



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Ю.В. Фомин

М.П.



20 26 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого**

**на диссертационную работу ЯНОВСКОЙ Елены Александровны
«Математические модели нестационарного вязкопластического течения
тонких пластических слоев в неканонических областях»
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.2.2. Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ**

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена актуальному направлению исследований, связанному с разработкой новых методов математического моделирования вязкопластического течения тонких слоев, различающихся границами областей. Для аналитического решения конкретных задач пластического течения, отличающихся многообразием постановок и подходов для достижения результата, необходимо идентифицировать адекватную математическую модель, отвечающую начальным условиям и требованиям статической определенности.

Дополнительные сложности обусловлены топологией исследуемых областей течения, которые могут быть как односвязными, так и многосвязными, что приводит к необходимости аналитического описания наружных и внутренних границ, на которых должны быть определены краевые условия. В начальный момент деформирования эти условия

определяются геометрией заготовки, в конечный момент времени - геометрией полостей инструмента, которые заполняет металл заготовки. Соответственно, требуется разработка методов, позволяющих классифицировать области сплошной среды по топологии, которая влияет на общность приложений технологии изготовления необходимых объектов и выбор достоверных моделей течения среды, привлекаемых к расчету технологических режимов в процессах пластического деформирования и оценке напряженно-деформированного состояния с использованием теории нестационарного течения тонких пластических слоев в многосвязных неканонических областях. По запросам промышленности возникает необходимость адаптировать математические модели и вычислительные процедуры для конкретных условий и процессов без потери точности. Несомненный интерес представляют математические модели, уменьшающие число уравнений в формулировках задач и, как следствие, количество начальных и граничных условий, по сравнению с точными математическими постановками механики сплошной среды (МСС), но при этом сохраняющие адекватность применительно к исходной решаемой задаче. Практические приложения взаимосвязанных моделей течения сплошной среды в тонких слоях приводят к нестандартным краевым квазистатическим, эволюционным и смешанным задачам, которые формулируются для однородных и неоднородных сред. Все перечисленное выше обосновывает актуальность темы диссертационного исследования.

Анализ содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка, включающего в себя 319 наименований, и приложения из 3 частей. Работа содержит 336 страниц машинописного текста основной части, включающей 77 рисунков и 16 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована его цель, определены задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведены обзор и анализ современного состояния теории течения тонкого пластического слоя по поверхностям. Приводится постановка классической задачи Л. Прандтля, полученное им аналитическое решение, а также ряд следствий и гипотез, сформулированных последователями.

Во второй главе сформулированы новые постановки задач течения в тонком пластическом слое и методы решения в моделях «идеальной жидкости» и «вязкой жидкости». Метод характеристик решения задач нестационарного течения в тонком слое со свободным и затрудненным растеканием дополнен возможностью определения кинематических параметров. В рамках более общей математической модели «вязкой жидкости» получено приближенное аналитическое решение. Рассмотрена

задача Коши о течении пластического слоя, ограниченного односвязным выпуклым контуром, расположенным на абсолютно жесткой поверхности, в модели «вязкой жидкости». Для нахождения контура пластической области получено эволюционное уравнение. В рамках модели «идеальной жидкости» рассмотрена краевая задача течения тонкого пластического слоя в области в виде клина, составленной из двух разнородных сред. Для области в виде полосы приведено аналитическое решение задачи о пластическом нагружении силами, приложенными на зажатых ее торцах. Рассмотрен ряд других задач, имеющих практическое значение. Разработанные алгоритмы решения задач реализованы в рамках созданных автором комплексов программ для ЭВМ.

В завершающей части главы на основе квазистатического параболического уравнения рассмотрены точные решения для семи видов границ пластической области.

Третья глава посвящена задаче классификации объектов, для изготовления которых возникает потребность оптимизации технологических режимов на основе расчетов процесса пластического деформирования и напряженно-деформированного состояния. В этой главе разработаны алгоритмы распознавания, основанные на методах дискриминантных функций, кластерного анализа, математической статистики, а также нейросетевые алгоритмы.

В четвертой главе разработан численно-аналитический метод решения задач нестационарного течения в тонком пластическом слое для стесненного формоизменения. Сформулирована новая математическая модель течения с образованием тонких стенок в виде контурных ребер при затекании деформируемой среды в пазы инструмента; упругие деформации инструмента не учитываются ввиду их малости. Предложенная двумерная математическая модель описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных относительно контактного давления и компонент вектора скорости течения.

В пятой главе излагаются вопросы математического моделирования задач прикладной теории пластичности применительно к тонколистовым и тонкостенным объектам. Также приводятся полученные инвариантные характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) для тригонометрического вида напряжений и деформаций. Построены обобщенные модели НДС с отображением на девиаторной плоскости.

В шестой главе анализируются результаты физических и численных экспериментов по сжатию между сближающимися жесткими плитами тонких пластических образцов из однородных сред, ограниченных неподвижными стенками и первоначально имеющих в плане форму прямоугольника или кругового сектора. Проведено сравнение с аналитическими решениями, полученными в главах 2 и 4. Здесь же представлена программная реализация численных методов расчета и анализа кинематических и динамических

параметров деформируемого твердого тела в виде тонкого слоя. Отмечается, что с применением разработанных программных средств можно для широкого круга задач определить кинематические параметры течения тонкого слоя, в частности, по расходу перетекающего металла дать прогноз по качеству заполнения пазов инструмента.

В заключении сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Оценка изложения результатов диссертационного исследования. Текст диссертации структурирован. Формулировки задач, разработанных методов и алгоритмов представлены корректно и соответствуют общепринятым нормам. Разработанные математические модели, представленные методы решения научных задач и созданные алгоритмы описаны по требованиям действующих стандартов и соответствуют специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Научная новизна исследования основывается на новых постановках задач исследования, новых методах анализа и алгоритмических реализациях. Новизна основных результатов заключаются в следующем:

1. Установлены связи между различными математическими моделями течения тонкого пластического слоя для обобщения методов решения краевых задач течения с исследованием эффективности введения малого параметра при переходе к безразмерным величинам в дифференциальных уравнениях параболического типа в частных производных.

2. Поставлена задача и получено точное аналитическое решение в задаче о течении тонкого слоя, расположенного между наклонными плитами, занимающего круговую область, с установлением следа ребра давлений и кинематики течения. С целью численного исследования задачи Коши разработан метод сведения уравнения в частных производных для эволюции границы растекающейся области к обыкновенному дифференциальному уравнению. Это позволило получить новые решения для частных случаев выпуклых границ (эллиптических, параболических, гиперболических, а также границ, заданных в виде эллиптического интеграла), описываемых кривыми высших порядков.

3. Поставлена и решена контактная задача о пластическом растяжении полосы из однородного металла силами, которые приложены на зажатых торцах.

4. Для тонкого слоя односвязной области в виде полосы с неоднородными свойствами по толщине построена математическая модель для анализа напряжений, возникающих в композите, и сил

сжатия, достаточных для пластического деформирования только «мягкой» компоненты слоя, а также силовых параметров в момент, когда пластической деформации будет подвержена более «твердая» компонента. Область применения теории течения тонкого слоя дополнена анализом течения односвязных областей, составленных из разнородных сплошных сред в виде клина с малым углом в плане и ограниченной произвольной выпуклой в плане границей.

5. Для обобщенной постановки краевой задачи о свободно растекающемся пластическом слое между жесткими поверхностями получены точные решения эволюционного нелинейного дифференциального уравнения для восстановления контуров односвязных областей с линейными и нелинейными границами.

6. Разработан метод распознавания объектов неканонической формы по топологическим характеристикам, влияющим на выбор математической модели пластического течения, включая алгоритмизацию этапов отбора информативных признаков.

7. На основе базовых и производных инвариантных характеристик тензоров и девиаторов напряжений и деформаций построены математические модели напряженно-деформированного состояния, отображающегося проекциями на девиаторную плоскость.

Степень достоверности результатов, изложенных в диссертации. Достоверность и обоснованность научных положений диссертационной работы обеспечивается корректным использованием известных и разработанных математических методов. Результаты теоретического анализа с достаточной точностью совпадают с результатами, полученными численными методами, и результатами, полученными при проведении физических экспериментов. Изложенное не противоречит результатам других авторов.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 36 печатных работ: из них 25 работ в журналах, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» (13 из них категории К1 и К2) и 8 статей в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных *Web of Science* и *Scopus*), и 3 монографии. Разработанные комплексы программ включают 10 модулей для ЭВМ, прошедших регистрацию в Роспатенте; на разработанные новые технологии и конструкции инструмента для проверки адекватности разработанных математических моделей и методов расчета динамических и кинематических параметров при пластическом деформировании объектов-представителей получено 16 патентов, из которых 10 на изобретения и 6 на полезные модели. Основные результаты

диссертации докладывались на семинарах и международных конференциях. Основные научные результаты получены автором самостоятельно. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Публикации соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают ее основные положения.

Значимость полученных результатов для развития отрасли науки состоит в том, что предложены новые методы и алгоритмы решения задач о нестационарных течениях, затрудненных в одном или нескольких направлениях; особенность предложенных методов и алгоритмов заключается в анализе не только динамических, но и кинематических параметров. Точность результатов находится в прямой зависимости от выбора разработанных математических моделей течения и методов анализа напряженно-деформированного состояния сплошной среды, что, в свою очередь, связано с многоуровневыми задачами классификации, эффективно решаемыми на основе комплекса методов: теоретико-множественного подхода, методов дискриминантных функций, кластерного анализа и статистических методов распознавания объектов и методов глубокого обучения нейросетей.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы. Переход от общих постановок задач пластического течения в слое к задачам частного характера дает возможность определять контактные давления, силовые и кинематические параметры при изготовлении деформированием конкретных изделий, имеющих относительно тонкие протяженные элементы формы. Результаты решения автором частных производственных задач объемной и листовой штамповки, включая комплексы программ классификации, определения силовых и деформационных параметров, могут быть использованы при технологической подготовке производства подобных изделий на предприятиях машиностроительной отрасли.

Замечания по работе. При анализе содержания текста диссертации и автореферата отмечены следующие недостатки:

1. Глава 3, посвященная классификации объектов с помощью методов распознавания и нейросетевых алгоритмов, выглядит слабо интегрированной с основной задачей течения пластического слоя (можно даже сказать – выглядит несколько инородной).

2. Валидационная экспериментальная база, представленная лишь несколькими типами геометрий, весьма ограничена. Для подтверждения универсальности математических моделей и методов было бы желательно провести дополнительные проверки на большем разнообразии форм и материалов.

3. Численные методы и алгоритмы представлены без анализа устойчивости, сходимости и оценок точности.

4. Нотация математического аппарата местами непоследовательна: одни и те же параметры получают разные обозначения, а вновь вводимые символы иногда не поясняются.

5. В тексте автореферата и диссертации имеются опечатки и неточности. Например, присутствующее в оглавлении Приложение, по фактическому содержанию оказывается тремя Приложениями А-В, но при этом отсутствует заголовок у Приложения Б. В перечислении работ автора по теме главы 5 (на с. 239) ошибочно включены несколько работ других авторов ([240], [246], [259]). Неверно указано количество рисунков. Рисунки 6.13-6.14 отсутствуют в тексте (сбой нумерации). В главе 5 неверно указан номер таблицы (6.1 вместо 5.1).

Данные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не снижают научной и практической ценности результатов, полученных соискателем.

Заключение. Диссертация ЯНОВСКОЙ Елены Александровны на тему «Математические модели нестационарного вязкопластического течения тонких пластических слоев в неканонических областях» отвечает требованиям, изложенным в пунктах 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 16.10.2024 №1382), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки) относительно указанных ниже пунктов.

1. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий. 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели. 5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей. 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Результаты диссертации опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах, а также прошли апробацию на международных и российских конференциях.

Автор диссертации ЯНОВСКАЯ Елена Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики (Протокол № 02-26 от «03» марта 2026 г.). Присутствовал 61 чел. «За» 61 чел.; «против» - нет; «воздержалось» - нет.

Отзыв составили:

СМИРНОВ Евгений Михайлович

(Ф.И.О.)

11.03.26

(дата)

(подпись)

Профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, доктор физико-математических наук, профессор

ФРОЛОВ Максим Евгеньевич

(Ф.И.О.)

11.03.26

(дата)

(подпись)

Директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, доктор физико-математических наук, доцент

Составители отзыва дают согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела Яновской Е.А.

Данные организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Телефон: 7(812) 552-60-80, +7 (812) 297-20-95, 8 (800) 707-18-99

Сайт: <https://www.spbstu.ru/>

Адрес электронной почты office@spbstu.ru

