

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», д.т.н.



Власов А.Н.

19.11.2016 г.

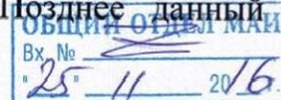
ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Леонова Сергея Сергеевича на тему «Математическое моделирование задач механики деформируемого твердого тела и численные методы их решения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

В диссертационной работе Леонова С. С. проводятся исследования, посвященные разработке методов построения моделей, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными или граничными условиями, а также методов численного исследования подобных моделей, уравнения которых содержат предельные особые точки, т. е. являются плохо обусловленными. Для построения моделей используются методы нейросетевого моделирования, а для численного решения плохо обусловленных начальных задач предложено развитие метода продолжения решения по параметру и наилучшей параметризации. В качестве тестовых задач рассмотрен расчет длительной прочности металлических конструкций, работающих в условиях ползучести.

Актуальность темы исследования

В ряде задач механики деформируемого твердого тела приходится сталкиваться с построением замкнутых кривых решения или кривых, содержащих предельные особые точки. К подобным задачам можно отнести нелинейные краевые задачи теории упругости, например задачи устойчивости оболочек, задачи моделирования гистерезиса при колебании механических систем и другие задачи как статического, так и динамического нелинейного деформирования. Для решения подобных задач академиком И. И. Воровичем был предложен метод перехода к задаче Коши, заключающийся в использовании нового параметра продолжения решения, в предположении, что все переменные задачи зависят от него. В качестве хорошего параметра продолжения И. И. Воровичем указан параметр, отсчитываемый вдоль интегральной кривой рассматриваемой задачи Коши. Позднее данный подход



подробно исследовался в работах голландского инженера E. Riks'a. Активное развитие данный метод получил в работах Э. И. Григолюка, В. И. Шалашилина и их учеников, в которых исследовано множество новых задач, связанных с прохождением особых точек различного ранга, и рассмотрено множество приложений указанного подхода к решению задач механики, например к вычислению больших прогибов арок и оболочек, задачам колебания пластин и оболочек и прочее. Обобщение указанного метода на решение начальных и граничных задач для систем обыкновенных дифференциальных, дифференциально-алгебраических, интегро-дифференциальных и интегро-дифференциально-алгебраических уравнений сделано в работах В. И. Шалашилина и Е. Б. Кузнецова. Ими получены необходимые и достаточные условия выбора наилучшего параметра продолжения решения, доставляющего системе уравнений продолжения наилучшую обусловленность. Показана эффективность данного метода при решении различных задач механики, физики, теории управления и т. д. Продолжением исследований в этом направлении является диссертационная работа Леонова С. С., посвященная приложению метода продолжения решения по параметру и наилучшей параметризации к решению задач ползучести и длительной прочности, описываемых плохо обусловленными задачами Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с одной и двумя предельными особыми точками.

Одной из важнейших задач в машиностроении, самолетостроении и аэрокосмической отрасли в целом является задача определения прочностных характеристик конструкции и ее остаточного ресурса. В большом количестве случаев конструкции работают в условиях высоких температур при сложном напряженном состоянии (например диски турбин авиационных двигателей) и необходимо учитывать неупругое деформирование, а именно пластические деформации и ползучесть материала, в противном случае прогнозируемые прочностные характеристики могут значительно отличаться от реальных. На сегодняшний день не существует общей теории ползучести и нет единого подхода к описанию данного явления. Существует большое количество моделей, описывающих различные стадии ползучести. Из-за сложности описываемого процесса все модели ползучести содержат несколько настраиваемых параметров (скалярных, векторных или тензорных в зависимости от конкретной модели). И одной из основных задач при моделировании ползучести является разработка методологии идентификации предложенных моделей. Леоновым С. С. в диссертационной работе предложена унифицированная методология идентификации моделей ползучести, не зависящая от вида определяющих уравнений ползучести.

Таким образом, учитывая все вышесказанное, а также то, что задачи ползучести приобретают все большее число приложений в различных технологических задачах, начиная от изготовления деталей машин при высокотемпературных режимах до прогнозирования разрушения конструкционных элементов, можно заключить: задача разработки новых методов решения плохо обусловленных задач Коши, а также методов идентификации моделей, описываемых такими задачами, и их приложение к

решению задач неупругого деформирования с учетом ползучести является **актуальной и востребованной.**

Содержание работы

Во введении дан краткий обзор литературы по теме исследования, поставлены цели и задачи работы, обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается решение нескольких одномерных тестовых задач определения длительной прочности конструкций деформируемых в условиях ползучести при постоянной температуре под действием различных нагрузок. Для моделирования рассматриваемых задач используются уравнения кинетической теории ползучести.

В первой части главы рассматриваются конструкции без начального упрочнения, проблема определения длительной прочности для которых описывается начальными задачами для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с одной предельной особой точкой. В качестве примера рассмотрены две задачи одноосного растяжения образцов из стали X18H10T и титанового сплава ОТ-4 соответственно. Для данных задач показана применимость явных методов численного решения задачи Коши, вычислены время счета и относительная погрешность численного решения, в том случае, когда это возможно.

Во второй части первой главы рассмотрены конструкции с начальным упрочнением из стали 45 и титанового сплава ЗВ, для которых процесс деформирования с учетом ползучести сводится к решению задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с двумя предельными особыми точками. Для данного класса задач явные методы решения малоприменимы. Предложенные же для решения данных задач неявные схемы имеют ряд недостатков, связанных с решением систем нелинейных уравнений, что приводит как к увеличению времени счета, так и снижению точности численного решения. При этом условия сходимости используемого в диссертации метода простых итераций накладывают ограничения на шаг интегрирования.

Для преодоления трудностей, возникающих при решении задач ползучести для конструкций с начальным упрочнением, во второй главе предложено использование преобразования исходной задачи к новому аргументу, отсчитываемому вдоль интегральной кривой рассматриваемой задачи. Используемый аргумент называется наилучшим. Ранее, применительно к системам обыкновенных дифференциальных уравнений, он исследовался в работах В. И. Шалашилина и Е. Б. Кузнецова, в которых доказано что наилучший аргумент доставляет решаемой задаче наилучшую обусловленность. При расчете упрочняющихся конструкций переход к наилучшему аргументу позволил получить задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с ограниченными правыми частями и использовать для ее решения явные методы, что дало возможность существенно сократить время счета и погрешность вычислений. Помимо видимых преимуществ преобразования к

наилучшему аргументу, в диссертационной работе отмечаются и его недостатки, к которым относится значительное усложнение вида преобразованной задачи по сравнению с исходной.

В третьей главе вводится новый аргумент продолжения решения, названный модифицированным наилучшим, получаемый из наилучшего аргумента путем преобразования специального вида. Применение нового аргумента нацелено на получение более простого вида преобразованной задачи по сравнению с использованием наилучшего аргумента, при этом требование ограниченности правых частей уравнений системы сохраняется. Применительно к задачам ползучести предложено использовать модифицированный наилучший аргумент специального вида, который позволяет получить более простой вид преобразованной задачи Коши, что приводит, даже по сравнению с наилучшим аргументом, к уменьшению времени счета при сохранении точности решения. Важной задачей является оценка обусловленности преобразованной задачи Коши, полученной при использовании модифицированного наилучшего аргумента. В диссертационной работе получено выражение для отклонения направления отсчета наилучшего аргумента от его модификации, которое используется для оценки обусловленности преобразованной модифицированным аргументом задачи. Кроме того, доказана единственность наилучшего аргумента в классе модифицированных аргументов специального вида.

В четвертой главе рассмотрены два класса задач. Первый класс – это задачи идентификации моделей ползучести с использованием экспериментальных данных, второй класс – граничные задачи ползучести с не полностью заданными граничными условиями. Для решения задач обоих классов используется аппарат нейросетевого моделирования.

В первой части главы изучены модели растяжения образцов из стали 45 и титанового сплава 3В при постоянных напряжениях. Относительная погрешность результатов моделирования по отношению к эксперименту значительно меньше по сравнению с результатами других авторов. В конце четвертой главы рассмотрена задача определения установившегося напряженно-деформированного состояния в сплошном равномерно прогретом вращающемся диске турбины постоянной толщины из сплава ОТ-4, сводящаяся к решению граничной задачи с не полностью заданными граничными условиями. Нейросетевое моделирование позволило найти приближенное решение данной задачи без привлечения дополнительной информации о протекании процесса деформирования.

В заключении сформулированы результаты исследования.

Основные результаты

В диссертационной работе Леонова С. С. получен ряд важных новых результатов. Во-первых, дан алгоритм применения наилучшей параметризации к задачам ползучести, описываемым определяющими уравнениями кинетической теории, и показана эффективность данного метода применительно к классу задач, описывающих деформирование упрочняющихся конструкций вплоть до разрушения,

сводящихся к системам обыкновенных дифференциальных уравнений с двумя предельными особыми точками. Переход к наилучшему аргументу в задачах ползучести позволил значительно упростить численное решение указанных задач, а также уменьшить погрешность численного решения. Во-вторых, диссертантом предложен новый аргумент продолжения решения, который позволяет получить более простой вид параметризованной задачи. Применительно к задачам ползучести новый аргумент сводит исходную задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с более простыми правыми частями, решение которой удастся получить гораздо проще и быстрее. Также в диссертации предложен метод оценивания обусловленности задач, полученных с использованием нового аргумента продолжения. В-третьих, для идентификации характеристик ползучести, входящих в определяющие уравнения ползучести, предложено использовать методологию нейросетевого моделирования, что дало возможность сформулировать унифицированный алгоритм нахождения параметров модели ползучести, не зависящий от вида используемых уравнений, что продемонстрировано для ряда моделей. Помимо этого разработан комбинированный метод нейронных сетей и продолжения решения по параметру, позволяющий проводить обучение нейронных сетей за меньшее время. Также показано преимущество нейросетевой методологии для решения некорректных задач, возникающих при расчете ползучести конструкций.

Достоверность и степень обоснованности полученных результатов

Достоверность результатов диссертационной работы не вызывает сомнения, так как, во-первых, для большинства рассматриваемых задач приводятся аналитические решения, которые сравниваются с результатами расчета, а также вычисляется относительная погрешность результатов. Во-вторых, полученные в диссертации расчетные данные сопоставляются с экспериментальными и расчетными данными, полученными другими авторами.

То же самое можно сказать и об обоснованности выводов и теоретических результатов диссертации, так как все они снабжены подробными доказательствами, проводимыми с использованием адекватного математического аппарата. Таким образом, результаты диссертации являются достоверными и в достаточной степени обоснованными.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в использовании нового модифицированного наилучшего аргумента, эффективность которого показана для задач ползучести. Для модифицированного наилучшего аргумента предложен способ оценки обусловленности преобразованных им задач Коши. Также доказана единственность наилучшего аргумента в классе рассматриваемых в диссертации модифицированных аргументов специального вида.

В основном же результаты диссертации направлены на решения практических задач. Помимо задач ползучести, продолжение решение по наилучшему аргументу и его модификации может применяться для решения подобных плохо обусловленных задач, возникающих в физике, химии, биологии и т. д., жестких задач, например задач химической кинетики, моделирования гистерезиса, построения замкнутых кривых, на которых содержатся особые точки, исследования деформирования и устойчивости оболочек и арок, а также других аналогичных задач.

Практическую ценность увеличивает наличие разработанного автором комплекса программ, в рамках которого реализованы традиционные явные методы решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а также алгоритм наилучшей параметризации. С использованием данного программного комплекса можно решать указанные выше практические задачи с выводом графического или табличного результата.

Также большое число приложений может найти метод нейросетевого моделирования. Для моделей ползучести этот метод позволяет вне зависимости от вида определяющих уравнений получать параметры модели с использованием результатов эксперимента. Это приводит к увеличению выбора моделей для описания процесса ползучести. Помимо этого, нейросетевое моделирование может быть применено в аналогичных коэффициентных обратных задачах, например в задачах теплопереноса. Одновременно показано, что нейросетевой метод можно также применять для решения некорректных задач, что расширяет область его применения.

Замечания:

1. В работе для описания процесса ползучести используются уравнения кинетической теории ползучести. Не пояснены причины выбора именно кинетической теории. Возможно, при оценки длительной прочности лучший результат дало бы использование одного из критериев длительной прочности или одной из многочисленных альтернативных теорий, например теории наследственности.
2. Для идентификации параметров модели для сплава 3В используется аналитическое решение. По сути, идентификация параметров модели в этом случае сводится к вариационной задаче, которую и следовало бы решать методами вариационного исчисления, поэтому применение нейросетевого моделирования в данном случае не ясно.
3. При записи решения рассматриваемых в диссертации задач используется четыре знака после запятой, а при идентификации параметров модели выписывается до семи знаков. На практике же, из-за сложности описываемого процесса, обычно используется не более трех знаков после запятой.

Общая оценка работы

Диссертационная работа С.С. Леонова является законченной научно-квалификационной работой, в которой разрабатываются новые численные методы решения задач, которые на сегодняшний день являются актуальными и находятся в русле современных исследований в области прикладной механики. Актуальность и значимость результатов диссертации подтверждается также публикациями автора в 6 рецензируемых журналах, в том числе и в одном из ведущих отечественных журналов – «Прикладная механика и техническая физика». Помимо этого, результаты диссертации обсуждались на многочисленных международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, в том числе на XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики и 13th International Symposium on Neural Networks.

Диссертация изложена ясным языком, логично и последовательно. Автореферат отражает содержание диссертации в достаточной степени.

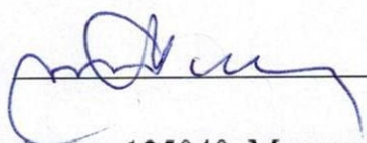
Сделанные замечания не являются существенными и не уменьшают общей значимости и новизны полученных результатов.

Заключение по диссертационной работе

Учитывая вышесказанное, диссертационная работа Леонова Сергея Сергеевича на тему «Математическое моделирование задач механики деформируемого твердого тела и численные методы их решения» удовлетворяет как паспорту специальности, так и требованиям ВАК при Министерстве образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а Леонов Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа Леонова Сергея Сергеевича обсуждена на научном семинаре отдела механики адаптивных композиционных материалов и систем ИПРИМ РАН « 18 » октября 2016 года, протокол № 09/16 .

Отзыв составил зам. директора ИПРИМ РАН по научной работе, д.ф.-м.н.

 Данилин А.Н.

Адрес: 125040, Москва, Ленинградский проспект, д. 7,
тел.: +7(495)946-18-06,
e-mail: iam@iam.ras.ru.