

ОТЗЫВ

официального оппонента, доцента, кандидата физико-математических наук Крутицкого Павла Александровича на диссертационную работу Фетисов 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 мощным инструментом решения задач математической физики, применяемым как для теоретического анализа разрешимости, так и для численного решения этих задач. Классические приложения этого метода связаны с решением краевых задач Дирихле и Неймана для уравнений Лапласа и Гельмгольца. Более сложными являются краевые задачи с условиями на касательную или наклонную производную, а также задачи на экранях, где краевое условие ставится на обеих сторонах поверхности. Широкое применение метод граничных интегральных уравнений находит и в краевых задачах для уравнений Максвелла, описывающих рассеяние электромагнитных волн.

В данной работе рассмотрено применение метода граничных интегральных уравнений к решению задач рассеяния монохроматических электромагнитных волн на идеально проводящих телах малой толщины. Такое тело ограничено замкнутой поверхностью, которую можно разделить на две компоненты (условно верхнюю и нижнюю), находящиеся на малом расстоянии друг от друга. При применении метода граничных интегральных уравнений для решения краевых задач вне таких тел имеется общая проблема, связанная с тем, что приходится записывать и решать интегральные уравнения с ядрами, имеющими особенность, на этих близких частях поверхности.

В панельных методах аэродинамики, применяемых для расчета потенциального обтекания крыльев идеальной несжимаемой жидкостью известен подход, основанный на снесении граничного условия на срединную поверхность. В этом подходе ставится краевая задача на срединной поверхности с граничными условиями на косую производную на обеих сторонах этой поверхности. Такой подход позволяет достаточно точно вычислять распределение давления по поверхности крыла и при этом погрешность метода не растет в случае, когда толщина исходного крыла стремится к нулю.

В настоящей работе поставлена цель применить похожую идею к задаче рассеяния электромагнитной волны на теле малой толщины, таком, например, как крыло самолета. Тема такого исследования представляется актуальной, поскольку ведет к расширению области применимости метода граничных интегральных уравнений и призвана повысить

устойчивость и надежность вычислений в достаточно важном случае задач электродинамики – задачах рассеяния на телах малой толщины.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность проведенного исследования, даются обзор имеющейся литературы, постановка цели и задач работы, а также краткая характеристика новизны и значимости полученных результатов, приводится краткое содержание работы.

В первой главе автором даются постановка исходной задачи рассеяния на идеально проводящем теле, и описывается известный метод ее решения на основе сведения к граничному интегральному уравнению. Приводится численная схема решения интегрального уравнения с применением метода коллокаций.

Во второй главе описывается предлагаемый автором подход к решению задачи рассеяния на теле малой толщины. Идея подхода заключается в постановке и решении новой краевой задачи вне срединной поверхности исследуемого объекта, представляющей собой тонкий экран. Для учёта формы исходного объекта используется специальное граничное условие, основанное на использовании информации о нормали к исходной поверхности. В новой задаче возникают краевые условия на наклонные составляющие электрического поля, причем, с различными правыми частями с двух сторон поверхности. Полученная система уравнений является интегро-дифференциальной, поскольку наряду с интегральными операторами в нее входит так же оператор вычисления поверхностной дивергенции от неизвестных поверхностных токов. Строится численная схема решения задачи с применением метода кусочно-постоянных аппроксимаций и коллокаций. При этом получено выражение для аппроксимации поверхностной дивергенции.

В третьей главе описана программная реализация разработанного метода.

В четвертой главе представлены результаты численного решения задачи рассеяния электромагнитных волн на объекте типа симметричного прямоугольного крыла конечного размаха с различной максимальной толщиной профиля. Приведено сравнение скорости сеточной сходимости в исходной и предлагаемой автором постановке задачи. Приведена верификация на результатах физического эксперимента. Приведен количественный анализ погрешности решения при решении задачи определения диаграмм рассеяния.

В заключении приводятся результаты работы.

Научная новизна.

Научная новизна состоит в том, что разработан новый метод решения задачи рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих объектах малой толщины,

основанный на замене поверхности тела тонким экраном, но с учетом первоначальной формы за счет постановки граничных условий с применением векторов нормали, снесенных с исходной поверхности. Возникшая краевая задача на экране с нестандартными условиями на наклонные составляющие электрического поля сведена к системе интегро-дифференциальных уравнений и построена численная схема решения этой системы.

Практическая и научная ценность работы. Научную ценность работы я вижу в приложении метода снесения граничного условия к задачам электродинамики и проверке в численном эксперименте его применимости.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного численного метода к решению реальных задач рассеяния на телах, имеющих малую толщину. В таких задачах разработанный метод должен позволить на практике повысить производительность и устойчивость вычислений.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Обоснованность результатов работы обусловлена применением строгого математического аппарата при сведении краевой задачи к системе граничных интегро-дифференциальных уравнений. Работоспособность идеи снесения граничного условия в целом, а также корректности работы разработанной численной схемы, подтверждаются сравнением результатов расчетов с результатами, полученными численно при решении задачи в исходной постановке (для телесного объекта исходной формы), а также сравнением с имеющимися результатами эксперимента.

Замечания по работе.

1. Определенный интерес представляет анализ применимости в такой задаче других численных методов решения, основанных на иных схемах решения граничных интегральных уравнений.
2. На с.21 в 1-ом абзаце стоило привести формулу для приближенного вектора нормали.
3. На с.31 в формуле для фундаментального решения уравнения Гельмгольца имеется опечатка: стоит запятая между сомножителями.
4. На с.40 стоило пояснить связь между выражением для площади ячейки, использованным в формуле (2.21), и выражением, представленным в предыдущей формуле.
5. На с.47 следовало бы дать расшифровку термина ЭПР (эффективная поверхность рассеяния). Кроме того, в предпоследнем абзаце сказано, что $k=4.1$ на рисунке 4.3, тогда как на самом рисунке указано, что $k=10$ и $k=20$.

Общая оценка работы. Следует отметить, что вышеуказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы в целом и не уменьшают ценности основных теоретических и практических результатов исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты представляют научную ценность.

Автореферат дает полное представление о диссертации.

Научные положения и результаты диссертационного исследования неоднократно докладывались на конференциях (в том числе международных) и семинарах. Результаты диссертации опубликованы в 7 печатных изданиях, 3 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК, 2 из которых входят в систему цитирования Web of Science или Scopus.

Считаю, что диссертация отвечает 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».

Официальный оппонент,

доцент, кандидат физико-математических наук
(специальность 01.03.03 – Математическая физика), старший научный сотрудник
федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Крутицкий Павел Александрович

6 июня 2023 г.

Подпись сотрудника ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» Крутицкого П.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИПМ им. М.В.
Келдыша РАН



Давыдов А.А.

6 июня 2023 г.