрежении поворотами.
3. Для используемой далее в рамках принципа соответствия (2.16) функции релаксации необходимо было бы отметить неравенство между временами ползучести и релаксации, при которых эта модель действительно описывает релаксацию.

Сделанные замечания носят характер пожеланий и не влияют на положительную оценку работы. Диссертационная работа Яковенко А.А. «Моделирование дискретного контакта упругих и вязкоупругих тел» представляет собой законченное научное исследование, в котором

содержатся аналитические решения контактных задач для упругих и вязкоупругих тел с учетом геометрии контактирующих поверхностей на разных масштабных уровнях. Работа выполнена на высоком научном уровне, сделанные в ней выводы представляются обоснованными, результаты, полученные в работе, являются новыми и несут в себе теоретическую и практическую ценность.

Результаты диссертационного исследования докладывались на многих российских и международных конференциях, а также опубликованы в нескольких изданиях, индексируемых базами данных WoS или Scopus. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Яковенко А.А. отвечает всем требованиям «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук. Содержание работы также соответствует паспорту специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела». Таким образом, автор работы Яковенко Анастасия Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (01.02.04) профессором, заведующим кафедрой теории упругости Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета Ватульяном Александром Ованесовичем

(344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича тел. 8-918-58-96-075, e-mail aovatulyan@sfedu.ru)

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры теории упругости
Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Южный федеральный университет» 6 мая
2022г(голосование единогласное), протокол № 7.

Заведующий кафедрой теории упругости
Института математики, механики и компьютерных
наук им. И. И. Воровича
Южного федерального университета,
профессор, доктор физико-математических наук



Ватульян Александр Ованесович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Личную подпись <u>Ватульян А.О.</u>
ЗАВЕРЯЮ:
Ведущий специалист по управлению персоналом <u>М.И. Шодина</u> М.И.
<u>6 мая 2022г.</u>