



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 939-10-00
Факс: 939-01-26

21.04.2026 № 180-26/013-03
На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова
профессор, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

А.А. Федянин

« 21 »

апреля

2026 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу
Панченко Галины Леонидовны
**«ПРОЦЕССЫ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
СО СЛОЖНЫМИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ»**
представленную к защите на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность работы определяется необходимостью учета сложных реологических свойств материалов в условиях связанности процессов деформирования, тепловыделения и теплопередачи, когда деформации нельзя положить малыми. Такие задачи определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций со сложными реологическими свойствами в условиях термомеханических воздействий являются актуальными задачами современной авиационной, аэрокосмической, энергетической промышленности. Технологии холодной формовки и обтяжки, которые по ряду параметров являются наиболее перспективными технологиями изготовления крупногабаритных элементов конструкций, используют свойство ползучести материалов, но при этом должны учитывать возникновение и развитие локальных областей пластического течения. А точность в геометрии и в уровне остаточных напряжений определяющим образом зависит от упругого отклика материала изделия в процессе снятия оснастки (в процессах разгрузки). Большинство технологий включает в себя и тепловые воздействия на материалы на стадии подготовки (для увеличения скоростей процессов), или на стадии обработки готового изделия для уменьшения уровня остаточных напряжений (отпуск). Таким образом, развитие

теории, комплексно учитывающей упругие, теплофизические, пластические и вязкие свойства материалов, решение в рамках такой модели краевых задач, описывающих технологические приемы обработки и эксплуатации изделий и конструкций, является актуальной задачей, важной как для современной инженерной практики, так и для развития фундаментальной механики.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 282 наименований. Общий объем работы составляет 338 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, перечислены основные научные результаты, положения, выносимые на защиту, кратко приведена структура диссертации по главам.

В первой главе проведен краткий литературный обзор моделей больших деформаций материалов с учетом их упругих, пластических, вязких и теплофизических свойств. Получена замкнутая система уравнений, описывающая неизотермическое деформирование материалов с упругими, пластическими и вязкими свойствами, в условиях накопления ими больших деформаций, как необратимых, так и обратимых. Модель строится на основе дифференциальных определений для тензоров обратимых и необратимых деформаций. С использованием законов термодинамики для предложенной кинематики среды определена связь между напряжениями и деформациями и получены уравнения теплопроводности для областей обратимого деформирования, разгрузки и пластического течения. Накапливаемые деформируемым материалом в термомеханических процессах необратимые деформации могут быть и деформациями ползучести, и пластическими деформациями. При накоплении деформаций ползучести для определения скоростей их изменения выбран степенной закон ползучести Нортона. При пластическом течении накопленные деформации ползучести являются начальными для пластических деформаций, для нахождения скоростей которых используется ассоциированный закон пластического течения и классические условия пластичности Треска, Ивлева – Ишлинского и Мизеса, в том числе с учетом вязких свойств материалов.

Необратимые деформации при этом не разделяются на составляющие и определяются одним дифференциальным уравнением изменения, в котором по-разному задан источник (тензор скоростей) необратимых деформаций. Параметры ползучести материала, предел текучести и коэффициент вязкости пластического течения зависят от температуры.

Во второй главе приводятся решения краевых задач изотермической теории больших упруговязкопластических деформаций о прямолинейных движениях материала, расположенного между жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями, с возможным проскальзыванием материала в их окрестности. Рассмотрены случаи, когда деформирование материала происходит за счет движения одной из жестких поверхностей, а вторая является жестко закрепленной. Проскальзывание материала возможно как у внутренней стенки цилиндра (движущейся или неподвижной), так и у внешней, и у обеих одновременно. При переменной возрастающей скорости цилиндра изучено упругое деформирование, возникновение вязкопластического течения в окрестности внутренней поверхности и его дальнейшее развитие, течение материала при постоянной скорости, а также торможение течения и разгрузка при равнозамедленном движении граничной поверхности. Во всех случаях получены аналитические зависимости для скоростей, перемещений, недиагональных компонент напряжений и деформаций в каждой из областей.

Здесь же решена задача в случае, когда деформирование происходит за счет переменного градиента давления. Проскальзывание материала происходит у обеих граничных поверхностей. При возрастающем, постоянном и уменьшающемся давлении подробно исследовано развитие областей течения сначала у внутренней, затем у внешней жесткой поверхности, и дальнейшее движение упругопластических границ до момента прекращения течения.

В третьей главе получены решения ряда связанных краевых задач теории больших упруговязкопластических деформаций.

Изучено деформирование плоского слоя на наклонной плоскости при нагреве его свободной поверхности, а также горизонтального слоя в случае, когда к его свободной поверхности приложена сдвиговая нагрузка, а разогрев материала слоя происходит за счет трения о шероховатую плоскость.

Получены решения неизотермических задач о деформировании упруговязкопластических материалов под действием переменного градиента давления в случаях, когда материал находится в круглой трубе, между двумя коаксиальными цилиндрическими поверхностями и при наличии слоя смазки между материалом и стенкой трубы. Деформирование слоя материала в зазоре между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями также рассмотрено, когда внешняя жесткая поверхность движется с переменной скоростью, а внутренняя остается неподвижной. Разогрев материала во всех рассмотренных случаях происходит и за счет необратимого деформирования, и за счет трения о жесткие стенки. Исследовано упругое деформирование, возникновение и развитие областей вязкопластического течения, а также их последующее уменьшение при

уменьшении градиента давления и остывание. Численные решения задач получены методом конечных разностей.

В четвертой главе изучается деформирование материалов (изотермическое и неизотермическое), когда накапливаемые ими необратимые деформации могут быть и деформациями ползучести, и пластическими деформациями.

Для случаев изотермического деформирования получены решения краевых задач теории больших деформаций о ползучести и вязкопластическом течении материала в зазоре между двумя жесткими цилиндрическими поверхностями при прямолинейном движении внутренней граничной поверхности и закрепленной внешней и в шаре с микропорой в центре при его гидростатическом сжатии. Исследовано деформирование материалов до начала в них пластического течения, когда необратимые деформации накапливаются при их ползучести. С выходом напряженного состояния на поверхность нагружения в части деформируемой области развивается вязкопластическое течение. В случае цилиндрической задачи такая область развивается от движущейся поверхности, в случае сферической – от границы микропоры. Деформирование рассмотрено в случае переменной скорости цилиндра до его остановки, и при возрастающем, постоянном и уменьшающемся до нуля давлении в сферической задаче. Рассчитаны деформации и их скорости, перемещения и остаточные напряжения, а также исследована их релаксация после полной разгрузки.

Неизотермические решения получены для плоских и цилиндрических задач. Деформирование тяжелого слоя на наклонной плоскости в первом случае рассмотрено, когда изменяется температура его свободной поверхности, во втором к верхней границе слоя приложена помимо тепловой еще и сдвиговая и сжимающая нагрузка. Показано, что течение материала слоя в первом случае начинается на нижней границе слоя, во втором – на верхней. Предел текучести, вязкость и параметры ползучести материала зависят от температуры.

Изучено деформирование несжимаемого упруговязкопластического материала, образующего пробку конечной длины в круглой недеформируемой трубе. За счет переменного давления, приложенного к верхней торцевой поверхности пробки, происходит ее деформирование и разогрев. Рассмотрены случаи жесткого сцепления материала со стенками трубы, когда разогрев происходит только за счет накопления сначала необратимых деформаций ползучести, затем пластичности, а также с возможностью проскальзывания материала в окрестности недеформируемой стенки трубы, когда разогрев происходит еще и за счет трения материала о граничную шероховатую поверхность трубы. Исследованы процессы ползучести, вязкопластического течения и разогрева материала при возрастающем и постоянном давлении, торможения течения и разгрузки среды при

убывающем давлении, а также остывание материала после полного снятия механической нагрузки.

Рассчитаны температура и параметры напряженно-деформированного состояния на каждом этапе нагружения, установлены закономерности продвижения упругопластических границ по деформируемому материалу, определены остаточные деформации и напряжения.

В пятой главе получены некоторые решения изотермических задач теории малых деформаций материалов с учетом их упругих, пластических и вязких свойств.

Получено решение задачи о деформировании горизонтального плоского сжимаемого слоя при приложении сдвиговых и сжимающих нагрузок к его свободной поверхности. Материал слоя полагался упругопластическим и упруговязкопластическим, в качестве условий пластичности выбирались условия Кулона – Мора и Мизеса – Шлейхера.

Изучены ползучесть и пластическое течение материала толстостенной цилиндрической трубы под действием равномерного внутреннего давления. Использовались кусочно-линейные потенциал ползучести и условие пластичности, приводящие к наличию в деформируемой области напряженных состояний, соответствующих граням и ребрам рассматриваемых условий.

Накопление необратимых деформаций ползучести и пластичности также рассмотрено для полой сферы при ее всестороннем гидростатическом сжатии для идеального пластического и вязкопластического материалов.

Рассмотрено вязкопластическое течение материала толстостенной трубы под действием двух циклов нагрузок, состоящих в приложении внутреннего равномерного давления, сначала возрастающего со временем, затем постоянного и далее уменьшающегося до нуля. Показано, что при повторном нагружении вязкопластическое течение наступает при значительно большем давлении, чем при первом нагружении.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, связана с развитием теории больших деформаций материалов с упругими, пластическими и вязкими свойствами, которое привело к возможности постановок и получению новых решений неизотермических краевых задач теории больших деформаций материалов с учетом накопления ими необратимых деформаций и ползучести, и пластичности при условиях зависимости параметров ползучести, предела текучести и коэффициента вязкости от температуры.

Достоверность научных результатов обусловлена использованием классических подходов неравновесной термодинамики и механики сплошных сред, общепризнанных численно-аналитических процедур. Математическая модель больших

упруговязкопластических деформаций может считаться достаточно апробированной; из нее в частном случае при переходе к малым деформациям следуют соотношения классической модели типа Прандтля – Рейса.

Теоретическая и практическая значимость результатов связана с возможностью использования развиваемой математической модели и предложенных методов исследования для моделирования неізотермических процессов интенсивного формоизменения конструкционных материалов при их обработке давлением с оценкой упругого последействия при общей разгрузке изделий в технологических процессах их изготовления и упрочнения.

Рекомендации по использованию. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в учебном процессе и в научных исследованиях во многих высших учебных и научно-исследовательских учреждениях (Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московский авиационный институт, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Новосибирский государственный технический университет, НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН, Институт машиноведения УрО РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН), а также могут найти применение в авиационной, аэрокосмической, энергетической промышленности, судостроении, машиностроении, металлургии.

Вопросы и замечания:

1. Все результаты на графиках и в диссертации, и в автореферате представлены в безразмерных переменных. Для лучшего понимания полученных результатов было бы целесообразно указывать при этом и реальные значения используемых параметров.
2. Чем объяснить разный вид функции давления в задачах о прямолинейных течениях в цилиндре? Так, в задачах, рассмотренных в § 2.4, 3.3, 3.4, 3.6 задается переменный градиент давления, а в § 4.4 перепад давления задается на торцевых граничных поверхностях. Было бы полезно пояснить выбор соответствующих функций для расчетов.

3. Во всех рассмотренных задачах проскальзывание материала в окрестности жесткой границы начинается раньше пластического течения. Было бы интересно получить решения и в случае, когда проскальзывание происходит собственно за счет вязкопластического течения.
4. Чем можно объяснить наличие повторного пластического течения при разгрузке в осесимметричных задачах? Это зависит от свойств рассматриваемого материала (идеально упругопластический или упруговязкопластический) или только от условий нагружения?
5. При выводе соотношений для напряжений (2.5) и далее автор ограничивается слагаемыми первого порядка по диагональным компонентам деформаций и второго по недиагональным. Такое упрощение вносится для получения аналитических выражений, но погрешность такого приближения и границы его применимости не оцениваются.
6. В диссертации предложена зависимость предела текучести от температуры. Однако для многих конструкционных материалов предел текучести также существенно зависит от скорости деформации. В предложенной модели и решенных задачах эта зависимость не учитывается. В связи с этим вопрос: насколько правомерно пренебрежение скоростной чувствительностью предела текучести в рамках рассмотренных неизотермических процессов интенсивного формоизменения? Планируется ли обобщение модели на этот случай?
7. Приводимые в тексте конечно-разностные схемы (например, (3.109)-(3.113)) чрезвычайно громоздки. Их следовало бы вынести в приложение, оставив в тексте только описание метода.

Заключение. Указанные замечания не отражаются на общей положительной оценке работы. Диссертация «Процессы интенсивного формоизменения материалов со сложными термомеханическими свойствами» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Полученные новые результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение. Результаты работы хорошо опубликованы и апробированы, автореферат полно и правильно отражает ее основное содержание.

Диссертация соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в редакции от 01.10.2018 г.), а ее автор, Панченко Галина Леонидовна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессором, профессором кафедры

вычислительной механики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Левиным Владимиром Анатольевичем.

Результаты диссертационной работы Г.Л. Панченко и отзыв на неё обсуждены и одобрены на научно-исследовательском семинаре кафедры вычислительной механики 7 апреля 2026 года, протокол №1.

Профессор кафедры вычислительной механики,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела),
профессор



В.Ан. Левин

Учёный секретарь кафедры вычислительной механики,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Е.В. Колдоба

Декан
механико-математического факультета,
доктор физико-математических наук,
чл.-корр. РАН, профессор



А.И. Шафаревич

Механико-математический факультет, кафедра вычислительной механики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Почтовый адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
Телефон: +7 (495) 939-10-00
Адрес электронной почты: info@rector.msu.ru
Адрес официального сайта организации: www.msu.ru

