

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 исследования. Диссертация С.А. Золотова посвящена важным вопросам физики пучков заряженных частиц – точному расчету спектра ускоренных электронов и поглощенной дозы облучения, в основном – для использования в технологических ускорительных комплексах. В работе предложены математические методы и программное обеспечение, позволяющее проводить планирование облучения. Обычно тщательное планирование проводится для ускорителей электронов, применяемых для лучевой терапии онкологических заболеваний, а для промышленных радиационных технологий обычно ограничивались оценочным расчетом. Вместе с тем, оптимизация позволит улучшить равномерность распределения поглощенной дозы, а также повысить удельную производительность установки.

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

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации. Основные публикации автора по теме диссертации корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты и выносимые на защиту положения.

Научная новизна диссертации состоит в использовании Монте-Карло моделирования дозовых распределений в комбинации с аналитическими методами, являющимися развитием методов регуляризации А.Н. Тихонова. Автором разработаны не только математические методы, но и подготовлен пользовательский программный продукт, уже внедренный в одном из промышленных центров облучения.

Практическая ценность работы заключается в разработанных программных продуктах, которые предназначены для использования в промышленных центрах облучения.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений, содержащих необходимые математические выкладки. Общий объем диссертации составляет 143 страницы.

Во введении описываются цели и основные задачи выполненных исследований, приведены формальные моменты, такие как актуальность, научная новизна и практическая ценность, апробаций работы и вклад автора.

В первой главе приведен излишне подробный обзор по технологиям, для которых могут использоваться различные типы излучения. Необходимо отметить, что данная глава перегружена информацией, которая для основного содержания диссертации является избыточной. Так, рассматриваются не только технологии применения β -излучения, но и пучков протонов и γ -излучения, в том числе с энергией в сотни кэВ, которые в дальнейшем в диссертации не рассматриваются.

В первой главе также рассмотрены существующие методы прямого измерения дозовых распределений и имеющиеся стандарты. Приведено краткое описание существующих методов и программ, используемых для моделирования процесса облучения, методов восстановления энергетического спектра пучка электронов по дозовым распределениям.

Вторая глава посвящена моделированию дозовых распределений, создаваемых пучком электронов с известными параметрами. Описаны результаты экспериментальной проверки разработанных моделей на трех абсолютно разных по параметрам линейных ускорителях электронов, разработанных НИИЯФ МГУ, Varian и Mevex, которые в целом показали хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными в диапазоне энергий пучка электронов 6-10 МэВ.

В третьей главе показана и обоснована необходимость учета смещения спектра, вызванного взаимодействием пучка электронов с воздушным слоем, находящимся между выводным окном ускорителя и облучаемым объектом. Описаны корректировки, внесенные в разработанные модели поглощения для учета этого смещения. Изучается влияние шума на измеренный и восстановленный спектр и предложены методы подавления влияния такого шума.

Четвертая глава посвящена описанию разработанных методов восстановления энергетического спектра пучка электронов по центрально-осевым дозовым распределениям. Приведенные результаты виртуального эксперимента сравниваются с реальными спектрами, измеренными на трех ускорителях, и показывают отклонение не более 2 %.

В пятой главе рассматривается разработанное автором программное обеспечение, предназначенное для расчета дозовых распределений. Описаны алгоритмы работы программ. Приведены результаты апробации программ на ускорителе Mevex компании «Акцентр». Даются рекомендации по повышению эффективности обработки в части однородности распределения доз и снижению удельного энергопотребления. Необходимо отметить, что

основные элементы программного обеспечения зарегистрированы автором и на них получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

В заключении приведены основные результаты работы.

В целом необходимо отметить, что автором выполнен большой объем работ по обоснованию необходимости более точного облучения на промышленных установках и разработаны аналитические и численные методы, а также программное обеспечение для планирования облучения.

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод восстановления энергетического спектра пучка электронов по распределению поглощенной дозы.
2. Разработаны аналитические и численные методы для расчета дозовых распределений в облучаемых образцах.
3. Разработано и апробировано программное обеспечение для планирования облучения.
4. Разработанные методы и программы прошли экспериментальную проверку на действующих установках.

Результаты диссертации внедрены на действующем промышленном комплексе лучевой обработки компании «Акцентр» в г. Дубна.

Научная и практическая значимость результатов.

Выносимые на защиту положения и результаты являются новыми, тематика исследований, представленных в диссертации, имеет большую научную и практическую значимость в связи с необходимостью повышения эффективности работы технологических ускорительных комплексов, а именно улучшения равномерности распределения поглощенной дозы и повышения энергоэффективности использования установок.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается корректным использованием аналитических и численных методов, а также экспериментальной проверкой некоторых основных результатов на действующих промышленных комплексах лучевой обработки компаний «Корад» и «Акцентр».

Работа прошла апробацию на нескольких научных конференциях по ядерной физике и радиационным технологиям, результаты опубликованы в ведущих научных журналах.

Личный вклад автора состоит в развитии и обосновании аналитических и численных методов, необходимых для проверки спектральных и дозовых распределений, а также в разработке и экспериментальной верификации методов и разработанного программного обеспечения. Все основные результаты, приведенные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Диссертация не лишена некоторых недостатков:

1. Первая, вводная, глава очень затянута и составляет около половины от всего объема диссертации. В ней приведен обзор технологий применения различных видов излучения, причем протонные пучки и γ -излучение далее не рассматриваются. В таблице 1.2 приведены завышенные значения поглощенных доз, необходимых для различных технологических процессов.

2. В диссертации рассмотрены только центрально-осевые распределения для энергетического спектра пучка электронов и поглощенной дозы. Вместе с тем, известно, что спектр пучка при больших углах отклонения пучка, например, в сканирующих системах, будет существенно отличаться от рассмотренного вдоль оси системы. Это оказывает существенное влияние на дозовое распределение на краях облучаемого объекта, особенно – при расчете вторичных процессов в мишенях и облучаемом материале.

3. Во введении указано, что разработанные методы могут быть использованы для широкого диапазона энергий пучка электронов в диапазоне 1-25 МэВ. При этом энергии ниже 6 МэВ нигде далее в диссертации не рассматриваются. Экспериментальная проверка проведена только для пучков с максимально вероятными энергиями 6, 9 и 10 МэВ. Вместе с тем, пучки с энергией электронов 1-2 МэВ активно используются во многих радиационных технологиях, в основном связанных с модификацией полимеров. Не учтено, что при низких энергиях распределение Ландау не будет с достаточной точностью описывать энергетический спектр пучка.

4. Результаты работы были доложены на нескольких научных конференциях по ядерной физике и радиационным технологиям, но ни разу не докладывались на специализированных конференциях по ускорителям заряженных частиц.

5. В диссертации содержится большое число опечаток, особенно – в англоязычных названиях и обозначениях. Также имеются неточности в описании применения некоторых радиационных технологий и применяемых установок.

Указанные замечания не снижают значимости диссертации. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук. 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. Диссертация оформлена 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. В целом по

актуальности, новизне, научной и практической значимости 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, доцент
заведующий кафедрой электрофизических установок Института ядерной физики и технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

____ Полозов Сергей Маркович

13 января 2026г.

Контактные данные:

тел.: +7(495)788-56-99, доб. 9940

e-mail: smpolozov@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.20 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Адрес места работы: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

E-mail SMPolozov@mephi.ru , телефон: +7 495 7885699 *9940

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт ядерной физики и технологий, кафедра электрофизических установок, заведующий кафедрой

Подпись С.М. Полозова заверяю

ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ДИРЕКТОРА ДКПСР
НОСОВА О.В.

