

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

Диссертационная работа С.А. Золотова посвящена разработке метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по доступным для измерения в промышленной практике дозиметрическим данным с целью проведения точного дозиметрического планирования радиационной обработки. Тематика исследования находится на стыке физики ускорителей, дозиметрии и радиационных технологий и имеет непосредственную связь с задачами промышленной радиационной обработки, в том числе с процессами радиационной модификации полимерных материалов, стерилизации медицинских изделий и обработки пищевой продукции. В работе предложены два взаимодополняющих метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов: метод восстановления спектра источника по энергетическому спектру электронов, измеренному в удалённой точке после прохождения пучка в воздухе, и метод восстановления энергетического спектра по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, доступным для прямых экспериментальных измерений. На основе разработанных методов предложен подход к дозиметрическому планированию радиационной обработки для объектов произвольной формы и химического состава.

Тема диссертации и содержание работы соответствует научной специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Основные результаты диссертационной работы представлены в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова, а также подтверждены 3 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные работы и автореферат в полной мере отражают содержание диссертации, ее основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Актуальность исследования

Эффективность радиационной обработки материалов и объектов в решающей степени определяется величиной поглощенной дозы и характером ее распределения в облучаемом объеме. Однако в условиях реального производства прямое экспериментальное измерение дозовых распределений по всему объему объекта затруднено или невозможно. Поэтому на практике для их оценки прибегают к методам компьютерного моделирования Монте-Карло, достоверность которых зависит от точности воспроизведения условий облучения – прежде всего, геометрии облучения и энергетического спектра ускорителя. Если геометрические параметры облучения могут быть определены с высокой точностью, то энергетический спектр пучка ускоренных электронов зачастую неизвестен конечному пользователю установки. Его прямое экспериментальное измерение в производственных условиях, как правило, не представляется возможным. Альтернативой прямому измерению выступает решение обратной задачи восстановления энергетического спектра по измеренным центрально-осевым глубинным дозовым распределениям. Однако известные подходы к решению данной задачи не в полной мере учитывают физические процессы, сопровождающие распространение электронного пучка в воздухе на пути от выхода пучка до поверхности облучаемого объекта.

В связи с этим разработка метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, учитывающим эти особенности, а также создание на

его основе методов дозиметрического планирования радиационной обработки объектов производной формы и химического состава является актуальной научно-прикладной задачей.

Содержание 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 обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современного состояния радиационных технологий в медицине и промышленности, рассмотрены вопросы дозиметрического планирования радиационной обработки, методы компьютерного моделирования переноса излучения, а также проанализированы существующие подходы к восстановлению энергетического спектра ускоренных электронов по дозиметрическим данным. В заключении главы сформулирована постановка задачи диссертационного исследования.

Во второй главе подробно изложены материалы и методы исследования. Описан комплекс компьютерных расчетов методом Монте-Карло с использованием инструментария Geant4, включающий моделирование ослабления электронного пучка в воздухе и расчет центрально-осевых глубинных дозовых распределений от моноэнергетических электронов в различных материалах. Также представлены методики экспериментального измерения глубинных дозовых распределений на медицинском и промышленных ускорителях электронов, используемых для верификации разработанных алгоритмов восстановления энергетического спектра.

В третьей главе изложен разработанный метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по энергетическому спектру пучка, измеренному в произвольной удаленной точке на его траектории, с использованием распределения Ландау. Описано построение оператора ослабления спектра с использованием результатов моделирования методом Монте-Карло, проанализированы его свойства, а также предложен метод обращения данного оператора на основе SVD-разложения с фильтрацией малых сингулярных чисел, обеспечивающий устойчивость восстановления спектра при наличии шумов во входных данных.

В четвёртой главе представлен метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям. Описана последовательная процедура восстановления спектра, включающая выделение основной компоненты и расчет поправочной составляющей с использованием методов регуляризации. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальной проверки предложенного метода на данных, полученных на медицинском и промышленных ускорителях электронов. Показано хорошее согласие восстановленных энергетических спектров и рассчитанных по ним дозовых распределений с экспериментальными измерениями.

В пятой главе изложен разработанный автором подход к дозиметрическому планированию радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава с использованием восстановленного энергетического спектра ускоренных электронов. Приведено математическое описание процесса планирования, включающее расчет абсолютных и относительных дозовых распределений, анализ влияния спектральных характеристик пучка и параметров работы установки на однородность дозового поля в области интереса, а также формулировку критериев выбора оптимального режима облучения. Представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методики на ускорителе электронов Mevex в центре промышленной радиационной

обработки «Axenter» (г. Дубна), продемонстрировавшие хорошее согласие расчётных дозовых распределений с экспериментальными измерениями. В заключительной части главы описано программное обеспечение, реализующее разработанные физические модели и алгоритмы для практического использования при дозиметрическом планировании радиационной обработки в производственных условиях.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

Научная новизна и практическая значимость исследования

Научная новизна работы заключается в разработке модели изменения энергетического спектра ускоренных электронов при их распространении в воздухе и в использовании данной модели для решения обратной задачи восстановления энергетического спектра по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям. Разработанный методложен в основу методики дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава на радиационно-технических установках на базе ускорителей электронов.

Практическая значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные научные результаты доведены до уровня прикладных решений и воплощены в виде программных кодов, предназначенных для упрощения и автоматизации задач дозиметрического планирования радиационной обработки. Наилучшей демонстрацией практической значимости работы является внедрение разработанной методики в промышленную практику центра радиационной обработки «Axenter» в г. Дубна.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций

Положения, выносимые на защиту, являются новыми, научно обоснованными, логически согласованными и подтверждены результатами

численного моделирования и экспериментальных исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на профильных международных и российских конференциях.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечена использованием апробированных экспериментальных и теоретических методик, применением сертифицированного оборудования и стандартных методов математической статистики. Результаты компьютерного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и результатами других авторов, а численные методы реализованы на основе классических библиотек, прошедших многолетнюю апробацию и признанных научным сообществом эталонными инструментами вычислительного анализа.

Замечания

Однако работа С.А. Золотова не лишена отдельных недостатков:

1. Первая глава содержит обёмный обзор литературы, однако в ней недостаточно раскрыта суть метода сингулярного разложения (SVD), который далее используется в работе. В частности, не поясняется, что представляет собой SVD-разложение и какова суть данного метода применительно к решению рассматриваемых обратных задач.

2. При описании компьютерного моделирования с использованием Geant4 не объясняется выбор физики QBBC. В работе не поясняется, чем обусловлен данный выбор и как использование альтернативных физических листов могло бы повлиять на полученные результаты. Также не объяснен выбор величины порога генерации вторичных частиц.

3. При расчёте дозовых распределений для задач с выраженной радиальной симметрией использовалась кубическая воксельная сетка. Представляется, что в подобных задачах более естественным могло бы быть использование радиальной геометрии вокселов.

4. В таблице 3.1 параметры масштаба $b_1 - b_5$ приведены с избыточной числовой точностью без указания их неопределённостей. Аналогичное замечание относится и к параметрам сдвига a_i .

5. В разделе, посвящённом обращению оператора ослабления спектра методом SVD-разложения с фильтрацией малых сингулярных чисел, недостаточно четко сформулированы критерии качества восстановления энергетического спектра.

6. В таблице 4 приведено значение параметра $\sigma = 0.01$, однако в тексте работы не поясняется, каким образом была получена данная величина, учитывая, что соответствующий спектральный пик фактически представлен одной точкой.

Кроме того, в работе имеются отдельные редакционные неточности. В частности, описание материала «твёрдая вода» приведено в тексте дважды. В главе 2 с описанием методик компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, отсутствуют ссылки на последующие главы диссертации, в которых непосредственно представлены и обсуждаются полученные результаты. В третьей главе на рисунке 3.3 подпись к графику не полностью согласуется с нумерацией и обозначениями, используемыми в тексте работы.

Вместе с тем, 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:
кандидат химических наук,
доцент кафедры радиационной технологии
инженерно-технологического факультета
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет)»

Лютова Жанна Борисовна
«__» января 2026 г.

Контактные данные:
тел.: +7 (812) 494-93-47, e-mail: zhanna.lyutova@spbti.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
02.00.09 – химия высоких энергий

Адрес места работы:
190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 24-26/49 А
Тел.: +7 (812) 494-93-47; e-mail: zhanna.lyutova@spbti.ru

Подпись Ж.Б. Лютовой удостоверяю: