

ОТЗЫВ

официального оппонента Петрова Игоря Борисовича на диссертационную работу Яновской Елены Александровны «Математические модели нестационарного 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» (физико-математические науки)

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа выполнена в рамках одного из определенных в Стратегии научно-технологического развития РФ (утверждена Указом Президента РФ от 28.02.2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») направлений, а именно 21 а): *переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта.*

Следуя Стратегии, математическому моделированию при создании и анализе высокотехнологичной продукции и технологиям машинного обучения отведена ведущая роль.

Этапу реализации эффективных высокопроизводительных процессов пластического деформирования предшествует этап проектирования возможных вариантов и анализ их характеристик с помощью математических моделей, исследуемых аналитическими и/или численными методами, с учетом важных технологических параметров, связанных с ресурсосбережением основных материалов и энергии, что является неотъемлемой частью технологической среды, ускоряющей переход к Индустрии 4.0, как основы инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке. Таким образом, тема диссертационной работы является **актуальной**.

Структура и содержание работы

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования, критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана

исследования. Диссертационная работа написана по проблемно-тематическому принципу и состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка, включающего в себя 319 наименований, и 3-х приложений. Работа содержит 332 страницы машинописного текста основной части, в том числе 81 рисунок и 16 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и научно-практические задачи, указаны объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы, представлены данные об апробации.

В первой главе автор приводит сведения о современном состоянии теоретической базы и практических подходах к решению сложных задач теории течения тонкого слоя по поверхностям. Проведен обзор и анализ теоретических подходов к выбору классических моделей и области их применения.

Вторая глава посвящена совершенствованию математических методов и новым моделям анализа пластического течения тонких слоев по поверхностям, в частности, методом характеристик проанализированы нестационарные задачи свободного и стесненного течения тонкого слоя, кроме поля напряжений, новая модель позволяет определить кинематические параметры. Получила решение задача течения пластического слоя материала переменной толщины с круговой границей, деформируемого между жесткими плитами, когда на границе области выполнен паз круглой формы в одном из тел инструментов, куда свободно затекает пластический материал. Построена модель и получено решение задачи сжатия композита, составленного из тонких слоев, которые имеют разные механические характеристики. Для восстановления контура пластической области в фиксированные моменты времени получено эволюционное уравнение и составлен алгоритм определения координат точек контура, который реализован программой для ЭВМ, зарегистрированной в Роспатенте.

В третьей главе представлены результаты виртуального эксперимента по выбору математической модели течения тонкого слоя с известной формой внутренней и внешней границы пластической области. Многообразие геометрии объектов, влияющей на выбор модели, потребовало создание методологии автоматической классификации этих объектов, включающей методы отбора признаков, обладающих наибольшей информативностью, теоретико-множественный подход к экспертной классификации, распознаванию объектов с помощью метода дискриминантных функций, отнесение объектов к

определенным классам с помощью вероятностных методов. Для этапов подготовки информации об объектах и их классификации с выбором подходящей математической модели течения составлены соответствующие алгоритмы, для их реализации программные продукты, которые прошли государственную экспертизу и регистрацию в виде свидетельств в Роспатенте.

В четвертой главе автором приведена методика решения задач нестационарного течения в тонком пластическом слое в условиях затрудненного формоизменения. Разработаны новые математические модели течения с образованием тонких стенок в виде контурных ребер при затекании деформируемой среды в полости жесткого инструмента.

Пятая глава содержит математическое моделирование задач прикладной теории пластичности, ориентированное на тонколистовые и тонкостенные объекты, исходным материалом для изготовления которых может быть листовой прокат (толстолистовой, тонколистовой) или трубы (особо тонкостенные, тонкостенные, толстостенные и особо толстостенные), области применения которых определены соответствующими стандартами. Процессы изготовления продукции нестационарны и реализуются в результате простого или сложного нагружения при изменяющихся во времени механических схемах. Известные инвариантные характеристики, помогающие поставить в соответствие различным схемам напряженно-деформированного состояния количественные показатели приведены в данной главе. Принимая во внимание тригонометрическую форму представления главных напряжений и главных деформаций, автором получены зависимости компонентов соответствующих девиаторов от значения угла вида напряженного или деформированного состояний, что позволило отобразить на девиаторной плоскости графоаналитические модели этих состояний.

В шестой главе проанализированы результаты двух серий экспериментов по сжатию слоев в виде прямоугольника и кругового сектора, при этом течение ограничено непроницаемыми стенками инструментов в одном из направлений. Проведено сравнение результатов, полученных в ходе эксперимента, и рассчитанных аналитически по математическим моделям двух видов. Показано противоречие с точным решением краевой задачи, поставленной в рамках математической модели «идеальной жидкости». Корректное описание течения удастся выполнить только в рамках общей математической модели «вязкой жидкости», полученной осреднением по толщине пластического слоя, только в этом случае расчетные перемещения близки не только качественно, но и количественно к данным экспериментов. Численное моделирование кинематических параметров рассматриваемых процессов течения тонкого слоя

металла по поверхностям проводилось с помощью *Web* технологии, что позволило реализовать оригинальный интерфейс. Следуя основным гипотезам механики сплошной среды, программными средствами определяются кинематические параметры течения тонкого слоя, в частности, по расходу перетекающего металла прогнозируется качество заполнения полостей инструмента.

В конце диссертационного исследования приведено заключения с **основными выводами и результатами**, в которых сформулированы итоги работы. Основные научные результаты, полученные автором, их последовательность и содержание отражают структуру работы, соответствуют поставленным задачам и свидетельствуют о полноте их решения.

Объем и содержание диссертационной работы по степени научной новизны и практической значимости удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям. Анализ содержания диссертационной работы убеждает в ее завершенности. Содержание диссертации изложено грамотно, в логической последовательности, а принятая терминология и стиль изложения соответствует общепринятым нормам.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы и ее основные положения.

Научная новизна исследования

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

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. Для численного исследования задачи Коши разработан математический метод сведения уравнения эволюции границы растекающейся области дивергентного вида в частных производных (как частный вид уравнения нелинейной теплопроводности) к обыкновенному дифференциальному уравнению, что позволило получить новые точные решения 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 ее торцах, для

использования в практических целях при правке листов и полос с помощью одноосного растяжения за пределом упругости.

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 деформацией будет подвержена более твердая компонента. Область применения теории течения тонкого слоя дополнена анализом течения односвязной области в виде клина с малым углом в плане.

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 с использованием математического аппарата, основой которой является концепция дивергенции; разработаны правила классификации деталей (производственная система) с использованием теоретико-множественного подхода к экспертной классификации; построены разделяющие поверхности в информативном признаковом пространстве с использованием метода математической статистики, метода потенциальных функций, а также получено решение классификационных задач с использованием нейронных сетей с разработкой алгоритмов глубокого обучения.

7. На основе базовых и производных инвариантных характеристик построены математические модели напряженного и деформированного состояний, отображающиеся сечениями предельных поверхностей текучести девиаторной плоскостью.

8. Установлено, что полученные аналитические данные удовлетворительно коррелируют с результатами экспериментов по стесненному пластическому течению слоев в виде прямоугольника и кругового сектора в плане для обоснованного выбора математических моделей, которые дают более точные решения. Результаты теоретического анализа с достаточной точностью совпадают с результатами, полученными численными методами и результатами, полученными при проведении физических экспериментов по пластическому деформированию

тонкопалотных объектов или имеющих ребра жесткости и занимающих одно-связные и многосвязные области.

Теоретическая и практическая значимость работы. В рамках общего подхода к решению краевой задачи Коши применительно к нестационарному течению тонкого слоя по поверхностям получил дальнейшее развитие математический аппарат анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) растекающейся по поверхностям сплошной среды в виде тонкого слоя, занимающего многосвязные области, ограниченные контурами, составленным из кусочно-линейных или нелинейных функций.

Для объектов исследования различной формы, занимающих многосвязные области, на основе общих принципов, построен алгоритм определения линий тока, линий уровня и проводится построение линий ветвления течения (ребер давления) для различных областей с характерным течением и формулируются краевые условия на границах областей.

Работоспособность всех разработанных математических моделей нестационарного течения пластических слоев проверена численными методами решения с помощью проблемно ориентированных программных пакетов, основанных на методе конечных элементов, и подтверждена экспериментальными исследованиями применительно к разным маркам металлов и сплавов, деформируемых в различных условиях.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации подтверждены корректными постановками задач для исследования, алгоритмами их решения и результатами сравнения с задачами, и данными, полученными по методикам независимых исследователей. Полученные автором результаты согласуются с известными результатами в предельных случаях.

Основные положения и научные результаты, выносимые на защиту, полученные автором лично или вклад автора в которые был определяющим:

1. Метод характеристик, адаптированный для решения задач пластического течения тонких слоев в ортогональных прямоугольной и криволинейной системах координат.

2. Новые математические модели нестационарных течений тонких слоев по недеформируемым и упруго-деформируемым поверхностям, включая новые постановки краевых задач течения пластического слоя и, в зависимости от используемых гипотез, приближенные или точные методы аналитических решений в моделях «идеальной» и «вязкой» жидкостей.

3. Метод решения задач пластического течения в слое, составленном из различных сред, как по толщине, так и в плане, в модели «вязкой» жидкости, новизна которого состоит в анализе изменения границы между компонентами композита.

4. Алгоритмы вычисления параметров течения сплошной среды в виде тонких слоев, занимающих односвязные и многосвязные области неканонической формы, которые позволяют наряду с вычислением силовых параметров процессов сжатия, анализировать кинематику течения.

5. Эволюционное уравнение, описывающее изменение границ неканонических областей, на различных этапах течения.

6. На основе базовых и производных инвариантных характеристик сплошной среды новые математические модели НДС, представляющие собой проекции на девиаторную плоскость траекторий главных напряжений и деформаций, и функционально связанные с видами механических схем напряжений и деформаций на конкретных операциях обработки металлов давлением.

7. Комплекс программ, содержащий процедуры поддержки и принятия решений на всех этапах предпроектных исследований, среди которых несколько дополняющих друг друга программных кодов, реализующих анализ информативности различительных признаков, распознавание и классификацию сложных геометрических областей, логику выбора математических моделей для решения задач пластического течения слоев по поверхностям, решения эволюционных уравнений восстановления изменяющихся границ растекающейся пластической области, определение динамических и кинематических параметров течения сплошной среды.

Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати

Анализ содержания диссертации, опубликованных работ, в том числе работ, опубликованных в соавторстве, показал, что все научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации принадлежат автору.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Основные положения, результаты и выводы диссертационного исследования могут быть использованы как научными работниками вузов и отраслевых институтов, так и на машиностроительных предприятиях при технологической подготовке производства деталей, имеющих тонкие полотна.

Замечания по диссертационной работе

В диссертации успешно решены сложные в научном и практическом плане задачи, однако, при этом нельзя не отметить ряд **замечаний** и дискуссионных положений:

1. Не все решённые аналитически задачи подвергались проверке с помощью экспериментальных исследований или численными методами. На чем основывался выбор автора представленных в работе примеров?

2. В процессах пластического деформирования трение играет важную роль и зависит от многих параметров: контактного давления, шероховатости поверхностей инструмента, площади контакта, наличия технологической смазки и проч. Однако, судя по тексту диссертации стр. 46 «...шероховатые поверхности...» ($0 \leq m \leq 1,0$ – фактор трения); стр. 49 «...поверхности абсолютно шероховатые...» ($n = m = 1,0$); стр. 52 «...сухое трение...» ($\mu_1 = \mu_2 = 1,0$), диапазон изменения данного параметра весьма широк, поэтому не понятно:

- какие численные значения использовать в реальных условиях деформирования?

- почему в рамках одной работы используются разные обозначения одного и того же параметра?

Указанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку диссертационной работы, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

Заключение

Диссертация Е.А. Яновской является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение для проектирования и реализации современных высокопроизводительных технологических процессов. Диссертационная работа «Математические модели нестационарного вязкопластического течения тонких пластических слоев в неканонических областях» соответствует критериям и требованиям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор Яновская Елена Александровна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моде-

лирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

Официальный оппонент
член–корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
ФГАОУ ВО «Московский физико-
технический институт (национальный
исследовательский университет)»

Игорь Борисович Петров

«05» марта 2026 г.

Даю согласие на обработку персональных данных, представленных в отзыве.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт (нацио-
нальный исследовательский университет)»

141701, г Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, с. 1
электронная почта: petrov@mipt.ru

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ:
АДМИНИСТРАТОР КАНЦЕЛЯРИИ
АДМИНИСТРАТИВНОГО ОТДЕЛА
С. А. КОРАБЛЕВ

