



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН).

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02

Факс (831) 416-06-16

E-mail: dir@ipfran.ru

http://www.ipfran.ru

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,

ИНН/ КПП 5260003387/526001001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук»,
академик РАН, доктор физико-математических наук



Денисов Г.Г.

« 12 » 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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»

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН на протяжении многих лет ведёт фундаментальные и прикладные исследования в области механики деформируемого твёрдого тела, волновых процессов в сплошных средах, распространения акустических и упругих волн, а также разработки методов математического моделирования и обработки данных, в том числе с использованием современных вычислительных технологий. Тематика диссертационной работы Фан Тунг Шона непосредственно соприкасается с направлением исследований коллектива ИПФ РАН, связанного с волновыми процессами в функционально сложных средах и решением обратных задач диагностики.

Актуальность и общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена исследованию волновых процессов в термоупругом слое и решению обратных задач по идентификации параметров материала с использованием технологий глубокого машинного обучения, в первую очередь — физически информированных нейронных сетей.

В условиях интенсивного развития высокотемпературных и высоконапряжённых конструкций, широкого применения композитов, аддитивных технологий и новых функциональных материалов задачи термомеханического

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
ПРОЦЕДУРА РАБОТЫ С
ДОКУМЕНТАМИ МАИ

«25» 12 2025

анализа становятся всё более сложными. Прямые численные модели, основанные только на классических методах, зачастую оказываются вычислительно затратными, а традиционные подходы к решению обратных задач требовательны к качеству и объёму экспериментальных данных.

Использование гибридных схем, объединяющих строго заданную математическую модель термоупругости и аппарат глубокого обучения, открывает новые возможности для построения моделей, способных работать с неполной и зашумлённой информацией и при этом учитывать фундаментальные законы механики и теплопереноса. В этом контексте работа Фан Тунг Шона является актуальной и соответствует современным тенденциям развития вычислительной механики и научного машинного обучения.

Содержание и структура диссертации. Диссертация имеет традиционную структуру, включает введение, несколько глав основного содержания, заключение и библиографию.

Во введении автор формулирует цель и основные задачи исследования, обосновывает актуальность темы, указывает круг практических приложений и кратко описывает научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

В первой части работы дан подробный обзор литературы по вопросам термоупругих волновых процессов, по постановкам задач для термоупругих слоёв, а также по современным подходам к решению дифференциальных уравнений с использованием нейронных сетей. Обзор аккуратно структурирован, чётко выделены классические результаты и последние достижения в области PINN-подходов и смежных методов.

Во второй части работы формулируются математические модели, используемые в дальнейшем. Автор выписывает систему уравнений линейной термоупругости для слоя, задаёт граничные и начальные условия, вводит безразмерные переменные и параметры. Отдельно обсуждаются особенности волновых режимов и типы возбуждения, представляющие интерес с точки зрения обратных задач.

Далее описываются используемые классические аналитические методы и численные схемы (в частности, сеточные методы и подходы, основанные на функциях Грина), которые служат эталоном для проверки качества нейросетевых решений и источником синтетических данных.

Значительная часть диссертации посвящена построению и исследованию нейросетевых моделей. Подробно описаны варианты архитектур, структура функционала потерь с учётом уравнений термоупругости и граничных условий, обсуждаются вопросы масштабирования переменных, выбора обучающих выборок и организации расчёта градиентов. Автор предлагает несколько модификаций базового PINN-подхода, ориентированных на лучшую сходимость и устойчивость в термоупругих задачах.

В заключительных главах поставлены и решены обратные задачи: по показаниям датчиков (механическим и температурным) в ограниченном числе точек и при наличии шума восстанавливаются параметры термоупругого слоя и характеристики нагружения. Приведены численные примеры,

демонстрирующие возможности метода по разделению влияния разных параметров и оценке чувствительности отклика системы к их изменению.

В заключении автор суммирует основные результаты, формулирует выводы и указывает перспективы развития работы, в том числе в направлении более сложных моделей теплопереноса и многослойных структур.

Научная новизна и значимость результатов. К числу наиболее существенных научных результатов, представленных в диссертации, можно отнести:

- построение и проработку математических постановок для прямых и обратных задач термоупругих волновых процессов в слое, ориентированных на интеграцию с нейросетевыми методами;

- разработку вариантов физически информированных нейронных сетей для решения задач термоупругости, в которых в функционал потерь последовательно включаются невязки по уравнениям движения, теплопереноса и граничным условиям;

- реализацию процедур идентификации параметров материала по ограниченному набору наблюдений, в том числе при существенных уровнях шумов;

- сопоставление нейросетевых решений с результатами классического численного моделирования и демонстрацию режимов, в которых нейросетевые модели сохраняют устойчивость и точность при неполноте данных.

Полученные результаты представляют интерес как для дальнейшего развития теории (в части исследования свойств PINN-подходов применительно к термоупругости), так и для практических приложений, связанных с диагностикой состояния конструкций, анализом термомеханических режимов и построением цифровых двойников элементов изделий.

Достоверность полученных автором результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается корректной математической постановкой рассматриваемых задач на основе общепринятых уравнений линейной термоупругости, согласованным выбором граничных и начальных условий, а также последовательным использованием безразмерных параметров. Надёжность нейросетевых решений подтверждается их сопоставлением с аналитическими решениями для некоторых частных случаев, и с результатами численного моделирования (в том числе на основе представлений через функции Грина и сеточных методов), где продемонстрировано хорошее количественное совпадение полей перемещений, напряжений и температуры в широком диапазоне параметров. Дополнительно выполнен анализ сходимости и устойчивости предложенных алгоритмов к варьированию начальной инициализации, конфигурации датчиков и уровню шума в данных. Апробация основных результатов на научных конференциях и их публикация в рецензируемых изданиях также свидетельствуют о надёжности и воспроизводимости полученных автором выводов.

Оценка уровня и полноты исследования. Работа производит впечатление тщательно выполненного исследования. Автор демонстрирует хорошее владение современным аппаратом теории термоупругости, уверенно

обращается с математическими моделями и аккуратно описывает физический смысл вводимых величин и параметров. Нейросетевая часть выполнена без излишней «чёрной-ящичности»: во многих местах подчёркивается связь между формой функционала потерь и физическим содержанием задачи, обсуждаются вопросы устойчивости и сходимости обучения.

Численные примеры подобраны так, чтобы проследить влияние ключевых параметров и конфигураций датчиков на качество решения прямых и обратных задач. Отдельного упоминания заслуживает последовательное сравнение результатов, полученных различными вариантами построения обучающей выборки, что позволяет делать содержательные выводы о рациональной организации вычислительного эксперимента.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы. Представленные в диссертационной работе результаты могут быть применены при разработке и верификации моделей термоупругих элементов конструкций в составе «цифровых двойников», при обработке данных термомеханических и ударно-волновых испытаний для уточнения параметров материалов, а также при построении диагностических алгоритмов, использующих ограниченный набор измерений (датчики перемещений, напряжений, температуры). Разработанные подходы целесообразно рекомендовать к внедрению в практику расчётно-экспериментальных исследований сложных изделий (могут найти применение в Российском Федеральном ядерном центре – Всероссийском НИИ экспериментальной физики (г. Саров), Институте проблем машиностроения РАН – филиале Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова РАН, НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского), а также использовать их элементы в учебных курсах Московского авиационного института, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Саровского физико-технического института – филиала Московского инженерно-физического института по вычислительной механике, обратным задачам и методам машинного обучения в механике деформируемого твёрдого тела.

При общей положительной оценке работы целесообразно отметить несколько замечаний.

1. Баланс между механической и вычислительной частью. В ряде разделов изложение сильно концентрируется на пошаговом описании алгоритмов обучения и настройке вычислительного эксперимента, тогда как физическая интерпретация результатов (например, обсуждение характерных временных и пространственных масштабов термоупругих волн в связи с параметрами модели) оказывается сравнительно краткой. Некоторое перераспределение объёма в пользу обсуждения физических особенностей конкретных режимов сделало бы работу более ориентированной на механическую сторону.

2. Связь с экспериментом. Работа целиком ориентирована на численное моделирование и синтетические данные. Это оправдано с точки зрения чистоты постановки, однако в отдельных местах автор фактически обсуждает сценарии, близкие к реальным измерениям. Было бы полезно хотя бы на

уровне постановочной дискуссии более явно обозначить, какие типы экспериментальных установок или измерительных схем могли бы служить источником данных для предложенных алгоритмов и какие практические ограничения (шум, дискретность, конечное время наблюдения) будут при этом определяющими.

3. Структурирование материала. В некоторых главах подробное обсуждение вспомогательных технических деталей (например, вопросов реализации кода) перемежается с изложением ключевых математических идей. Для удобства можно было бы часть этих деталей вынести в приложения или в отдельные подпункты, чтобы основная линия рассуждений не дробилась.

4. Библиография. Список литературных источников в целом достаточно представлен, однако для более полной картины было бы полезно несколько расширить перечень работ по классическим постановкам термоупругих волновых задач именно для слоёв и пластин (в том числе по монографиям), а также добавить ещё несколько источников, связанных с применением методов глубокого обучения к задачам теплопроводности и термомеханики, опубликованных в последние годы.

5. Количественный анализ погрешностей. В ряде численных примеров автор наглядно демонстрирует хорошее совпадение решений, однако детальный количественный разбор погрешностей (например, в виде таблиц с нормами ошибок, доверительных интервалов, сравнением разных конфигураций датчиков по одному и тому же критерию) даётся достаточно фрагментарно. Более систематизированное представление таких оценок позволило бы яснее показать преимущества предложенного подхода и потенциальные ограничения его применения.

6. Автореферат в целом корректно отражает структуру и основные результаты диссертации, однако некоторые важные для понимания особенности термоупругой постановки (взаимосвязь механического и теплового полей, тип используемой модели теплопереноса) описаны очень кратко. Для читателя, не знакомого с текстом диссертации, было бы полезно дать немного более развёрнутую, но всё ещё компактную характеристику используемой модели.

7. Численные примеры в автореферате изложены в основном через сравнительные графики и общие формулировки выводов. Возможно, имело бы смысл выделить один–два ключевых сценария (тип нагружения, набор параметров, конфигурация датчиков) и описать их несколько детальнее, подчеркнув, какие именно параметры удаётся восстановить особенно надёжно, а какие требуют более тщательной настройки алгоритма.

8. В ряде мест автореферата используются англоязычные термины, которые, хотя и общеприняты в области машинного обучения, могут быть неоднозначно восприняты читателем, ориентированным прежде всего на механику. Небольшое расширение пояснений (например, короткие русскоязычные расшифровки при первом упоминании) повысило бы доступность текста.

Заключение ведущей организации.

В целом диссертационная работа Фан Тунг Шон «Исследование волновых процессов в термоупругом слое с применением технологий глубокого

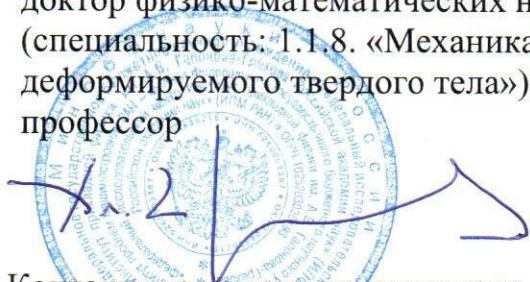
машинного обучения» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором решён комплекс актуальных задач механики деформируемого твёрдого тела и термоупругости с использованием современного аппарата глубокого машинного обучения.

Полученные результаты обладают научной новизной, хорошо вписываются в современный контекст развития физических приложений методов машинного обучения и представляют несомненный интерес для дальнейших исследований и практических приложений.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук считает, что диссертация и автореферат Фан Тунг Шон в целом соответствуют требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твёрдого тела», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на объединённом заседании лабораторий: волновой динамики и экспериментальной механики; информационных технологий и измерительных систем; управляемой виброзащиты электромеханических комплексов Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук» 15 декабря 2025 года (протокол № 25-12-01_дисс).

Директор Института проблем
машиностроения РАН – филиала
ФГБНУ «Федеральный исследова-
тельский центр «Институт приклад-
ной физики им. А.В. Гапонова–Гре-
хова Российской академии наук»,
доктор физико-математических наук
(специальность: 1.1.8. «Механика
деформируемого твёрдого тела»),
профессор



Ерофеев Владимир Иванович

17.12.2025г.

Контактные данные организации:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Телефон: +7 (831) 436 62 02

Факс: +7 (831) 416 06 16

Адрес электронной почты: dir@ipfran.ru

Официальный сайт: <https://www.ipfran.ru/>

с отзывом ознакомлен
25.12.2025

