

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Цирулева Александра Николаевича

на диссертационную работу Штепа Кристины Александровны на тему «Моделирование трансформирующих сред средствами лучевой оптики», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы

Актуальность исследования обусловлена отсутствием универсального физического подхода к расчёту оптических систем (линз, дифракционных решёток). Индивидуальный подход к каждой задаче существенно осложняет моделирование и оптимизацию, что критично в условиях необходимости высокоточных расчётов для новых оптических элементов.

Для расчёта требуется метод, который бы объединял

- точность электродинамических моделей;
- простоту расчётов в рамках лучевой оптики.

Прогресс в машинном обучении (особенно Physics-Informed Neural Networks, PINN) позволяет напрямую встраивать физические законы в алгоритмы оптимизации, дополняя классическую лучевую оптику и создавая вычислительно эффективные инструменты для моделирования трансформирующих сред. Однако, существующие решения либо узкоспециализированы, либо требуют колоссальных вычислительных ресурсов.

Целью диссертационной работы является разработка гибридного мультимодельного подхода, который объединяет классические численные методы (основанные на физических законах оптики) и методы машинного обучения (для ускорения и повышения точности расчётов). Основная задача, возникающая на этом пути, связана с оптимизацией характеристик трансформирующих сред через анализ моделей распространения лучей, с опорой на синтез лучевой оптики и нейросетевых методов.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность исследования, раскрыта связь темы с современным состоянием науки и техники, определена цель и поставлены задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. Диссертация посвящена разработке методов математического моделирования дифракционных систем в трансформирующих средах с использованием геометрической оптики, а также с применением нейросетевых подходов. Ключевой инновационный подход — гибридные модели на базе Physics-Informed Neural Networks (PINN), которые встраивают физические законы в процесс оптимизации.

Первая глава закладывает теоретическую и методологическую базу для моделирования оптических систем. Уравнение эйконала устанавливает зависимость между распределением показателя преломления среды и направлением распространения световых лучей. Траектории лучей интерпретируются как геодезические линии в оптическом пространстве, где показатель преломления выступает метрикой, а волновой фронт соответствует поверхности равной оптической длины. Для верификации численных алгоритмов используются аналитически описанные модели:

- Линза Лüneберга: преобразует расходящийся пучок в параллельный.
- Линза Максвелла: фокусирует свет в противоположной точке сферы.

Эти модели служат эталонами: их аналитические решения позволяют проверять корректность численных расчётов.

Подробно анализируются существующие методы решения. Разностные схемы: ограничены точностью из-за аппроксимации производных, требуют мелкой сетки. Метод характеристик: чувствителен к граничным условиям. Метод быстрого распространения фронта (FSM): устойчив, быстро сходится для гладких профилей, удобен для расчёта карт фронтов и времени прихода волны.

Вторая глава посвящена разработке и анализу численных методов решения уравнения эйконала — основы моделирования распространения излучения в трансформирующих средах. Основное внимание уделено методу быстрого распространения фронта (FSM) и его реализации в среде Julia. Метод позволяет вычислять распределение оптической длины (или времени прихода волны) в неоднородных средах. Метод основан на последовательных проходах по вычислительной сетке, что ускоряет сходимость и учитывает влияние соседних узлов, а также обеспечивает устойчи-

вость при положительных значениях показателя преломления и применим к произвольным профилям трансформирующих сред. Вычислительная сложность линейно зависит от числа узлов сетки — это делает метод эффективным для 2D- и 3D-задач на обычных персональных компьютерах.

Вычисления проводятся в рамках пакета `Eikonal.jl` на языке Julia. Реализовано задание расчётной области и граничных условий, построены линии уровня волновых фронтов и траектории лучей, проведена визуализация результатов. Применение пакета демонстрирует высокую вычислительную эффективность.

Третья глава посвящена нейросетевому подходу к решению задач геометрической и волновой оптики на базе Physics-Informed Neural Networks (PINN) с применением пакета `NeuralPDE.jl` (экосистема SciML, язык Julia) для решения уравнения эйконала. Метод позволяет аппроксимировать решения дифференциальных уравнений без построения расчётной сетки, используя обучаемую функцию. Физические законы (уравнение эйконала и граничные условия) встраиваются непосредственно в процесс обучения через функцию потерь. Ключевое преимущество данного метода — автоматическое дифференцирование, упрощающее учёт сложных распределений показателя преломления.

Для реализации в среде Julia используется пакет `NeuralPDE.jl`. Обучение ведётся методом градиентного спуска до стабилизации функции потерь. Тестовые профили: линзы Люнеберга и Максвелла. PINN корректно воспроизводит форму волновых фронтов, согласуясь с результатами FSM. Обсуждаются, во-первых, преимущества нейронной сети PINN: гибкость в моделировании сложных распределений показателя преломления; устойчивость к зашумлённым данным; возможность повторного использования обученной сети для разных параметров (эффективно для параметрических расчётов). Во-вторых, отмечены преимущества метода FSM: более высокая скорость вычислений и детерминированная сходимость.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы: разработан мультимодельный подход, объединивший FSM и PINN; показана сопоставимость их точности; проведён анализ устойчивости и вычислительной эффективности. Предложенные методы могут использоваться для проектирования оптических систем с трансформирующими свойствами.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность результатов подтверждается обоснованностью выбранных методов; взаимной верификацией результатов; серией численных экспериментов с детальным анализом. Ключевые выводы работы были представлены на целом ряде научных конференций. Результаты опубликованы в авторитетных научных журналах. Научная новизна связана с тем, что в работе разработан и реализован мультимодельный подход к моделированию оптических систем в трансформирующих средах. Используются численный метод быстрого распространения фронта (FSM, Fast Sweeping Method); нейросетевой метод на базе физически информированных сетей (PINN, Physics-Informed Neural Networks), реализованный на языке Julia. Созданы две взаимодополняющие вычислительные схемы (FSM и PINN) для решения уравнения эйконала в трансформирующих средах. Для обеих схем разработана единая система визуализации волновых фронтов и лучей — её работоспособность проверена на классических тестовых моделях (линзы Люнеберга и Максвелла). Выполнена адаптация PINN для задач геометрической оптики с переменным показателем преломления. Подтверждена воспроизводимость расчётов и визуализаций в открытой среде Julia/SciML. Показана применимость подхода для решения типовых задач проектирования оптических систем.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В рамках диссертационного исследования выводы сформированы на базе строго математического формализма, что обеспечивает их научную обоснованность. Автор провёл скрупулёзный разбор всех этапов численного решения — это позволило выстроить надёжную теоретическую конструкцию: сформулированы чёткие методические рекомендации по использованию разработанного метода; детально проработаны алгоритмы практической реализации, что критически важно для инженеров и исследователей, занятых моделированием сложных физических систем — в том числе в задачах гравитационной физики.

Особую роль в верификации результатов сыграл сравнительный анализ с альтернативными численными подходами, включая методы на базе нейронных сетей. Такой подход: демонстрирует конкурентные преимущества предложенного метода в

контексте моделирования гравитационных систем; позволяет объективно проверить корректность полученных решений; усиливает доказательную базу для сформулированных выводов и практических рекомендаций. Это сочетание гарантирует высокую степень надёжности итоговых выводов и рекомендаций работы, что особенно значимо для прикладных задач математического моделирования.

Ценность для науки и практики результатов работы

Научная ценность диссертации состоит в разработке новой универсальной методики, сочетающей численные методы и нейросетевое обучение. Практическая ценность проведённого исследования обусловлена высокой применимостью разработанных алгоритмов для решения актуальных практических задач. Кроме того, результаты работы обладают значительным дидактическим потенциалом в сфере математического моделирования и численных методов:

- материалы исследования могут быть использованы при разработке учебных пособий по дисциплинам численные методы и математическое моделирование;
- полученные результаты целесообразно включить в программу лабораторных работ, позволяющих студентам закрепить теоретические знания на практических примерах;
- ключевые выводы и методики способны стать структурным элементом учебных курсов для подготовки специалистов в области математического моделирования.

Таким образом, работа имеет два ключевых фактора значимости: с одной стороны, она решает прикладные задачи, с другой — обогащает образовательный контент в сфере математического моделирования.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертации изложены в 3 работах, напечатанных в изданиях, входящих в базу данных Scopus, Web of Science, в список ВАК категорий К-1, К-2 и в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Разделы автореферата строго соотносятся с аналогичными разделами и главами диссертации. Заголовки, нумерация и иерархия разделов в автореферате зеркально

повторяют структуру полной работы. Основные научные положения, выносимые на защиту в диссертации, чётко сформулированы в автореферате, не изменены по смыслу, подкреплены теми же аргументами и данными, что и в полном тексте.

В автореферате перечислены уникальные результаты, заявленные в диссертации, указаны отличия от предшествующих исследований, обоснована теоретическая и практическая ценность работы в том же объёме, что и в диссертации.

Выводы в автореферате логически вытекают из результатов, представленных в диссертации, практические рекомендации и перспективы разработки темы в автореферате соответствуют заключительным разделам полной работы, нет расхождений между итогами в автореферате и диссертационном тексте.

В автореферате не содержится информации, которая отсутствует в диссертации. Автореферат кратко резюмирует уже изложенные в полной работе материалы. Автореферат не перегружен второстепенными деталями, но передаёт суть исследования. Автореферат является надёжным и лаконичным изложением диссертационной работы, не умаляющим её научной ценности и не искажающим ключевые выводы.

Замечания по работе

1. В диссертации присутствуют опечатки. Например, в 1-ой формуле на стр. 71 компоненты (E_x и т.д.) 2-формы (бивектора) электромагнитного поля обозначены полужирным шрифтом. Не стоит писать «уравнение Эйконала», так как эйконал – не фамилия (и автор об этом знает).
2. Следовало уделить больше места результатам (например, графическим) моделирования распространения лучей в трансформирующих средах для конкретных линз.
3. Нечётко прописан переход к последней формуле на странице 62.

Приведённые замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Штепа Кристины Александровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющей важное значение для разработки гибридного мультимодельного

подхода к моделированию трансформирующих сред, использующего как классические численные методы, так и методы машинного обучения.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук согласно пункта 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а её автор, Штепа Кристина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Цирулев Александр Николаевич, доктор физико-математических наук (05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, профессор кафедры общей математики и математической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет».

26.01.2026



Подпись Цирулева Александра Николаевича заверяю

Проректор по научной деятельности



Ю.В. Чемарина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет»

Адрес: 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33

Тел. +7 (4822) 32-15-50, e-mail: rector@tversu.ru

Страница в интернете: <https://tversu.ru>