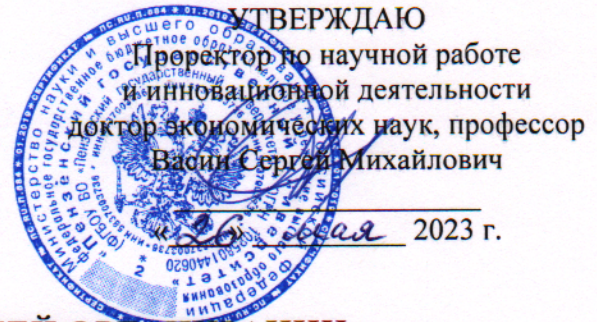




МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО «ПГУ»)

ул. Красная, д. 40, г. Пенза, Россия, 440026  
Тел/факс: (841-2) 66-63-32, e-mail: [cnit@pnzgu.ru](mailto:cnit@pnzgu.ru), <http://www.pnzgu.ru>  
ОКПО 02069042, ОГРН 1025801440620, ИНН/КПП 5837003736/583701001



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Фетисова Сергея Николаевича «Метод снесения граничного условия в задаче рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих объектах малой толщины», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность темы исследования.** Метод граничных интегральных уравнений является одним из наиболее эффективных методов решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн. Важный класс задач, где этот метод нашел широкое применение, представляют задачи дифракции на идеально проводящих объектах. Эффективность метода для таких задач основана на возможности интегрального представления электромагнитного поля через поверхностные токи, которое является естественным с физической точки зрения.

При переходе к граничным интегральным уравнениям можно выделить два существенно различных случая. Первый случай – это задача рассеяния на идеально проводящем теле, границей которого является замкнутая поверхность. Для этого случая уже давно известен подход, основанный на записи граничного интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода, здесь работает классическая теория разрешимости. Также для уравнений такого типа известны математически обоснованные методы численного решения. Другой класс задач – задачи рассеяния на тонких экранах. В таких задачах граничное условие ставится на обеих сторонах поверхности и необходимо использовать интегральное представление для решения, которое приводит к граничному интегральному

уравнению с сильной особенностью. Теория таких уравнений существенно сложнее и начала развиваться сравнительно недавно.

На этом фоне, рассмотренный в диссертации случай тела малой, но конечной толщины является в некотором смысле промежуточным. С одной стороны такое тело ограничено замкнутой поверхностью и решение задачи рассеяния сводится к граничному интегральному уравнению на этой поверхности. С другой стороны, когда толщина тела будет стремиться к нулю, уравнение, записанное на замкнутой поверхности, не переходит в уравнение на экране, а попросту вырождается.

Отметим, что уравнения с сильной особенностью можно применять и в задачах рассеяния на телах, ограниченных замкнутой поверхностью. Но и здесь в случае рассеяния на тонком теле уравнение записывается на двух близких поверхностях и при сближении и этих поверхностей уравнение вырождается, не переходя в уравнение для случая тонкого экрана. Это находит свое отражение и при численном решении таких задач, требуя высокой точности дискретизации поверхности.

Заметим, что полное пренебрежение толщиной тела, собственно и приводит к модели бесконечно тонкого экрана. Однако, существуют случаи, когда полное пренебрежение толщиной тела приводит к искажению его отражающих свойств. В диссертации проведен специальный анализ, подтверждающий наличие таких случаев. Поэтому поставленная в диссертации цель свести задачу к решению граничных интегральных уравнений на тонком экране, которые приближенно учитывают толщину тела и не вырождаются при стремлении толщины к нулю, является актуальной и представляет несомненный интерес, как с теоретической, так и с прикладной точек зрения.

**Научная новизна.** Научная новизна исследования заключена в разработке нового подхода к численному моделированию процесса дифракции электромагнитных волн на идеально проводящих объектах малой толщины, основанного на постановке краевой задачи на срединной поверхности такого тела с учетом толщины тела за счет специфических граничных условий, сведении такой задачи к системе граничных интегральных уравнений и построении численной схемы решения этих уравнений.

#### **Содержание диссертационного исследования.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 89 страниц с 40 рисунками.

Во введении дается объяснение актуальности работы, обзор существующих подходов к решению задач внешней электродинамики, характеризуется научная и практическая значимость работы.

В первой главе описан известный исходный метод решения задачи рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих объектах, основанный на сведении задачи к граничному интегральному уравнению относительно поверхностных токов. Для численного решения задачи используется метод коллокации с применением кусочно-постоянных аппроксимации.

Во второй главе описан разработанный автором подход к решению задачи рассеяния электромагнитных волн на объектах малой толщины. Суть метода заключается в постановке новой краевой задаче на срединной поверхности (тонкого экрана) исследуемого объекта. Учёт исходной формы тела в новой задаче происходит за счёт использования нового граничного условия. Новая задача сводится к системе интегро-дифференциальных уравнений на срединной поверхности. Для численного решения задач этих уравнений также используется метод коллокации с кусочно-постоянными аппроксимациями. Автор использует известные выражения для аппроксимации интегральных операторов. Кроме того, автором строятся формулы для аппроксимации поверхностной дивергенции от неизвестной векторной функции, которая входит в эти уравнения. В результате задача сводится к решению системы уравнений относительно неизвестных координат поверхностных токов на ячейках разбиения в локальных базисах, построенных на ячейках разбиения.

В третьей главе дается характеристика разработанных программных средств.

В четвертой главе приводятся результаты численного решения задачи рассеяния электромагнитных волн на прямоугольном крыле конечного размаха с симметричным профилем. Здесь приводятся результаты анализа сеточной сходимости для исходного метода (когда решается граничное интегральное уравнение на точной поверхности крыла) и разработанного метода. Так же автор представляет данные по верификации численных результатов по расчету диаграмм обратного рассеяния путем сравнения с данными физического эксперимента.

В заключении приводятся основные результаты по диссертационной работе.

**Практическая и научная значимость результатов работы для соответствующей отрасли науки.** С практической точки зрения, разработанный метод позволяет снизить требуемые вычислительные мощности при решении задач дифракции на тонких элементах конструкций различных технических устройств. С научной точки зрения, разработан новый подход для решения задач на объектах, имеющих геометрические особенности (малая толщина, малые радиусы скругления, острые клиновидные кромки и т.д.), который, по видимому, можно распространить на смежные области математического

моделирования: задачи внешней акустики, задачи дифракции на идеально проводящих объектах с радиофизическими покрытиями малой толщины и т.д.

**Степень обоснованности научных положений и выводов.** При сведении краевой задачи к граничным интегральным уравнениям автором используется строгий математический аппарат. При численном решении возникших интегральных уравнений для аппроксимации интегральных операторов используются известные и апробированные квадратурные формулы. Для верификации разработанного подхода в целом проведено сравнение диаграмм обратного рассеяния прямоугольного крыла, полученных в результате решения задачи разработанным методом, с результатами, полученными по точной исходной модели крыла и имеющимися результатами физического эксперимента.

**Замечания по работе.** По работе можно высказать следующие замечания и пожелания:

1. В качестве исследуемого объекта автором выбрано крыло с симметричным профилем, срединная поверхность которого представляет собой плоский экран, особенности решения задачи на котором в исходной постановке известны. Было бы интересно провести исследование на несимметричном профиле, срединная поверхность которого представляет собой неплоский экран.
2. Автор не приводит количественной оценки сокращения времени вычислений при использовании разработанного метода относительно исходного.
3. Автор исследует задачу дифракции на тонком крыле при облучении и наблюдении за возникающими полями в одной фиксированной плоскости (перпендикулярной к плоскости крыла). Для более полного понимания области применимости разработанного метода, автору следовало рассмотреть и другие углы облучения объекта, а также поведение электромагнитного поля в других плоскостях.

#### **Общая оценка работы.**

Работа выполнена на высоком теоретическом уровне и представляет интерес для специалистов в области математического моделирования электродинамических процессов. Соискатель имеет достаточный объем публикаций в ведущих научных журналах. Замечания, представленные выше, имеют характер общих замечаний, указывают на возможные направления дальнейших исследований в этой области и не влияют принципиально на общую оценку работы.

#### **Заключение.**

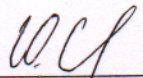
Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Фетисова С.Н. является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор **Фетисов Сергей Николаевич** заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

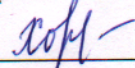
Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой «Математика и суперкомпьютерное моделирование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» Смирновым Юрием Геннадьевичем.

Отзыв обсужден и принят на заседании кафедры «Математика и суперкомпьютерное моделирование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет», протокол № 16 от 24.05.2023 г. На заседании присутствовало 11 сотрудников кафедры из них 1 доктор наук. Результаты голосования «за» – 11, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Заведующий кафедрой «Математика и суперкомпьютерное моделирование»,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

  
Ю.Г. Смирнов

Секретарь кафедры «Математика и суперкомпьютерное моделирование»  
кандидат физико-математических наук

  
Э.А. Хорошева

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

440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40

Телефон: +7(8412) 66-60-01

Эл.почта: [rector@pnzgu.ru](mailto:rector@pnzgu.ru)