



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062, тел.: +7 (343) 375-45-07  
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)  
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru  
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

20.11.2024 № 01.09-07/1009  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» доктор физико-математических наук, доцент

Германенко А.В.

2024 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию **Афанасьевой Елены Андреевны**

**«Стохастические модели прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик элементов конструкций с неупругими свойствами материала»,**

**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

**Актуальность темы диссертационной работы.** Не будет преувеличением утверждать, что с древности люди пытались прогнозировать прочность и оценивать ресурс функционирующих изделий в различных отраслях хозяйства. Научно-технические революции, приводящие к технологическому прогрессу, каждый раз совершали движение к разработке теоретических и экспериментальных подходов для изучения напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций.

Основополагающим исследованием деформируемых сред стал вывод одномерной зависимости Гука для упругих пружин. К настоящему времени, когда известны уравнения математической теории упругости, роль закона

Гука в тензорной форме невозможно переоценить. Именно в пионерских работах закладывалась теория определяющих соотношений, которая была подытожена Коши – основателем теории симметричной теории упругости. Дальнейшие наблюдения в лабораторных условиях и в природе скорректировали представления о деформировании материалов. Начала развиваться теория неупругого деформирования материалов, которая оказалась геометрически и физически нелинейной, что чрезвычайно затрудняет оценку прочностных свойств материалов и определение остаточных ресурсов изделий.

Построение теории определяющих соотношений для неупругих материалов является сложной задачей, актуальность которой определяется тем, что при их эксплуатации структура является неизвестной. В этом случае необходимо правильно и корректно обрабатывать экспериментальные данные для построения новых модельных представлений о напряженно-деформированном состоянии неупругих материалов.

При проведении экспериментальных исследований всегда наблюдается так называемый разброс данных. К настоящему времени достаточно очевидно, что использование детерминированных теорий, которые характеризуют поведение некоторой «осредненной» конструкции, недостаточно. Следовательно, необходима разработка математических моделей на основе математического аппарата теории вероятностей и математической статистики. Очевидно, что важнейшей задачей на современном этапе математического моделирования механического поведения материалов конструкций с неупругими свойствами является разработка корректно построенных стохастических уравнений состояния и методов индивидуальной параметризации математических моделей применительно к конструкции. При этом необходимо учитывать отсчетную конфигурацию ее эксплуатации с возможностью дальнейшего прогнозирования деформационного поведения на основе индивидуализированной модели. Это необходимо для прогнозирования деформационное поведение изделия и оценки его индивидуального ресурса. В данной диссер-

тационной работе автором впервые начаты исследования в этом направлении, актуальность которых не вызывает сомнений.

**Научная новизна исследования.** В представленной к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата наук в качестве основных научных результатов можно выделить:

- 1) впервые разработана стохастическая математическая модель, позволяющая прогнозировать индивидуальные деформационные характеристики элементов конструкций с неупругими свойствами материала при однопараметрическом нагружении в условиях ползучести и износа при трении;
- 2) впервые разработан численный метод параметрической и структурной идентификации физически и вероятностно нелинейной математической модели неупругого деформирования элементов конструкций, позволяющий свести задачу к нелинейному регрессионному анализу определения оценок случайных параметров модели с использованием временных рядов наблюдения неупругого деформирования материала при постоянных внешних нагрузках;
- 3) впервые разработаны методы индивидуального прогнозирования деформационных характеристик обобщенного перемещения элементов конструкций по изделию-лидеру, позволяющие осуществлять прогнозирование на несколько временных интервалов относительно базового времени идентификации случайных параметров моделей;
- 4) разработано авторское программное обеспечение, которое использовано для проверки правильности расчетов по разработанным автором диссертации методам и моделям индивидуального прогнозирования обобщенных перемещений элементов конструкций в условиях ползучести и износа при трении.

Полученные новые научные знания и методология исследования целей и задач диссертационного исследования соответствуют основным направлени-

ям исследований паспорта специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Теоретическая и практическая значимость** полученных результатов заключается в разработке стохастических моделей и новых методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния и длительной прочности элементов конструкций с неупругими свойствами материалов, использование которых в различных направлениях механики, машиноведения и трибологии позволяет достоверно оценить ресурс изделия и позволит повысить длительность безаварийной эксплуатации однотипных деталей и прогнозировать плановые ремонтные работы для бесперебойного производственного цикла функционирования конструкции. Разработанные модельные представления неупругого деформирования материалов и программное обеспечение может быть использовано при обработке больших объемов экспериментальной информации для формулирования критерия отказов в машиностроении, двигателестроении, авиационной промышленности.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Результаты и научные выводы исследования, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в организациях, занимающихся математическим моделированием и экспериментальными исследованиями. Отметим такие организации: Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Воронежский государственный университет, Институт проблем механики РАН, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Тульский государственный университет и другие научно-образовательные организации Российской Федерации, в которых изучаются проблемы неупругого деформирования. Результаты диссертационной работы частично внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета в лекционные курсы по профильным направлениям и используются в рутинной расчетной практике профильных отделов ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара).

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается адекватностью и корректностью разработанных математических моделей для описания физико-механического поведения элементов конструкций в условиях длительного неупругого деформирования, их соответствием исследуемым процессам, теоретическим представлениям в предметной области, правильным применением математического аппарата теории вероятностей, математической статистики, регрессионного анализа, вычислительной математики, дифференциальных уравнений, механики деформируемого твердого тела, а также верификацией на экспериментальных результатах различных исследовательских групп, сравнением с результатами других авторов, когда это возможно.

Научные результаты диссертационного исследования многократно обсуждались на профильных российских и международных конференциях и выступлениях на семинарах ведущих отечественных научных групп.

По теме диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, из них 4 статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемых в Web of Science и Scopus, 1 статья в журнале, индексируемом в Scopus, 6 статей в сборниках трудов конференций, 2 тезисов докладов и имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и основная характеристика диссертационной работы.** Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»). По содержанию и структуре диссертация соответствует требованиям для научно-квалификационных работ, представленных на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка библиографических источников, приложений. Общий объем диссертации составляет 189 страниц. В диссертации содержатся 18 таблиц, 63 рисунка и 4 приложения. Библиографический список содержит 131 источник.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлены выносимые на защиту положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость и апробация работы.

**Первая глава** диссертации представляет собой обзор научной литературы, включающий исследования и результаты ученых, работающих в области существующих методов прогнозирования кинетики процессов и функционирования конструкций, выполнен анализ методов прогнозирования неупругой деформации и длительной прочности в условиях ползучести и изложены методы прогнозирования деформационных характеристик элементов конструкций в условиях реологического деформирования материала.

**Во второй главе** работы разработан новый численный метод параметрической и структурной идентификации нелинейной теории неполной обратимости деформации ползучести, позволяющий, математически обосновано свести задачу к нелинейному регрессионному анализу определения оценок случайных параметров реологической модели. Показано, что при использовании осредненных экспериментальных кривых ползучести построенная реологическая модель на их основе является стохастической из-за процедуры параметрической идентификации нелинейной регрессионной модели. Для ряда сталей и сплавов выполнена параметрическая и структурная идентификация математической модели на базе теории неполной обратимости деформации ползучести.

**В третьей главе** представлены результаты исследований автора, целью которых являлось разработка метода индивидуального прогнозирования обобщенного перемещения элементов конструкций на стадиях упрочнения и стационарного накопления поврежденности по изделию-лидеру в стохастической постановке. Приведено исследование эффективности данного метода. Разработан метод прогнозирования кривых стационарной ползучести при наличии второй и третьей стадий и времени разрушения стержневых элементов конструкций по минимальной скорости ползучести на начальном участке

деформирования исследуемых образцов и известной кривой ползучести образца-лидера при вязком разрушении материала в условиях растяжения и кручения. Проверка корректности моделирования осуществлялась на сталях и титановых сплавах. Показано, что разработанная методика хорошо согласуется с экспериментальными данными.

**В четвертой главе** автором описана разработка программного обеспечения, реализующего разработанные в диссертации численные методы структурной и параметрической идентификации кривых ползучести. Программное обеспечение позволяет пользователю задать экспериментальные данные деформации на входе программы и получить оценки параметров моделей. Приведено описание алгоритмов численных методов и интерфейса программы.

**В заключении** диссертационной работы подведен итог выполненных исследований, сформулированы основные выводы, полностью соответствующие поставленным целям и задачам, а также изложены перспективы дальнейшего развития исследований.

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

**Замечания по диссертации и автореферату.** При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. В тексте работы имеются неточности и опечатки, не влияющие на восприятие научных результатов.

Отметим еще некоторые дискуссионные и технические моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:

1. Каким способом исследовалась сходимость численного метода, анонсированного во второй главе?
2. Как соотносятся математические модели автора с известными ранее результатами?

3. Хотелось бы пояснения по выбору статей и сплавов для проведения исследований.

Отмеченные замечания являются дискуссионными, не снижают научной ценности результатов диссертации и не подвергают сомнению выводы представленной диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Афанасьевой Е.А. выполнена в рамках паспорта научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки) в части 1. «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки)», в части 3. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», а также части 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента». Диссертация написана в научном стиле и аккуратно оформлена. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений.

Диссертационная работа **Афанасьевой Елены Андреевны «Стохастические модели прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик элементов конструкций с неупругими свойствами материала»** является завершенной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 (со всеми последующими изменениями), а ее автор – Афанасьева Елена Андреевны – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа Афанасьевой Е.А. и отзыв о ней заслушаны и обсуждены на заседании кафедры информационных технологий и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» 10.12.2024 года, протокол №12.

Я, Акимова Елена Николаевна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.2.417.02, и их дальнейшую обработку.

Я, Просвиряков Евгений Юрьевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.2.417.02, и их дальнейшую обработку.

Отзыв составили:

Профессор кафедры информационных технологий и систем управления института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор физико-математических наук (05.13.18), профессор



Акимова Елена Николаевна  
18 декабря 2024 г.

Профессор кафедры информационных технологий и систем управления института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор физико-математических наук (01.02.05), доцент



Просвиряков Евгений Юрьевич  
18 декабря 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Почтовый адрес: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19. Телефон: +7 (343) 375-44-44. Эл. почта: [contact@urfu.ru](mailto:contact@urfu.ru)

Подписи Е.Н. Акимовой и Е.Ю. Просвирякова заверяю

Ученый секретарь ФГАОУ «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



18 декабря 2024 г.



Морозова Вера Анатольевна