

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией Нелинейной механики деформируемого твёрдого тела «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук Келлера Ильи Эрнстовича
на диссертационную работу ФАН ТУНГ ШОН
«ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОУПРУГОМ СЛОЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ»,
представленную к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Общая характеристика и актуальность работы

Диссертация посвящена исследованию связанных нестационарных процессов в термоупругом слое (стержне) и решению для данного объекта коэффициентных обратных задач на основе технологий глубокого машинного обучения с использованием физически информированных нейронных сетей.

Актуальность работы обусловлена следующими аспектами. Во-первых, волновые процессы в термоупругих средах лежат в основе ряда методов неразрушающего контроля и термоакустической диагностики, что особенно важно при оценке состояния ответственных элементов конструкций, работающих в условиях воздействия нестационарных температурных полей. Во-вторых, классические подходы к решению обратных термоупругих задач (вариационные методы, методы регуляризации, градиентные и итерационные алгоритмы) очень ресурсоемки и чувствительны к шумам измерений. В-третьих, развитие физически информированных нейронных сетей и нейросетевых аппроксиматоров производных создаёт предпосылки для построения эффективных схем решения прямых и обратных задач, интегрирующих экспериментальные данные и аналитические или численные постановки задач и их решения для процедуры обучения.

На этом фоне диссертационная работа, объединяющая строгие постановки задач термоупругости для слоя с современным аппаратом глубокого машинного обучения, представляется своевременной и соответствует переднему краю исследований как в области механики

деформируемого твёрдого тела, так и вычислительной математики и глубокого машинного обучения.

2. Цели, задачи и место работы в современной тематике

Целью диссертационной работы является разработка и исследование математических моделей и вычислительных методов, основанных на технологиях глубокого машинного обучения, для изучения волновых процессов в термоупругом слое и решения коэффициентных обратных задач по ограниченному набору наблюдений.

Для достижения поставленной цели автор решает комплекс взаимосвязанных задач, в числе которых:

- построение корректных математических постановок задач для описания связанных нестационарных процессов в термоупругом слое и обезразмеривание уравнений;
- получение референтных решений задач с помощью аналитических и численных методов для последующей валидации нейросетевых моделей;
- разработка архитектур физически информированных нейронных сетей для решения прямых задач и анализ влияния структуры сети, выбора активаций, нормирования переменных и параметров функционала потерь;
- постановка и решение обратных коэффициентных задач или характеристик внешнего термомеханического воздействия по данным в ограниченном числе точек пространства и моментов времени;
- исследование устойчивости получаемых решений к шумам в данных, к неполноте наблюдений и к вариациям априорной информации.

По своему содержанию работа находится на пересечении теории термоупругости, теории обратных задач и зарождающейся области «механика + глубокое обучение». Автор демонстрирует хорошее владение как методами аналитического и численного решения задач механики деформируемого твёрдого тела, так и современным инструментарием нейросетевого моделирования, что позволяет ему органично вписать полученные результаты в современный научный контекст.

3. Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Предложен комплекс математических постановок нестационарных связанных линейных волновых задач для термоупругого слоя,

ориентированный на применение методов физически информированных нейронных сетей с исследованием.

2. Разработаны и исследованы варианты физически информированных нейронных сетей для задач термоупругости, в которых в функционал потерь включаются невязки по уравнениям движения, теплопереноса, граничным и начальным условиям, что позволяет существенно сократить объём требуемых данных и отказаться от явной аппроксимации производных по сетке.

3. Поставлены и решены обратные коэффициентные задачи, использующие данные наблюдений в конечном числе точек с учётом шумов. Показана возможность достаточно точного восстановления параметров даже при ограниченном объёме информации, поступающей с одного виртуального датчика.

4. Проведено систематическое сравнение нейросетевых решений с результатами, полученными аналитическими и численными методами, что позволяет рассматривать разработанные подходы как альтернативу традиционным методам решения термоупругих задач.

Указанные результаты выходят за рамки простого переноса известных методов физически информированных нейронных сетей на термоупругую задачу: автор последовательно адаптирует и настраивает нейросетевой подход с учетом специфики связанной системы уравнений термоупругости и рассматриваемых нестационарных задач.

4. Оценка достоверности и обоснованности результатов

Достоверность результатов обеспечивается следующими средствами.

- Используемые в работе математические модели опираются на классические линейные связанные уравнения термоупругости для слоя конечной толщины и краевые условия, постановка которых не вызывает вопросов с точки зрения механики деформируемого твёрдого тела.

- Для валидации нейросетевых решений автор строит референтные решения классическими аналитическими и численными методами. Сопоставление даётся в виде количественных оценок погрешности и графических сравнений, позволяющих проследить поведение решения как во времени, так и по пространственной координате, отдельно по перемещению и температуре.

- Отдельное внимание уделяется влиянию уровня шума в данных на точность восстановления параметров.

- Анализ сходимости приводится для функционала потерь и невязке.

В совокупности это обеспечивает достоверность и обоснованность полученных результатов.

5. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов решения прямых и обратных задач для связанных уравнений механики деформируемого твёрдого тела и теплового баланса с использованием физически информированных нейронных сетей. Предложенные в диссертации постановки и алгоритмы могут быть перенесены на более широкий класс задач: динамику многослойных термоупругих сред, учёт различных моделей теплопереноса (включая обобщённые модели типа Максвелла–Каттанео, Грина–Нагди и др.), задачи с анизотропией и неоднородностью свойств.

Практическая значимость связана с возможностью применения разработанных подходов

- при обработке данных нестационарных термомеханических и ударно-волновых испытаний элементов конструкций с целью уточнения эффективных механических и теплофизических характеристик материалов и выявления дефектов;

- при построении элементов цифровых двойников изделий, работающих в условиях сложного термомеханического нагружения, для которых требуется оперативно подстраивать численные модели под текущие данные датчиков.

Таким образом, полученные результаты могут быть востребованы в ряде областей: от авиационного материаловедения и машиностроения до энергетики и инженерной диагностики.

6. Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация имеет логичную структуру и включает введение, четыре главы основного содержания, заключение и список литературы.

Во введении сформулированы актуальность темы, цели и задачи исследования, показано место работы среди существующих исследований по термоупругости и машинному обучению, кратко описаны научная новизна и практическая значимость, приведены данные об апробации и публикациях.

Здесь же приведён аналитический обзор литературы по волновым задачам термоупругости для слоёв и пластин, по обратным задачам идентификации параметров материалов в термомеханических постановках, а

также по современным методам машинного обучения, применяемым к дифференциальным уравнениям и обратным задачам. Обзор обосновывает область исследования диссертации.

В первой главе подробно изложены математические постановки прямых задач для термоупругого слоя: выписаны исходные уравнения движения и теплопереноса, граничные и начальные условия, выполнен переход к безразмерной форме, обсуждаются вопросы корректности постановки и свойства решений.

Во второй главе изложены классические аналитические и численные методы применительно к построению референсных решений (схемы конечных разностей, интегральные представления через функции Грина и др.), а также подходы к генерации искусственных данных для решения обратных задач.

В третьей главе приводятся описания нейросетевых реализаций решения прямых нестационарных задач термоупругости. Описываются архитектуры физически информированных нейронных сетей, структура функционалов потерь (включая вклад уравнений термоупругости), алгоритмы обучения и их модификации.

В четвертой главе ставятся и решаются обратные коэффициентные задачи восстановления каждой из двух констант связности уравнений термоупругости по данным наблюдений термомеханических воздействий в конечном числе точек, анализируется влияние шума и неполноты данных, даются количественные оценки точности и устойчивости решений.

В заключении подводятся итоги и формулируются основные научные результаты.

Диссертация изложена ясным для механика языком, снабжена выводами составляющих новизну численных схем, приводимые результаты иллюстрируются графически.

7. Апробация и публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в шести статьях, четыре из которых опубликованы в рецензируемых и реферируемых базах Scopus журналах, а две — в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ. Кроме того, результаты работы докладывались на пяти конференциях по механике. Это свидетельствует о достаточной апробации полученных результатов.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Во введении подчеркивается потенциальная эффективность применения методов глубокого машинного обучения с физической информированностью для решения нелинейных волновых задач. В работе эти методы применены к линейным задачам. Поэтому интересует квалифицированное мнение автора относительно проблем адаптации разработанных методов к нелинейным задачам динамики.

2. Обзорная часть, и список литературы — процентов на 95, посвящены обсуждению применения методов нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений в частных производных. При этом обратным коэффициентным задачам, к которым в диссертации этот метод также применяется, не уделено должного внимания. В частности, в списке литературы отсутствуют работы А.О. Ватульяна и его сотрудников по этой теме. Также сообщу о существовании работ А.В. Шутова и А.А. Кайгородцевой 2019-2023 гг., в частности, диссертации «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 и множество сопутствующих вопросов, а также В.П. Радченко и Е.А. Афанасьевой 2022-2024 гг., в частности, диссертации «Стохастические модели прогнозирования индивидуальных деформационных характеристик элементов конструкций с неупругими свойствами материала» последней, защищенной в 2025 г.

4. При решении обратных коэффициентных задач автор решил определять именно коэффициенты, отвечающие за связанность полей упругих перемещений и температуры. Но при этом было бы любопытно сперва увидеть отличия решений рассматриваемых связанных и несвязанных задач. Насколько эти коэффициенты определяют поведение в рассматриваемых задачах?

5. Как можно объяснить вертикальные всплески на кривых зависимости среднеквадратического отклонения или функции потерь, сопутствующие сходимости метода?

Отмеченные замечания не снижают научной ценности работы и воспринимаются как возможные направления её дальнейшего развития.

Автореферат написан согласно требованиям ВАК и адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Фан Тунг Шон «Исследование волновых процессов в термоупругом слое с применением технологий глубокого машинного обучения» представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, в котором решён комплекс прямых и обратных актуальных задач нестационарных связанных задач термоупругости с использованием современных технологий глубокого машинного обучения.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела». Совокупность полученных автором результатов обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, а сами результаты достоверны и обоснованы.

Считаю, что диссертация и автореферат соответствуют требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с учётом последующих изменений), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы, Фан Тунг Шон, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией Нелинейной
механики деформируемого твёрдого тела
«Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии
наук» (ИМСС УрО РАН) – филиала ФГБУН
Пермского федерального исследовательского
центра Уральского отделения Российской
академии наук



**Келлер Илья
Эрнстович**

Адрес: 614013, г. Пермь, ул. акад. Королёва, д.1, телефон: +7(342)2378307
E-mail: kie@icmm.ru

Подпись Келлера Илья Эрнстовича заверяю

Учёный секретарь ИМСС УрО РАН, кандидат физико-математических наук



Юрлова Наталия Алексеевна

29.12.2025

С отзывом ознакомлен
30.12.2025
