

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

**Леонова Сергея Сергеевича**

«Математическое моделирование задач механики деформируемого твердого тела и численные методы их решения»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация С. С. Леонова посвящена разработке методов численного решения и идентификации задач, математические модели которых представляют собой плохо обусловленные задачи Коши для нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Апробация предложенного подхода выполнена на задачах определения деформационно-прочностных характеристик металлических конструкций, работающих в условиях высокотемпературной ползучести.

### 1. Актуальность темы исследования

Актуальность представленной С.С.Леоновым диссертации очевидна. Она обусловлена тремя основными моментами.

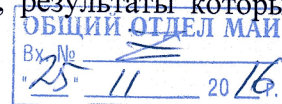
Во-первых, в работе реализована возможность применения метода непрерывного продолжения к решению задач Коши, на траектории решений которых присутствуют особые точки в виде предельных по аргументу точек. По сравнению с применяемыми в настоящее время неявными схемами численного решения таких задач, разработанный алгоритм, использующий как наилучший параметр продолжения, так и близкий к нему, позволяет применять явные схемы. Это существенно повышает точность и устойчивость решения и даёт заметную экономию по времени его построения.

Во-вторых, разработанный алгоритм решения задач Коши применён к решению важных задач высокотемпературной ползучести металлических образцов в одномерном случае, на траекториях деформирования которых наблюдаются предельные точки, соответствующие как моменту начала процесса ползучести, так и моменту разрушения образца.

В-третьих, отдельный интерес представляет решение вопроса об идентификации параметров математических моделей процесса ползучести. В рамках кинетической теории ползучести и её модификации в виде энергетического подхода эти параметры традиционно подбираются по экспериментально полученным траекториям деформирования образцов. Поэтому применение нейросетевого моделирования, позволяющего получать высокую степень согласованности экспериментальных и рассчитываемых траекторий деформирования, является актуальным.

### 2. Степень достоверности и обоснованности полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов в диссертации обеспечивается корректным использованием основных положений кинетической теории высокотемпературной ползучести и современных методов вычислительной математики. Она подтверждается многочисленными вычислительными экспериментами, результаты которых со-



поставлены с имеющимися аналитическими решениями рассматриваемых задач, результатами других авторов и экспериментальных исследований.

Все теоретические положения работы, касающиеся оценки сходимости метода итераций при применении неявных схем решения задачи Коши, обоснования применения параметра продолжения, близкого к наилучшему, и возможности применения нейросетевого моделирования при идентификации параметров математических моделей процесса высокотемпературной ползучести изделий из металла, в достаточной степени обоснованы.

### **3. Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Метод непрерывного продолжения по наилучшему параметру и близкому к нему впервые применён для решения задач длительной прочности металлических конструкций в условиях ползучести.
2. Выполненное диссертантом исследование задачи выбора параметра продолжения, который, не являясь наилучшим, давал бы выигрыш по времени выполнения расчётов, является первым систематическим исследованием в этой области.
3. Подход к идентификации параметров теоретико-экспериментальных моделей процесса высокотемпературной ползучести, основанный на приёмах совместного применения нейросетевого моделирования и метода непрерывного продолжения, несомненно, является новым.

### **4. Теоретическая и практическая значимость результатов исследования**

Теоретическая значимость работы заключается в разработанном подходе выбора параметров продолжения решения, близких к наилучшему. В частности, она заключается во введении понятия точек локальной неэквивалентности и меры сопоставления обусловленности задач, решаемых методом непрерывного продолжения.

Практическая значимость работы заключается в возможности непосредственного применения разработанного комплекса программ, который защищён свидетельством госрегистрации Федеральной службы по интеллектуальной собственности, для решения задач высокотемпературной ползучести одномерных элементов различных инженерных конструкций. Кроме этого, следует отметить возможность его встраивания в существующие конечно-элементные комплексы, используемые для статического расчёта инженерных конструкций, в том числе для расчёта на длительную прочность.

### **5. Публикации и апробация работы**

По теме диссертации С.С.Леоновым опубликовано 28 печатных работ, 6 из которых размещены в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а на разработанный пакет прикладных программ получено свидетельство о государственной регистрации. Материалы работы были представлены на 18-ти научных конференциях, в том числе на 14-ти международных.

Автореферат диссертации и опубликованные статьи автора дают правильное и достаточно полное представление о диссертации.

## 6. Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний по диссертации следует отметить следующее.

1. Выбор объектов – образцов при равномерном одноосном растяжении, на примере которых строятся алгоритмы решения плохо обусловленных задач, неудачен. Во-первых, практически все рассмотренные задачи допускают аналитические решения. Во-вторых, для численного решения этих задач достаточно сменить независимую переменную – время на деформацию или параметр поврежденности, и особенность задач исчезает. В результате создается впечатление, что применение здесь такого мощного аппарата, как метод продолжения, избыточно.
2. В диссертации не до конца проанализированы причины обнаруженной экономии времени построения решений в случае применения параметра продолжения, близкого к наилучшему. В некоторых случаях она достигает 4-х раз. На самом деле, в случае применения этого параметра продолжения за счёт уменьшения количества операций для вычисления правых частей системы разрешающих уравнений возможно уменьшение времени расчётов до 17%. Однако применение такого параметра продолжения приводит к ухудшению обусловленности каждой рассматриваемой задачи: мера сопоставления обусловленности для всех рассмотренных случаев всегда положительна. Поэтому количество шагов для построения каждой траектории решений должно увеличиться по сравнению с традиционным подходом, а это должно уменьшить 17%-ю экономию времени или полностью её компенсировать и привести к увеличению потребного для расчётов времени.

## 7. Заключение

Переходя к оценке диссертации, следует отметить, что высказанные замечания имеют целью дать автору диссертации рекомендации в его дальнейшей работе и не снижают общей положительной оценки самой диссертации. Она является законченной, самостоятельной научно-исследовательской работой, обобщающей результаты исследований автора в области математическое моделирование задач высокотемпературной ползучести и численных методов их решения.

Диссертационная работа С. С. Леонова **соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:**

1. Разработан новый подход к численному решению плохо обусловленных задач Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений, основанный на применении метода непрерывного продолжения по параметру, близкому к наилучшему.
2. Для построения моделей неупругого деформирования металлических конструкций в условиях высокотемпературной ползучести предложен комбинированный подход, основанный на одновременном применении нейросетевого моделирования и метода непрерывного продолжения по параметру.
3. Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс, реализующий численные методы, предложенные в диссертации.

