

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Золотова Сергея Александровича
на тему: «Методы восстановления энергетического спектра ускоренных
электронов для дозиметрического планирования радиационной обработки
объектов произвольной формы и химического состава»
по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Актуальность темы диссертационной работы

Развитие ускорительной техники и создание новых технологий расширяет границы применимости методов радиационной обработки материалов и объектов. Для наилучшей эффективности радиационной обработки требуется максимально равномерное распределение поглощённой дозы в заданной области и при этом должна быть минимизирована дозовая нагрузка на остальной объем. Одним из методов, позволяющих добиться заданного распределения дозовой нагрузки, является выбор параметров облучения на основе математической модели процесса радиационной обработки. Модель определяется геометрией и энергетическим спектром излучения, при этом наиболее неопределенным является именно энергетический спектр. Существующие методы прямого измерения спектра весьма трудоемки, альтернативой им является решение обратной задачи оценивания спектра по измерению центрально-осевых глубинных дозовых распределений. Существующие методы этой обратной задачи оказываются не вполне удовлетворительными, так как зачастую не учитывают физические процессы, определяющие изменение пучка при его распространении в воздухе: рассеяние, изменение спектра и др. Поэтому создание метода восстановления энергетического спектра электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, доступным для прямых измерений, и на его основе разработка методов дозиметрического планирования

радиационной обработки объектов является актуальной задачей. Ее решению посвящена диссертационная работа С.А. Золотова.

Характеристика содержания работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 143 страницы, включая 34 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает 121 источник.

Во введении приводятся оценка актуальности диссертационной работы, формулировка цели исследования и задач, которые требуется решить для достижения этой цели.

В первой главе дан подробный обзор радиационных технологий, показан широкий круг их применений – медицина, сельское хозяйство, пищевая и полимерная промышленность и др. Указаны основные недостатки современных подходов, обосновывается и ставится задача диссертационного исследования.

Вторая глава диссертации посвящена описанию используемых подходов. Формулируется математическая модель ослабления пучка электронов в воздухе; для моделирования изменения спектра моноэнергетических электронов, прошедших через воздух, в зависимости от длины траектории, используется распределение Ландау. Даётся методика расчета распределений поглощенной дозы от моноэнергетических электронов методом Монте-Карло с использованием инструментария Geant4. Описываются эксперименты по измерению поглощенной дозы на ряде ускорителей.

В третьей главе описывается метод решения обратной задачи оценивания спектра ускорителя электронов по измерениям энергетического спектра пучка в точке траектории, удаленной от источника на заданное расстояние. Содержится постановка обратной задачи, описан закон измерения спектра при прохождении электронов в воздухе. Показано,

что распределение Ландау достаточно точно описывает изменение формы спектра при распространении пучка электронов в воздухе, описана процедура выбора параметров распределения Ландау. Приводится метод решения обратной задачи, основанный на SVD-разложении и использовании главных компонент. Приводятся результаты анализа точности и устойчивости предложенного алгоритма решения обратной задачи.

В четвертой главе описан предложенный диссертантом метод оценки энергетического спектра ускорителя электронов по глубинным дозовым распределениям, измеренным вдоль центральной оси. Предлагается модель восстанавливаемого спектра в виде суммы основной и поправочной компонент. Основная компонента представляется в виде гауссовой кривой. На поверхности образца рассчитывается спектр основной компоненты с учетом прохождения пучка в воздухе. Оценка спектра основной компоненты проводится методом наименьших квадратов минимизацией невязки выбором параметров гауссовой кривой. Далее рассчитывается поправка к основному спектру у поверхности образца методом регуляризации Тихонова. На третьем этапе оценивается исходный спектр ускорителя электронов методами, описанными в третьей главе. Убедительно показано, что получившиеся оценки спектра согласуются с реальными спектрами ускорителей, использованных диссертантом для контроля полученных результатов восстановления спектров.

Пятая глава посвящена описанию разработанной диссертантом методики дозиметрического планирования радиационной обработки образцов произвольной формы и химического состава. Ставится задача, в которой по заданному диапазону доз, в пределах которых следует облучить объект, требуется выбрать режим работы радиационной установки так, чтобы получить наиболее однородное распределение поглощённой дозы в заданной области интереса при минимальном дозовом воздействии на остальной объём объекта. Описывается метод решения этой задачи, основанный на методах, разработанных диссертантом и описанных в третьей и четвертой главах

диссертации. Планирование обработки образца описано как последовательное выполнение четырех этапов. На первом проводится восстановление энергетического спектра ускоренных электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, на втором производится расчет абсолютного значения поверхностной дозы как функции от параметров радиационно-технической установки, на третьем рассчитывается распределение относительной поглощенной дозы по объему образца с помощью методов Монте-Карло, на четвертом происходит выбор оптимального режима обработки. Показано, что экспериментальные измерения подтверждают полученные результаты планирования. Описано программное обеспечение, реализующее разработанную методику.

В заключении представлены основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Достоверность и научная новизна основных положений и результатов работы

Научной новизной обладают следующие полученные соискателем результаты:

1. Предложена математическая модель изменения энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ при их распространении в воздухе. На ее основе получено устойчивое решение задачи восстановления энергетического спектра источника электронов по спектру электронов, прошедших в воздухе известный путь.
2. Предложено устойчивое решение задачи восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям в виде суммы основной и поправочной компонент. На примерах показано, что предложенный подход восстанавливает энергетический спектр с ошибкой не более 5%.

3. Дана методика дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава на радиационно-технических установках на базе ускорителей электронов, учитывающая ослабление энергетического спектра электронов при их распространении в воздухе.

Достоверность сформулированных в диссертации положений и выводов подтверждается тем, что они опираются на классический аппарат математики и физики, результатами проведенных измерений, представленными в диссертационной работе, а также совпадением результатов полученных оценок с экспериментальными данными.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные положения, выносимые на защиту, являются в достаточной степени обоснованными. Разработанные методы и алгоритмы детально описаны, а достоверность выводов подтверждается численными сравнениями предложенных методов и алгоритмов с известными и ранее опубликованными, а также с результатами экспериментов. Основные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на профильных международных и российских конференциях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации Золотова С.А. заключается в развитии методов и алгоритмов восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям и повышении точности оценок дозовых полей. Разработанные соискателем новые модели радиационной обработки материалов позволяют планировать параметры установок с целью получения оптимальных режимов облучения.

Представленные в диссертационной работе методы и алгоритмы реализованы соискателем в виде программного комплекса, позволяющего

проводить вычислительные эксперименты по подбору оптимальных параметров облучения. Разработанная методика внедрена в промышленную практику в центре радиационной обработки «Axenter» в г. Дубна.

Публикация основных результатов диссертации

Основное содержание диссертационной работы представлено в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова. Имеется 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Опубликованные работы и автореферат полностью отражают содержание диссертации.

Замечания

Однако работа С.А. Золотова не лишена недостатков. К ним можно отнести непропорционально большой обзор (глава 1), что привело к тому, что некоторые результаты работы изложены излишне сжато. Например, на стр. 84 упоминается задача восстановления спектра электронов на выходе ускорителя по спектру электронов, прошедших заданный путь в воздухе, но нет формальной постановки этой задачи. Не ясно также, что изображено на рисунке 2.7.

На рисунке 3.3 в описании графиков присутствуют формулы (8) и (9), а в подписи к рисунку – формулы (3.6) и (3.7). Не согласуются формулы (3.18), (3.19) и (3.21). Имеются и небольшое количество других опечаток и несогласованных слов.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника (по физико-математическим наукам), а также критериям,

определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Золотов Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
зав. кафедрой математического моделирования и информатики
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
профессор

Чуличков Алексей Иванович

«26» января 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(903)570 75 50, e-mail: achulichkov@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова,

дом 1, строение 2, Физический факультет

Тел.: +7 (495) 939-16-82; e-mail: ChulichkovAI@my.msu.ru



Подпись А.И. Чуличкова удостоверяю:

Ученый секретарь ученого совета
Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор

С.Ю. Стремоухов
«__» января 2026 г.