

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу  
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

### **1. Актуальность темы исследования.**

Прогнозирование временного поведения ответственных элементов конструкций в процессе эксплуатации на длительные периоды времени, большие тех, на которых выполнялась идентификация модели, является актуальной задачей цифрового проектирования изделий машиностроения. Рассматриваемые процессы сопровождаются накоплением поврежденности и имеют большой стохастический разброс характеристик ползучести, длительной прочности, в особенности на ступенчатых программах термомеханического нагружения типа полетных циклов. Это требует разработки специальных подходов, обоснованных с точки зрения теории стохастических дифференциальных уравнений, которыми описываются рассматриваемые процессы, а также методик индивидуального прогнозирования остаточного ресурса элементов конструкций. Решение этих задач позволит более точно и статистически обоснованно рассчитывать ресурс деталей машин и более полно использовать прочностные свойства металла. Разработка новых методов построения стохастических индивидуальных математических моделей, позволяющих прогнозировать неупругое деформационное поведение и характеристики длительной прочности элементов конструкций, алгоритмов и программного обеспечения для реализации математических моделей поэтому является актуальной темой исследования.

### **2. Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименований и четырех приложений, содержит 189 страниц текста с 18 таблицами и 63 рисунками. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во *введении* сформулированы актуальность темы, объект, предмет, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, соответствие диссертации паспорту научной специальности, положения, выносимые на защиту, степень их достоверности и обоснованности, апробация, опубликованность, внедрение полученных результатов, личный вклад автора, поддержка научными фондами, благодарности, статистический обзор диссертации.

В *первой главе* приводится аналитический обзор методов параметрического прогнозирования кинетики различных диссипативных процессов, включая процесс накопления отказов в сложной технической системе, имеющих качественную общность. Обсуждаются меры (назначенного или индивидуального) ресурса для постановки соответствующих задач прогнозирования, специфика задач расчета ползучести, длительной прочности, усталости и процессов в узлах трения, связанная с большим стохастическим разбросом данных. Отмечены подходы к сокращению этого разброса, например, рассмотрением процессов в рамках одного физического механизма. Приведен обзор исследований, в которых рассматривались различные модели ползучести с учетом стохастического разброса их констант. Отмечен подход макромеханики конструкций, в котором реологические уравнения в терминах обобщенной нагрузки и обобщенного перемещения записываются для тел с неоднородным напряженно-деформированным состоянием.

Во *второй главе* излагается численный метод параметрической идентификации аппроксимационных зависимостей кривых ползучести при постоянных напряжениях в пределах первых двух стадий. В качестве модели ползучести использована модель Ю.П. Самарина, описывающая неполное восстановление деформаций после разгрузки и выдержки, осуществляемых в пределах первых двух стадий ползучести. Разработана новая методика структурной идентификации, сочетающая подход с последовательным подбором числа членов и констант экспоненциального ряда с современными результатами в области стохастических разностных уравнений (модели ползучести). Эта методика, использующая методы нелинейного регрессионного анализа, позволяет решить проблему выбора начального приближения. Кроме того, она не требовательна к подготовке данных испытаний, и потому не вносит дополнительных случайных искажений. Методика состоит из этапов аппроксимации установившейся стадии ползучести, нахождения среднеквадратичных оценок параметров первой экспоненциальной составляющей, итерационного уточнения

среднеквадратичных оценок параметров нелинейной регрессии, оценки необходимости использования дополнительных экспоненциальных составляющих и повторений всех этапов первого шага необходимое число раз. Также предлагается методика определения параметров модели, если известны данные испытаний только для первой стадии ползучести, основанная на аналогичных идеях и имеющая те же преимущества. Излагается стохастически линейное обобщение рассматриваемой модели ползучести на основе оценки параметров идентификации базовой кривой ползучести. Определяются детерминированные параметры степенного закона зависимости от уровня напряжения и доли обратимой деформации. Демонстрируется применение методики для обработки данных испытаний для двух первых стадий высокотемпературной ползучести ряда жаропрочных сплавов и стали. Демонстрируется применение методики для конструктивных элементов в условиях (первых двух стадий) ползучести на основе макромеханики конструкции на примере резьбового соединения. Также продемонстрировано применение методики для данных первой стадии ползучести поливинилхлоридного пластика при комнатной температуре.

В *третьей главе* разрабатывается методика индивидуального прогнозирования деформационных характеристик конструктивного элемента по образцу-лидеру и на основании стохастических уравнений состояния, предложенных в главе 2, для оценки его индивидуального ресурса при ползучести и трении. Соискателем предложена оценка среднеквадратического отклонения прогнозной кривой, более точная для времен вначале прогнозного участка. Методика, примененная к растягиваемым стержневым элементам из поливинилхлоридного пластика в условиях ползучести, хорошо спрогнозировала на интервале времени, втрое большем базового интервала и для других напряжений и температур. Методика также успешно применена к осевому растяжению конструкции — резьбового соединения в условиях ползучести и износа узла трения передней стойки шасси самолета при ступенчатом режиме нагружения на полетных циклах, где прогнозный интервал вчетверо превышал базовый. Реализована методика индивидуального прогнозирования кривых стационарной ползучести и длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов по начальному участку кривой ползучести образца-лидера в рамках механизма вязкого разрушения при очень высоких температурах и существования связи параметров установившейся ползучести и длительной прочности, которая показала прогнозные преимущества по сравнению с существующей методикой. Также реализован метод расчета индивидуальных

деформационных характеристик элементов конструкций для прогнозирования их работоспособности при эксплуатации по техническому состоянию на примере осевого растяжения стального резьбового соединения при повышенной температуре и ступенчатом нагружении. Все прогнозные оценки для рассмотренных примеров даны с доверительным интервалом, соответствующим вероятности попадания в него.

В *четвертую главу* вынесено описание алгоритмов и интерфейсов программных комплексов, разработанных в рамках реализации методики, изложенной в главе 2, а также описание используемых численных методов. Программное обеспечение написано на языке Python и использует библиотеки функций обработки данных.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

*Приложения* содержат два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения результатов работы в учебном процессе Самарского государственного технического университета и на предприятии ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара).

### **3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.**

Разработана стохастическая математическая модель, позволяющая более точно и стохастически обоснованно прогнозировать ползучесть и длительную прочность элементов конструкций в широком диапазоне параметров нагружения, в том числе по ступенчатым программам, по начальному участку кривой ползучести, что соответствует парадигме оценки индивидуального ресурса изделия по образцу-лидеру.

### **4. Практическая значимость результатов диссертации.**

Разработанная методика готова к использованию для прогнозирования индивидуального ресурса элементов машин и конструкций в условиях разброса механических свойств неупругих деформаций при эксплуатации объектов по техническому состоянию по деформационным параметрическим и катастрофическим критериям отказов в энергетическом машиностроении, авиадвигателестроении, авиационной промышленности, прогнозирования разрушения деталей в условиях ползучести без дополнительных теоретических исследований.

### **5. Достоверность результатов диссертации.**

Достоверность положений, выносимых на защиту, обеспечивается использованием современных результатов теории стохастических дифференциальных уравнений, адекватной модели ползучести, учитывающей три стадии ползучести и позволяющей спрогнозировать вязкое

разрушение, результаты вычислительной математики и подтверждается слепыми прогнозами деформационного поведения и длительной прочности большого множества сталей и сплавов при высокой температуре, полимерного материала в широком диапазоне монотонных и ступенчатых термомеханических воздействий.

**6. Апробация работы.** Основные результаты диссертации Е. А. Афанасьевой опубликованы в пяти научных журналах из перечня ВАК, индексируемых международными базами цитирования, и докладывалась на девяти международных и всероссийских конференциях по профилю механики деформируемого твердого тела. Полностью работа докладывалась на научном семинаре Самарского государственного технического университета. Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки по проекту в рамках госзадания СамГТУ, результаты которого проходили полноценную научную экспертизу.

### **7. Замечания и вопросы по содержанию работы.**

1. В обзорную часть оказались не включенными идейно близкие работы А.В. Шутова и А.А. Кайгородцевой 2019-2023 гг., в частности, диссертация «Некоторые обратные задачи в теории упругопластического деформирования металлических материалов» последней, защищенной в 2023 г., в которых систематически исследовалось влияние разброса экспериментальных данных на идентификацию констант моделей циклической пластичности/ползучести (рэтчетинга) и множество сопутствующих вопросов.

2. Не вполне чётко описаны программы испытаний материалов, по которым определяются константы моделей (опущен этап нагружения, не сказано о времени выдержки после разгрузки, в течение которой регистрируется деформация).

3. Требуются пояснения относительно нулевой доли обратимых деформаций, определенных для сплава ЭИ437А в табл. 2.2. Из рис. 2.6 она неочевидна (возможно, на зависимости напряжений от времени упругая разгрузка, а возможно — нет, этого не видно).

4. Желательно обосновать использование стохастической линеаризации не только тем, что “стохастически нелинейные определяющие соотношения трудно использовать при решении соответствующих краевых задач”, но и какими-то оценками результатов принятия такой гипотезы.

Указанные вопросы и замечания не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, но требуют комментариев. Замечания в целом не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы.

## 8. Заключение по диссертации.

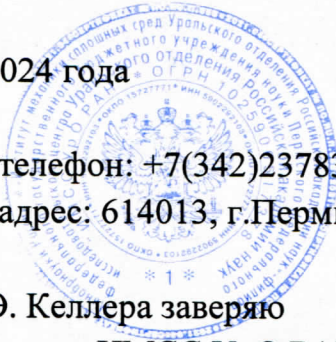
Диссертация представляет собой самостоятельную завершённую научно-квалификационную работу, в которой предложены и реализованы в виде комплексов программ новые более точные и стохастически обоснованные методы прогноза индивидуального ресурса элементов конструкций в условиях ползучести и стохастического разброса неупругих свойств. Диссертационная работа Афанасьевой Елены Андреевны на тему «Стохастические модели прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик элементов конструкций с неупругими свойствами материала» выполнена на высоком научно-методическом уровне и отвечает всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Я, Келлер Илья Эрнстович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент

20 декабря 2024 года



Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(342)2378307 E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614013, г.Пермь, ул. Акад. Королёва, д.1, ИМСС УрО РАН

Подпись И.Э. Келлера заверяю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН

Юрлова Н.А.

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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 диссертации.** Свойства материалов, технологические факторы процесса изготовления, а также внешние воздействия имеют стохастический характер. Аналитические методы решений стохастических краевых задач для структурно–неоднородных материалов хорошо разработаны для линейно упругих сред. Обычно используемые детерминированные методы расчета являются первым и в ряде случаев недостаточным приближением. Например, неточности такого расчета на прочность покрываются назначением коэффициентов запаса прочности, которые во многих случаях не являются оптимальными. Это приводит либо к неиспользованным резервам прочности в реализуемых конструкциях, либо к преждевременному их разрушению. Есть ряд факторов, которые вообще не могут быть учтены и никак не объясняются в рамках детерминированных методов. Также существенным недостатком является малое количество статистических данных, связанное с ограниченностью экспериментальных данных, например, если проведение натурного эксперимента достаточно дорогостояще или невозможно. Поэтому естественным образом возникают задачи построения стохастических математических моделей прогнозирования индивидуальных деформационных и прочностных характеристик элементов конструкций с использованием соответствующих параметрических критериев, разработки методов идентификации параметров этих моделей (как правило, физически и стохастически нелинейных) и создание соответствующих помехозащищенных алгоритмов, разработки необходимого программного обеспечения для численной реализации предложенных моделей и алгоритмов.

Теоретическое решение проблемы индивидуализированной параметризации математических моделей на начальном этапе эксплуатации с возможностью дальнейшего прогнозирования деформационных и прочностных характеристик конкретного элемента конструкции имеет важное значение и для ряда прикладных задач, в частности прогнозирования индивидуального ресурса машин и конструкций по результатам наблюдений за их состоянием в

процессе эксплуатации с использованием схемы непрерывно накапливающихся необратимых повреждений (отказов).

В связи с вышеизложенным, можно констатировать, что рассматриваемая диссертационная работа Е.А. Афанасьевой решает важную и актуальную задачу теоретического характера в области развития методов построения индивидуализированных стохастических моделей с ясными перспективами их использования в прикладных задачах математической теории надежности.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов.**

Диссертационная работа посвящена развитию теоретических вопросов проблемы построения математических моделей в условиях разброса экспериментальных или опытных данных для индивидуального прогнозирования функционирования конструкционных деталей по деформационным и прочностным параметрам. Она включает новые подходы в построении стохастических математических моделей для оценки кинетики деформационных характеристик элементов конструкций в условиях непрерывного накопления необратимых повреждений в области ползучести и трибологии, разработку соответствующих численных методов и алгоритмов идентификации параметров моделей и различных схем индивидуального прогнозирования деформационных и прочностных параметров и создание не имеющего аналога программного обеспечения для численной реализации разработанного в диссертации функционала.

Многочисленные классические стохастические теории со случайными параметрами и функциями, базирующиеся на кинетических уравнениях непрерывного накопления повреждений и отказов, обеспечивают возможность получения решений, которые позволяют оценить показатели надёжности, ориентируясь на генеральную совокупность однотипных изделий. Однако такая информация представляет ограниченные возможности для оценки индивидуального поведения конкретной конструкции. Именно в области «индивидуализации» стохастических математических моделей и получены основные научные результаты соискателем, обладающие научной новизной. Здесь автором работы рассмотрены аналитический подход к построению математических моделей и подход на основе дискретной математики (прогнозирование по изделию-лидеру), где не требуется аналитическое представление для зависимостей, а напрямую используются экспериментальные данные для образца-лидера и конкретного элемента конструкции.

В рамках первого подхода на основе известной в теории ползучести детерминированной модели построен стохастический вариант математической модели теоретически обоснованной заменой детерминированных функций в



детерминированной модели на случайные функции в стохастической модели. Основным вариантом модели (соотношение (2.1) в диссертации и (1) – в автореферате) обладает достаточной общностью, поскольку такими же соотношениями описывается интенсивность отказов для любых объектов в рамках математической теории надёжности на стадиях приработки и стационарного накопления повреждённости.

Одной из ключевых задач «функционирования» феноменологической математической модели является проблема её параметрической идентификации на основе экспериментальных данных. Следует отметить разработанный новый численный метод структурной (количество экспоненциальных слагаемых в решении системы (2.1)) и параметрической (статистические оценки параметров) идентификации основной физически и стохастически нелинейной модели с использованием всего спектра экспериментальных данных. Строго математически полученные оценки математического ожидания и дисперсий параметров для каждой исследуемой реализации являются базовыми для прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик конкретного конструктивного элемента на основе аппарата доверительных интервалов.

Ещё одним результатом, заслуживающим внимания, является обобщение одномерной модели (2.1) для описания деформирования сложных элементов конструкций также на «одномерную» модель, но в координатах «обобщенная нагрузка – обобщенное перемещение».

Возможность этого подхода в достаточной степени проиллюстрирована при построении математической модели для резьбового соединения при ползучести для прогнозирования его индивидуального осевого перемещения в условиях нестационарного силового нагружения осевой нагрузкой и сравнением данных прогноза с реальными экспериментальными данными. Отметим, что решить данную задачу (и другие аналогичные) классическими методами решения стохастических краевых задач невозможно, поскольку для конкретного элемента конструкции неизвестны законы распределения неупругой деформации по объему интегрирования.

Ряд новых результатов получен при разработке дискретных стохастических моделей на основе метода прогнозирования по изделию-лидеру. Соискателем детально проанализированы случаи наличия первой и второй стадий накопления необратимых повреждений и второй и третьей стадий с возможностью прогнозирования не только индивидуальных деформационных характеристик, но и разрушения конкретного конструктивного элемента. Общность разработанных подходов в пределах первой и второй стадий проиллюстрирована на широком спектре примеров: ползучести полимерных и метал-

лических образцов, процессов износа буксы шасси самолета при трении, ползучести резьбового соединения. Для всех рассмотренных примеров интервал времени прогнозирования составляет 2–4 временных интервала по отношению к базовому времени, в рамках которого выполнялась параметрическая идентификация случайных параметров индивидуализированной модели, что является хорошим результатом. Нетривиальный результат получен для растягиваемых полимерных образцов: произвольный выбор образца-лидера при фиксированных напряжении и температуре позволил выполнять прогнозирование деформации конкретных образцов в широком диапазоне силовых и температурных режимов нагружения.

Новым результатом является разработанный метод прогнозирования деформационных характеристик и длительной прочности (времени разрушения) по образцу-лидеру на второй и третьей стадиях накопления повреждений. Показано, что при наличии экспериментальной кривой ползучести образца-лидера для прогнозирования деформации ползучести и времени разрушения любого другого образца достаточно знать лишь экспериментальное значение начальной скорости деформации для этого образца. Этот метод обладает рядом достоинств, во-первых, научно-обоснованно оценивать ресурс элементов конструкций по катастрофическим критериям отказа (разрушении), во-вторых, оптимальным образом планировать экспериментальные или опытные (натурные) исследования.

Также следует отметить, что предложенные в диссертации методы прогнозирования по изделию-лидеру не требуют аналитических подходов, что можно отнести к их достоинствам.

Приведённые примеры сравнения прикладных расчётов с экспериментальным данным подтверждают адекватность разработанных методов, это свидетельствует о правомерности применимости разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения.

Перечислять новые конкретные результаты частного характера рецензент не видит необходимости, поскольку они сформулированы в пунктах «Научная новизна» и «Заключение» диссертационной работы, и они действительно имеют место быть.

Рецензируемое диссертационное исследование соответствует заявленной специальности, поскольку содержит все три составляющих, и, по мнению оппонента, удовлетворяет следующим пунктам направления исследования специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

1) разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки);

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.

Таким образом, суммируя вышеизложенное, можно констатировать, что основные результаты, положения и выводы обладают научной новизной, а диссертационная работа соответствует научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Публикация основных материалов, апробирование работы, оформление.** Основные материалы работы и её результаты достаточно полно отражены в приведенных 13 публикациях автора, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах из библиометрических баз данных Web of Science и Scopus, которые также входят в перечень журналов ВАК. Результаты работы нашли отражение в двух свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней, а также на научном семинаре кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета. К положительным моментам можно отнести то, что часть работы выполнялась в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета (тема №FSSE-2023-0003).

Содержание автореферата полностью отражает идеи, результаты и выводы диссертации. Изложение материала диссертации и автореферата ясное и чёткое, они написаны в строгом академическом стиле. Диссертационная работа в достаточной степени проиллюстрирована результатами расчётов, качество её оформления хорошее. При использовании в тексте результатов других авторов корректно сделаны соответствующие ссылки.

### **Обоснованность и достоверность результатов.**

Полученные результаты, выводы по диссертации, положения научной новизны достоверны, так как базируются на корректно полученных результатах теоретических исследований, корректном использовании основных положений теории вероятностей, математической статистики, регрессионного анализа, вычислительной математики, дифференциальных уравнений, меха-

ники деформируемого твёрдого тела и современных информационных технологий; непротиворечивостью модельных представлений реальному «физическому» (предметному) поведению элементов конструкций с неупругими свойствами материала в стохастическом аспекте в условиях однопараметрического нагружения.

Кроме этого, вывод о достоверности и обоснованности результатов работы подтверждается большим объемом сравнительного анализа данных расчетов по разработанным методам с экспериментальными данными, а также согласованием результатов расчетов с данными из независимых источников.

### **Значимость результатов для науки и практики.**

Полученные в диссертационной работе Афанасьевой Е.А. результаты имеют существенное значение в теоретическом плане в области разработки стохастических математических моделей для прогнозирования индивидуального деформационного ресурса элементов конструкций при эксплуатации по схеме накапливающихся повреждений (по техническому состоянию) в условиях разброса механических свойств неупругой деформации.

Во-первых, поставлены и решены новые задачи параметризации «физически» и стохастически нелинейных индивидуальных моделей для деформируемых материалов и элементов конструкций. Во-вторых, выполнена убедительная проверка адекватности рассмотренных моделей экспериментальным данным для совершенно различных процессов – трения и реологического деформирования. В-третьих, детальный анализ индивидуальных процессов неупругого деформирования для различных конструктивных элементов даёт более широкое представление о месте разработанных методов прогнозирования для конкретной конструкции (единичной реализации) в системе знаний о прогнозировании на основе генеральной совокупности реализаций в задачах оценки ресурса.

С прикладной точки зрения полученные соискателем результаты имеют важное значение как на стадии проектирования, например, деталей энергетического машиностроения и авиадвигателестроения, так и в процессе эксплуатации машин и элементов конструкций при наличии в них процессов трения и ползучести для оценки индивидуального остаточного ресурса, а также для оценки разрушения материалов и механических деталей в условиях ползучести на основе метода прогнозирования по лидеру без дополнительных теоретических исследований. Подтверждением этого является факт внедрения результатов диссертационной работы в расчётную практику ОКБ ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) при проектировании и эксплуатации деталей газотур-

бинных двигателей из жаропрочных материалов, оптимальном планировании экспериментальных исследований жаропрочных сплавов и обработке опытных данных, оценке индивидуального остаточного ресурса элементов конструкций, о чём свидетельствует соответствующий акт о внедрении (Приложение Г). Важным является также использование полученных новых научных результатов в учебном процессе по ряду специальных дисциплин для магистров и аспирантов Самарского государственного технического университета (Приложение В). Предложенные методы идентификации параметров математической модели будут весьма полезны в области искусственного интеллекта, поскольку позволяют учитывать индивидуальные свойства элементов конструкций при эксплуатации. Полученные результаты прогнозирования позволят управлять критическими ситуациями для изделий, анализируя данные испытаний и эксплуатации, чтобы определять и предупреждать возможные необратимые повреждения.

### **Замечания по диссертационной работе.**

Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее, по работе имеются некоторые замечания:

1. Соискателем разработаны разные методы идентификации параметров математической модели для случая первой и второй стадий (глава 2, пункт 2.1) и наличия лишь первой стадии (глава 2, пункт 2.2). Хотя на первый взгляд, вариант, рассмотренный в пункте 2.2, является частным случаем варианта пункта 2.1. Возникает вопрос, чем вызвана разработка двух численных методов и нельзя ли было это объединить в один метод?
2. В главе 3 при реализации метода прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик и времени до разрушения по изделию-лидеру не приводятся доверительные интервалы, хотя во всех остальных примерах они имеются. Чем это вызвано и можно ли выполнить интервальную оценку в этом случае?
3. Как определяется значение  $k_1$ , начиная с которого экспоненциальные составляющие в (2.2) и (2.3) считаются полностью затухающими.
4. Анализировалось ли сколько нужно кривых стационарной ползучести при постоянных напряжениях для получения  $2s+1$  параметра кривой ползучести? Влияет ли на данный подход объем рассматриваемой совокупности?
5. Учитывалась ли скорость нагружения, поскольку достигнуть нужного уровня напряжений можно с разной скоростью?

6. Условием адекватности построенной модели результатам эксперимента можно считать выполнение одного из неравенств (2.33) (аналогично (2.61), (2.62)). Если это не так, то следует переходить к следующему этапу численного метода - использования в модели последующих экспоненциальных составляющих. Почему проверка этих условий после нахождения третьей составляющей не проводится?
7. При построении кривой ползучести исследуемого образца используется зависимость времени от деформации и напряжения, в которую входит феноменологический параметр  $s$ , характеризующий связь истинного  $\sigma$  и номинального  $\sigma_0$  напряжений, но не указаны научные источники или подходы для определения их значений при проведении исследований конкретных материалов?
8. При оформлении формул (1.10), (2.1) допущены технические неточности, которые вводят в заблуждение. Рассмотрение конкретных примеров проясняют этот вопрос.

Сделанные замечания носят частный характер, не снижают достоинств работы и не влияют на общую положительную оценку выполненной диссертационной работы.

#### **Оценка диссертации в целом. Заключение.**

Указанные выше недостатки не снижают теоретическую и практическую значимость основных результатов диссертации. В целом работа выполнена на высоком научном уровне. Анализ результатов исследований, изложенных в диссертации, подтверждает обоснованность сформулированных автором научных положений, выводов и рекомендаций. Основные результаты в полном объёме освещены в публикациях соискателя. На основании вышеизложенного рассматриваемая диссертационная работа Афанасьевой Елены Андреевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи – разработка новых методов построения стохастических индивидуальных математических моделей для прогнозирования деформационных и прочностных характеристик конкретного элемента конструкции, алгоритмов и программного обеспечения для реализации предложенных математических моделей, которые востребованы научной практикой в механике деформируемых материалов и тел и других отраслях науки.

Работа является законченным научным исследованием, выполнена соискателем самостоятельно, отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Афанасьева Елена Андреевна, заслу-

живает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (05.13.18), доцент, профессор кафедры механики и компьютерного моделирования, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

«10» декабря 2024 г.

Минаева Надежда Витальевна

*Согласна на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Афанасьевой Елены Андреевны.*

Служебный адрес:

394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1.

Тел.: +7 (473) 228-11-60(1430), +7 9102498477

E-mail: [nminaeva@yandex.ru](mailto:nminaeva@yandex.ru)



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
письмо	
Афанасьевой Е.А.	
начальник отдела кадров	обязанность
З.И.	О.И. Зверева 10.12.24
расшифровка подписи	20