

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

На правах рукописи

САВАН САЛАХ ИБРАХИМ А.

УДК 004.942:519.6

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДОЗИМЕТРИИ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы.
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Лазурик Валентин Тимофеевич

Харьков – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. ДОЗИМЕТРИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	20
1.1. Радиационные технологии на базе ускорителей электронов.	20
1.2. Методы дозиметрии пучков высокоэнергетических электронов	28
1.3. Определение энергии электронов в технологических процессах	32
1.4. Выводы раздела 1	38
РАЗДЕЛ 2. ЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДОЗИМЕТРИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	39
2.1. Сравнение эмпирических формул, рекомендованных международными стандартами	39
2.2. Эмпирические формулы для дозиметрии методом параметрической подгонки полуэмпирической модели распределения дозы	45
2.3. Апробация метода параметрической подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений	50
2.3.1. Измерения глубинных распределений дозы электронного излучения методом дозиметрического клина	50
2.3.2. Обработка результатов измерений распределений дозы электронного излучения в дозиметрической пленке	56
2.4. Выводы раздела 2	60
РАЗДЕЛ 3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ	63
3.1. Формализация процедуры определения практического пробега	63
3.2. Численное дифференцирование распределений дозы по глубине в мишенях из различных материалов	66
3.3. Сравнение точности методов численного дифференцирования распределений дозы для получения практического пробега	74

3.4. Выводы раздела 3	77
РАЗДЕЛ 4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ	80
4.1. Оценки области допустимых значений энергии электронов	80
4.2. Формализация калибровочной симметрии распределений дозы электронного излучения	85
4.3. Расчет границ области допустимых значений энергии электронов	91
4.4. Выводы раздела 4	95
РАЗДЕЛ 5. ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ В ДОЗИМЕТРИИ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	97
5.1. Технология получения и сохранения результатов компьютерных экспериментов	97
5.2. Сравнение методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы на наборах тестовых данных	100
5.3. Апробация методов численного дифференцирования результатов измерений дозы, выполненных методом дозиметрического клина	107
5.4. Выводы раздела 5	112
ВЫВОДЫ	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Сравнение методов численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Погрешности вычислительных методов определения практического пробега электронов	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В последние годы наблюдается резкое увеличение числа промышленных радиационных установок, расширение ассортимента обрабатываемых ионизирующим излучением изделий, разработка и внедрение новых способов и методов радиационной обработки. Пучки электронов (ЕВ) и тормозное излучение (X-ray) широко используются в различных промышленных радиационно-технологических процессах. К таким процессам, в частности, относятся стерилизация медицинских препаратов и инструментария, пастеризация и стерилизация пищевых продуктов, радиационная полимеризация и вулканизация, радиационная обработка сельскохозяйственной продукции, разработка новых материалов с уникальными свойствами, очистка сточных вод и топочных газов, таможенный контроль и др.

Сегодня радиационные технологии представляют собой системы с высокой интеграцией научно-технических решений из различных предметных областей производственной деятельности общества. Эффективное использование радиационных технологий порождает ряд сложных научно-технических задач, которые зависят от вида используемого излучения, типа радиационной установки, вида радиационно-технологического процесса и объектов, проходящих радиационную обработку.

При планировании радиационно-технологического процесса для каждой радиационной установки требуется решить следующие задачи:

- выбрать безопасный режим работы и надежные методы контроля процесса облучения;
- определить оптимальный режим работы функциональных элементов радиационного оборудования с точки зрения качества выполняемых работ, временных и финансовых затрат на их выполнение;

- подготовить научно обоснованные доказательства, что радиационно-технологический процесс проведен в соответствии с действующими международными и региональными стандартами.

Решение этих задач экспериментальными методами требуют огромных материальных и временных затрат и не может обеспечить эффективное использование радиационно-технологических установок. Поэтому, успех применения ионизирующих излучений в радиационных технологиях в значительной степени зависит от разработки вычислительных методов и компьютерных программ для моделирования процессов облучения продукции на радиационно-технологических линиях.

Компьютерное моделирование в радиационных технологиях сегодня является одним из основных инструментов для:

- расчета пространственных распределений дозы излучения в облучаемых объектах при планировании процесса облучения;
- поиска оптимальных режимов работы и параметров облучательных установок;
- оценки безопасности режимов работы облучательных установок;
- выбор методов контроля процесса облучения;
- научно-обоснованной интерпретации результатов измерений, полученных методами контроля параметров облучательных установок;
- разработки новых методов обработки продукции на радиационно-технологических линиях.

Значимость компьютерного моделирования при решении практических задач в радиационных технологиях отмечена в международных стандартах по дозиметрии ионизирующих излучений в радиационных технологиях [1-5]. Отметим, что в настоящее время имеются мощные программные пакеты MCNP, ITS, EGS, GEANT, PENELOPE и др., которые обеспечивают моделирование процессов прохождения ионизирующих излучений через вещество [6]. Эти пакеты, как правило, представляют собой среду разработки, которая позволяет создавать специализированные компьютерные программы для решения

различных ядерно-физических задач, в том числе и задач в области радиационных технологий. Однако создание специализированной компьютерной программы требует коллектива профессионалов, включающего физиков – специалистов в области переноса ионизирующего излучения через вещество, инженеров – специалистов в области радиационного оборудования и дозиметрии, программистов, способных реализовать модели радиационно-технологических процессов в виде алгоритмов моделирования этих процессов в интерактивной среде разработки. При этом возникает серьёзная задача верификации созданной специализированной компьютерной программы, которая реализует конкретную модель радиационно-технологического процесса. Решение этой задачи требует планирования и проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса облучения на конкретной радиационно-технологической линии.

Приведенное выше описание процесса создания специализированного программного обеспечения объясняет существующие проблемы инженерно-технических работников в области радиационных технологий, которые не имеют специальной подготовки в области прохождения ионизирующего излучения через вещество и компьютерных технологий. В этой связи представляет интерес разработанная сотрудниками ФКН ХНУ Информационная Система для моделирования процессов облучения на радиационно-технологических линиях, использующих пучки электронов и тормозное излучение от высокоэнергетических электронов [7-14]. Эта Информационная Система включает следующие основные компоненты:

- пакет специализированных прикладных программ RT-Office для моделирования методом Монте-Карло процессов переноса электронов, тормозного излучения и гамма квантов в диапазоне энергий от 0.02 до 25 МэВ в гетерогенных мишенях и решения практических задач для промышленных радиационных технологий;
- базы данных с информацией о радиационном оборудовании и особенностях различных радиационно-технологических процессов;

- интерактивные учебники по моделированию радиационно-технологических процессов.

Существенной особенностью информационной системы RT-Office, является то, что её специализированные компьютерные программы верифицированы на основе научно-обоснованной интерпретации результатов, специально запланированных и проведенных экспериментальных исследований. Пакет прикладных программ RT-Office рекомендован Международным Агентством по Атомной Энергии (IAEA) для решения широкого круга задач в радиационных технологиях [14].

В перечне практических задач, возникающих при использовании радиационных технологий, наряду с задачами моделирования пространственных распределений дозы излучения в облучаемых объектах, важными являются задачи выбора методов контроля процесса облучения и научного обоснования выводов, сделанных на основе результатов измерений, проведенных этими методами контроля. Этот класс задач относится к дозиметрии (ионизирующих излучений) – разделу прикладной ядерной физики, предметом исследования которого является определение физических величин, характеризующих воздействие ионизирующих излучений на среду, и разработка методов и средств измерения этих величин.

Вопросы развития дозиметрии излучения постоянно обсуждаются на координационных заседаниях Международного Агентства по Атомной Энергии (IAEA) – Quality Control Methods and Procedures for Radiation Technology. В частности, на этих заседаниях неоднократно декларировалось, что дальнейшее развитие и успех радиационных технологий напрямую зависит от развития средств моделирования процессов облучения, обработки результатов дозиметрических измерений и компьютерного анализа. В настоящее время важным направлением развития дозиметрии ионизирующего излучения является повышение информативности результатов обработки измерений, выполненных с использованием стандартного оборудования, применяемого в радиационных технологиях.

Одной из проблем дозиметрии электронных пучков в радиационных технологиях является определение характеристик энергии электронов [1]. Методы, которые используются сегодня в радиационных центрах [2, 3], основаны на измерении глубинного распределения дозы с помощью дозиметрического клина или стека и, по результатам измерений определения пространственных характеристик распределения дозы электронного излучения [2], таких как практический пробег R_p электронов и глубина половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} . По значениям пространственных характеристик распределения дозы, на основе эмпирических формул, рассчитывают значения характеристик энергии электронного пучка [2], таких как наиболее вероятная энергия E_p и средняя энергия E_{av} электронов. В международных стандартах ([1 - 3]) приведены формальные процедуры определения пространственных характеристик распределения дозы. Однако результаты измерений глубинного распределения дозы представляют собой наборы дискретных данных и, вследствие этого, формальные процедуры требуют решения некорректных математических задач. Для получения квазирешения этих задач результаты измерений аппроксимируют с использованием различных математических методов и видов функций [15, 16]. Поэтому, одной из возможностей увеличения точности и информативности дозиметрии электронных пучков является развитие вычислительных методов обработки результатов измерений.

Отметим, что увеличение информативности и точности вычислительных методов, как правило, опирается на использование физических закономерностей в алгоритмах вычислений. В связи с этим представляют интерес предложенные В.Т. Лазуриком методы обработки результатов измерений глубинных распределений дозы [16 - 18] на основе подгонки параметров полуэмпирической модели [7] поглощения энергии электронов в мишени. Эти методы успешно прошли апробацию при обработке результатов измерений, проведенных на стандартном дозиметрическом оборудовании в стерилизационном центре Института Ядерной Химии и Технологий (ИНСТ) [19 - 22]. Кроме этого, получили дальнейшее развитие вычислительные методы, базирующиеся на нейронных

сетях, для решения задач восстановления характеристик энергии электронного излучения на основе результатов измерения глубинных распределений заряда в стекле [23 - 30]. Для обучения нейронных сетей были предложены и использованы полуэмпирические модели прохождения электронного излучения через вещество и статистические модели процесса измерения распределения заряда в поглотителях. Этот подход позволил разработать рекомендации относительно проектирования программно-аппаратных комплексов дозиметрии электронного излучения.

Научные исследования в области моделирования радиационно-технологических процессов и вычислительных методов дозиметрии ионизирующих излучений активно ведутся во всех государствах мира с высоким уровнем наукоемких технологий. Об этом свидетельствует большое число научных журналов, в которых публикуются статьи, посвященные разработке, развитию и усовершенствованию методов моделирования, обработке результатов моделирования и результатов натуральных экспериментов, верификации и валидации моделей, разработанных для радиационных технологий. Укажем некоторые из них: *Radiation Protection Dosimetry*, *The Journal of Nuclear Medicine*, *Nuclear Science and Engineering*, *Radiation Physics and Chemistry*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, *Radiation and Environment Biophysics*, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, *Applied Radiation and Isotopes*. Следует отметить международные научно-практические конференции и курсы по использованию средств дозиметрии излучения, на которых обсуждаются вопросы моделирования и математической обработки в радиационных технологиях: *International Meeting on Radiation Processing*, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, *International Computational Accelerator Physics*, *International Conference on Electron Beam Technologies*, *International Workshop on Monte Carlo codes*.

В этих научно-практических направлениях активно работали Акерман А. Ф., Иванов В. И., Кольчужкин А. М., Уваров В. Л. (см. напр. работы [31 - 35]) и Berger M. J., Hableib J.A., Seltzer S.M., Mehta K., Miller A., Mittendorfer J., Saylor M. C., Tabata T., Weiss D. E., ([36 - 43]). Это далеко не полный список

разработчиков методов и средств компьютерного моделирования процессов взаимодействия излучения с веществом, которые направили свои усилия на решение практических задач дозиметрии ионизирующих излучений в радиационных технологиях.

В диссертационной работе разработана вычислительных методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения проводится на основе использования полуэмпирических моделей процесса формирования пространственных распределений энергии электронов, переданной веществу мишени. Такой подход позволяет в вычислительных методах учесть закономерности физических процессов и, следовательно, существенно повысить точность и информативность результатов обработки измерений, что важно как для развития специализированных вычислительных методов, так и для дозиметрического контроля в радиационных технологиях. Поэтому, тема исследований, проведенных в данной диссертации, направленная на решение важной научно-практической задачи повышения информативности и точности вычислительных методов обработки результатов измерений, проведенных с использованием стандартного оборудования для радиационных технологий, является актуальной.

Связь работы с научными программами, темами, планами

Выбранное в диссертационной работе направление исследований является частью научных работ, которые проводятся в Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина в рамках задач НИР МОН Украины, и связано с выполнением таких тем исследований: «Математичне та комп'ютерне моделювання інформаційних процесів в складних природних та технічних системах» (номер государственной регистрации 0112U002098 срок выполнения: 2012 – 2014 гг.), «Розробка методик зменшення дозових навантажень при поводженні та зберіганні радіоактивних відходів на території АЕС» (номер государственной регистрации 0115U000496 срок выполнения: 2015 – 2016 гг.), «Зміна характеристик зовнішнього випромінювання при сухому зберіганні

відпрацьованого ядерного палива АЕС України» (номер государственной регистрации 0116U000828 срок выполнения: 2016 – 2017 гг.), «Моделі інформаційних процесів та методи їх обробки» (номер государственной регистрации 0116U003141 срок выполнения: 2016 – 2020 гг.), в которых соискатель разрабатывал вычислительные методы для обработки результатов измерения.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка вычислительных методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения, оценки неопределенности характеристик энергии электронного излучения, получаемых на основе этих методов, и формирование научно-обоснованных рекомендаций по повышению информативности дозиметрии в радиационных технологиях.

Для достижения цели нужно решить следующие задачи:

1. Формализация методов определения характеристик энергии электронов с использованием стандартного оборудования дозиметрии электронного излучения в радиационных технологиях.
2. Сравнение эмпирических соотношений для зависимости наиболее вероятной энергии E_p и средней энергии E_{Av} электронов в пучке от величин практического пробега R_p электронов и глубины половинного уменьшения R_{50} максимального значения дозы в мишени, которые рекомендованы международными стандартами для применения в дозиметрии.
3. Сравнение методов определения пространственных характеристик глубинных распределений дозы (величин практического пробега R_p электронов и глубины половинного уменьшения R_{50} максимального значения дозы) в мишени на основе аппроксимации результатов измерений, проведенных с использованием стандартного дозиметрического оборудования.

4. Компьютерное моделирование серии экспериментов и на их основе проведение статистических оценок случайной погрешности методов определения пространственных характеристик глубинных распределений дозы электронного излучения.

5. Апробация развитых вычислительных методов на измерениях, выполненных на радиационно-технологических линиях стерилизационного центра и формирование рекомендаций по дозиметрии электронного излучения высоких энергий в радиационных технологиях.

Объектом исследования является процесс дозиметрии электронного излучения высоких энергий в радиационных технологиях.

Предметом исследования являются вычислительные методы обработки глубинных распределений дозы электронного излучения, которые были измерены стандартными методами с помощью дозиметрического клина или стека.

Методы исследования

К методам исследования относятся:

- компьютерное моделирование методом Монте-Карло прохождения электронов в веществе с использованием детальной физической модели – для проведения серий компьютерных экспериментов, результаты которых позволяют сравнить точности вычислительных методов;
- формализация эмпирических закономерностей физических процессов взаимодействия электронов с веществом мишени – для получения математических соотношений, которые позволяют разрабатывать новые методы численного дифференцирования распределений дозы электронного излучения;
- аппроксимация наборов данных для получения эмпирических формул, которые необходимы при разработке вычислительных методов.

Научная новизна полученных результатов

– *впервые* предложен показатель погрешности эмпирических формул, какие связывают характеристики энергии электронов с пространственными характеристиками глубинных распределений дозы. Использование этого показателя позволило выявить причины различий значений энергий, которые определяются согласно эмпирическим формулам, приведенным в международных стандартах по дозиметрии электронного излучения;

– *впервые* показано, что полуэмпирическая модель поглощения энергии электронов позволяет с удовлетворительной точностью аппроксимировать не только значения глубинных распределений дозы электронного излучения, но и первую производную от этих зависимостей. Это дает возможность разрабатывать новые вычислительные методы численного дифференцирования распределений дозы по глубине в мишени;

– *впервые* на основе эмпирических закономерностей глубинного распределения дозы электронного излучения получены математические соотношения связи производной дозы по энергии электронов с производной дозы по глубине мишени. Это позволило разработать вычислительный метод численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов;

– *впервые* показано, что величина практического пробега является значением локального максимума функции точки построения касательной к кривой глубинного распределения дозы. Этот факт позволил объяснить наблюдаемое систематическое завышение величины практического пробега, который рассчитывается с использованием метода линейной аппроксимации склона глубинного распределения дозы;

– *усовершенствован* вычислительный метод определения стандартных характеристик глубинных распределений дозы на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений за счет использования полученных эмпирических формул связи пространственных характеристик распределений дозы с характеристиками энергии электронного излучения.

Практическое значение полученных результатов

На основе теоретических результатов диссертационной работы соискателем разработаны вычислительные методы дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения пригодного для использования в радиационно-технологических центрах.

– Метод оценки неопределенности результатов восстановления характеристик энергии электронов, полученных стандартными методами дозиметрии электронного излучения на основе введенного показателя погрешности эмпирических формул. Показано, что контроль процесса облучения должен проводиться с учетом величины относительной неопределенности результатов восстановления энергии электронного излучения, так как может превышать несколько процентов.

– Усовершенствованный метод определения стандартных характеристик глубинных распределений дозы на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений. В этом методе полученные эмпирические формулы обеспечивают минимальную погрешность связи пространственных характеристик распределений дозы с характеристиками энергии электронного излучения.

– Метод численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов на основе связи производной дозы по энергии электронов с производной дозы по глубине мишени. Метод позволяет корректно оценивать допустимые изменения энергии электронов в радиационно-технологическом процессе.

Проведена апробация этих вычислительных методов дозиметрии на результатах измерений, выполненных на радиационно-технологических линиях стерилизационного центра Института Ядерной Химии и Технологий (INCT) в Варшаве, Польша.

Создано программное обеспечение хранения и статистической обработки результатов моделирования тестовых примеров измерений, проведенных с использованием стандартного дозиметрического оборудования. Это полезный

инструментарий сравнения новых разрабатываемых вычислительных методов дозиметрии электронного излучения в радиационных технологиях.

Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры моделирования систем и технологий факультета компьютерных наук Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина в дисциплинах «Методология научных исследований и обработка данных», «Системы обработки научных данных» и «Компьютерное моделирование физических процессов»

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал участие в выполнении всех исследований, изложенных в оригинальной части диссертации, и в опубликованных в соавторстве работах. В [44] выполнил серию компьютерных экспериментов, получил эмпирические формулы и провел апробацию PFSEM метода дозиметрии на результатах измерений, выполненных на радиационно-технологических линиях стерилизационного центра. В [45] предложил показатель погрешности эмпирических формул, что позволило выявить причины различий эмпирических формул, приведенных в международных стандартах по дозиметрии электронного излучения, установлено, что полуэмпирическая модель поглощения энергии электронов позволяет с удовлетворительной точностью аппроксимировать первую производную глубинных распределений дозы электронного излучения. В [46] предложил программное обеспечение для хранения и статистической обработки результатов моделирования тестовых примеров измерений, которые проводятся с использованием стандартного дозиметрического оборудования. В [47] выполнил серию компьютерных экспериментов, на которых провел сравнение точности вычислительных методов определения практического пробега электронов. В [48] формализовал калибровочную симметрию глубинных распределений дозы и предложил метод численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов. В [49] провел сравнение погрешностей вычислительных методов при обработке экспериментальных данных и сформулировал рекомендации по использованию этих методов. В [50]

предложил программные сервисы, которые реализуют алгоритмы развитых в диссертации вычислительных методов дозиметрии электронного излучения. В [55] на основе предложенного метода численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов провел оценки допустимых изменений энергии электронов в процессе облучения.

Соискатель принимал участие в обсуждении и толковании результатов, обрабатывал экспериментальные данные, готовил иллюстративный и графический материал для публикаций.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на следующих научно-технических конференциях: I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (Житомир - 2015 р.); Науково-технічна конференція «Інформатика, Математика, Автоматика ІМА.:2015» (Суми – 2015 р.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології» (Житомир – 2016 р.); Всеукраїнська науково-практична інтернет - конференція «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (Луцьк - 2016 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (Харків – 2016 р.); Четверта міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні системи і технології» (Суми – 2016 р.); XVII Міжнародна Конференція по Математичному Моделюванню МКММ 2016 (Херсон – 2016 р.).

Публикации

По результатам диссертационных исследований опубликовано 13 научных трудов, 7 – в научных профессиональных изданиях Украины по техническим наукам [44-50], в том числе 4, входящих в наукометрические базы Google Scholar, RSCI, Index Copernicus [46,47,49,50], и 6 – в материалах и тезисах докладов научных и научно-технических конференций [51-56].

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка используемых источников и двух приложений. Общий объем работы составляет 142 страницы, включает в себя 48 рисунков, 19 таблиц, список используемых источников из 120 наименований на 13 страницах и два приложения на 14 страницах.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель, задачи исследования, научная новизна и практическое значение полученных результатов, связь работы с научными программами и планами.

Первый раздел посвящен дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения в радиационных технологиях. Представлен обзор радиационных технологий на базе ускорителей электронов. Приведены методы дозиметрии высокоэнергетических электронных пучков. Методы дозиметрии высокоэнергетических электронных пучков, представленные в этом разделе, использованы в работах [44, 49] при обработке результатов измерений с целью апробации развитых вычислительных методов.

Во втором разделе представлены результаты сравнения эмпирических соотношений, связывающих характеристики энергии электронного пучка (наиболее вероятная энергия E_p и средняя энергия E_{av} электронов) с пространственными характеристиками глубинного распределения дозы электронного излучения, таких как практический пробег R_p электронов и глубина половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} , рекомендованных в различных международных отчетах и стандартах по методам дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения. Проведен анализ факторов, определяющих погрешности эмпирических соотношений, и установлены причины наблюдающихся отличий. Получены эмпирические зависимости пространственных характеристик распределения дозы $R_p(E)$ и $R_{50}(E)$ от энергии электронов E для использования совместно с методом двухпараметрической

подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений. На основе этих зависимостей апробирован метод определения пространственных характеристик распределения дозы по результатам измерений, выполненных с использованием стандартного дозиметрического клина в стерилизационном центре. Результаты, полученные во втором разделе, представлены в работах [44, 45, 52, 54].

Третий раздел посвящен разработке вычислительных методов определения практического пробега электронов на основе численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения. Проведена формализация описанной в ICRU Report 35 процедуры определения практического пробега, и показано, что для корректных расчетов практического пробега требуются методы численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения. Проведена серия компьютерных экспериментов для оценки возможностей методов численного дифференцирования глубинных распределений дозы на основе подгонки полуэмпирической модели и методов полиномиальной аппроксимации (полиномы 3-й и 4-й степени) результатов измерений. Показано, что рассмотренные численные методы позволяют с удовлетворительной точностью рассчитывать значения первой производной глубинных распределений дозы. Проведено сравнение различных методов численного дифференцирования распределения дозы на основе оценки точности расчета величины практического пробега. Результаты, полученные в третьем разделе, представлены в работах [45, 46, 51].

Четвертый раздел посвящен разработке методов определения области допустимых значений энергии электронов на основе определения частных производных по энергии электронов от распределений дозы электронного излучения, измеренной с использованием стандартного оборудования в промышленных стерилизационных центрах. Исследованы возможности использования эмпирических закономерностей распределений дозы электронного излучения, в частности, калибровочной (масштабной) симметрии. Проведена формализация эмпирических закономерностей, проявляющихся в зависимости

величины дозы электронного излучения от глубины в мишени и энергии электронов. Получены соотношения, связывающие частную производную дозы по энергии электронов с частной производной дозы по глубине в мишени. Выполнена проверка развитых эмпирических методов численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов. Получены соотношения для оценки допустимых изменений энергии электронов в процессе радиационной стерилизации. На основе проведенных численных экспериментов сформулированы рекомендации по методам контроля процессов облучения в радиационных технологиях. Результаты, полученные в четвертом разделе, представлены в работах [47, 48, 53, 56].

В пятом разделе представлены результаты исследований устойчивости вычислительных методов к величине случайной составляющей погрешности обрабатываемых данных. Неопределенность вычислительного метода полагается равной среднеквадратичной ошибке результатов обработки набора тестовых глубинных распределений дозы, рассчитанной методом Монте-Карло. Сравниваются вычислительные методы обработки результатов измерений, которые отличаются размерами области обрабатываемых данных и видами функций, используемых для аппроксимации этих данных. Апробация методов численного дифференцирования глубинного распределения дозы электронного излучения выполняется на основе данных, полученных в специально проведенных измерениях. Оценивается устойчивость этих методов к величине случайной составляющей погрешности результатов измерений. На основе результатов исследований обосновываются рекомендации по выбору вычислительных методов для дозиметрии электронного излучения. Результаты, полученные в пятом разделе, представлены в работах [49, 50, 55].

РАЗДЕЛ 1

ДОЗИМЕТРИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

1.1. Радиационные технологии на базе ускорителей электронов

Промышленные радиационные технологии представляют собой процессы обработки различных изделий и материалов с направленным воздействием ионизирующего излучения, которые приводят к полезному изменению их физических, химических или биологических характеристик, а также уменьшают влияние производства на окружающую среду [35, 57-60]. Радиационные технологии являются неотъемлемой стороной нашей жизни, рынок применения которых уже сегодня по размеру сопоставим с ядерной энергетикой.

Пучки ускоренных электронов, тормозное излучение, генерируемое пучками электронов, и гамма излучение от радионуклидов являются основными источниками ионизирующего излучения, которое используется в промышленных радиационных технологиях [61-65]. Выбор источника излучения обычно зависит от практических требований процесса облучения, таких как величина поглощенной дозы, неоднородность поглощенной дозы, толщина обрабатываемого материала, плотность и конфигурация изделий, производительность процесса обработки, капитальные и эксплуатационные расходы.

Успешное применение радиационных технологий по сравнению с традиционными термическими или химическими технологиями обеспечивает значительные преимущества, такие как увеличение производительности обработки, уменьшение энергопотребления, экономию сырья и материала, уменьшение загрязнения окружающей среды, соответствие экологическим нормам, прецизионный контроль процесса и обрабатываемой продукции, получение продукции высшего качества, низкие эксплуатационные расходы, высокие экономические показатели [66-73].

Радиационные технологии начали разрабатываться более 70 лет тому назад. С того времени много полезных и уникальных радиационно-технологических процессов было разработано и внедрено на практике, с каждым годом область их применения расширяется.

Примерами таких технологий являются: радиационная полимеризация и вулканизация, производство композиционных материалов, отверждение лакокрасочных покрытий, радиационная обработка сельскохозяйственной продукции и дезинсекция зерна, пастеризация продуктов питания, стерилизация медицинских препаратов и инструментария, обеззараживание отходов лечебно-профилактических учреждений, разработка новых материалов с уникальными свойствами, производство нано-материалов, производство гидрогелей для медицины и инженерии, очистка сточных и промышленных вод, очистка осадков сточных вод и топочных газов, таможенный контроль, дефектоскопия, и др.

Под эгидой Международного Агентства по Атомной Энергии, МАГАТЭ, в рамках концепции устойчивого развития международное сообщество начало активно продвигать радиационные технологии в развитых и развивающихся странах. МАГАТЭ является главным международным форумом научно-технического сотрудничества в области мирного и безопасного использования ядерной энергии и радиационных технологий. МАГАТЭ через национальные и региональные проекты технического сотрудничества (ТС), создание центров радиационных технологий и содействие проведению научно-исследовательских работ осуществляет мирное использование ядерных и радиационных технологий для широкого спектра применений [74- 79].

Разработки новых радиационно-технологических процессов, которые используют ускорители электронов, были реализованы в Иране, Египте, Пакистане, Алжире, Бангладеш, Вьетнаме, Польше и в других странах. В частности, разработка и внедрение радиационно-технологических процессов – «Радиационная очистка топочных газов теплоэлектростанций с использованием ускорителей электронов» были реализованы в Болгарии, Польше, Саудовской

Аравии, Китае. Разработка и внедрение проекта «Радиационная очистка сточных вод» реализована в Австрии, Бразилии, Канаде, России, Южной Корее, Японии.

В рамках программ ТС МАГАТЭ проведено модернизацию радиационного оборудования радиационно-технологических центров в странах-участницах: ввод в эксплуатацию ускорителей электронов в Тунисе и Саудовской Аравии, модернизацию ускорителей электронов в Польше.

Радиационная полимеризация мономер-олигомерных систем [77, 80-83]

Получение полимеров путем полимеризации мономеров и олигомеров в настоящее время осуществляется различными методами, такими как: «вещественным» иницированием, т. е. для осуществления полимеризации мономеров применяют инициаторы или катализаторы; термическим иницированием; фотохимическим иницированием; радиационным иницированием.

Преимущества радиационной полимеризации:

- Возможность полимеризации мономеров, которые полимеризуются с большими трудностями обычными методами. К таким мономерам, в частности, относятся некоторые фторсодержащие соединения, образующие ценные в практическом отношении термостойкие и химически стойкие полимеры.
- Легкость и эффективность осуществления полимеризации в твердой фазе, а также полимеризации канальных и слоевых соединений включения.
- Получение полимеров исключительно высокой степени чистоты, не содержащих остатков инициаторов, катализаторов и других вспомогательных соединений, неизбежно присутствующих в полимере при проведении полимеризации обычными приемами, и существенно ухудшающих его эксплуатационные свойства. Это имеет важное значение для полимеров, используемых в радиоэлектронике и медицине.
- Радиационное иницирование отличается исключительной универсальностью в отношении выбора температурного интервала полимеризации. Процесс можно проводить с высокими или удовлетворительными

скоростями при обычных или низких температурах в тех случаях, когда применение инициаторов или катализаторов требует более высоких температур.

- Радиационная полимеризация отличается от обычной более надежным контролем реакции.
- Возможность осуществления полимеризации «на месте» с целью получения полимерных деталей в труднодоступных конструкциях («впечатывающиеся» прокладки, неразъемные детали и т. п.).
- Высокие скорости процессов и экономия производственных площадей (при условии местной защиты) по сравнению с традиционным процессом полимеризации.
- Радиационная технология или совсем не продуцирует вредных отходов, или существенно снижает их объем, не загрязняет воздух и требует меньшего расхода воды. Поэтому с экологической точки зрения радиационная технология предпочтительнее, чем традиционная термохимическая.

Сегодня термохимический метод отверждения, например, полиэфирных лаков требует времени выдержки в печах несколько часов. Радиационная полимеризация полиэфирных лаков реализуется в течение секунд, минут.

Радиационно-химические превращения в мономерных и полимерных системах [84-86].

При взаимодействии ионизирующего излучения с различными материалами последовательность процессов, развивающихся в веществе после поглощения энергии излучений, условно принято делить на физическую, физико-химическую и химическую стадии.

Физическая стадия происходит за время $10^{-16} - 10^{-15}$ с. и включает процессы поглощения, перераспределения и деградации поглощенной энергии ионизирующего излучения в веществе. В результате ионизации и возбуждения молекул образуются: ионы (M^+), возбужденные ионы (M^{+*}), электроны, возбужденные состояния молекул (M^*), сверхвозбужденные состояния молекул (M^{**}), свободные радикалы R , которые имеют не скомпенсированный заряд.

Общий радиационно-химический выход первичных заряженных и возбужденных частиц составляет $G \approx 7-10$ частиц/100 эВ. Радиационно-химический выход G характеризует число молекул, участвующих в реакциях, на 100 эВ поглощенной энергии ионизирующих частиц.

На физико-химической стадии за время $10^{-13}-10^{-10}$ с. протекают реакции заряженных и возбужденных частиц, процессы передачи энергии, и молекулярная система переходит в состояние теплового равновесия. На химической стадии вдоль треков частиц протекают реакции образовавшихся ионов, электронов, свободных радикалов друг с другом и с молекулами среды.

При поглощении ионизирующих излучений в молекулярной системе в результате ионизации и возбуждения образуются: ионы, электроны, свободные радикалы и другие промежуточные активные частицы, которые характеризуются высокой реакционной способностью, малым временем жизни и большими константами скорости реакций. Образовавшиеся частицы – инициаторы разнообразных химических реакций, вызывающих изменения свойств облучаемого объекта: полимеризацию мономеров, сшивку полимеров, прививку молекул одного вещества к другому, деструкцию, синтез новых соединений и т.д.

Под действием ионизирующих излучений в полимерах образуются поперечные межмолекулярные и внутримолекулярные связи; протекают процессы разрыва связей в главной цепи и боковых группах, реакции прививки, окисления и другие; происходит распад и образование винильных, виниленовых групп, а также изомеризация, циклизация.

Вулканизация каучуков, сшивка полиолефинов, отверждение лакокрасочных покрытий и компаундов под действием ионизирующего излучения – все это синонимы структурирования, т.е. образование сшитых, трехмерных структур из исходных структур макромолекул. Когда происходит сшивка макромолекул, образуется гель фракция, которая не растворяется даже в сильных растворителях. Золь фракция – это растворимая фракция полимера (макромолекулы линейной или разветвленной формы).

Модификация полимерной изоляции кабелей и проводов [87-92].

В результате облучения кабелей и проводов с изоляцией из полиэтилена (ПЭ) происходит направленное изменение свойств изоляции – она становится термо-, огне-, масло-, радиационно-стойкой, либо с объединенной резистивностью к этим агентам, что делает возможным использовать дешевые провода и кабели с изоляцией из полиэтилена вместо дорогих проводов с изоляцией из тефлона в экстремальных условиях эксплуатации. Например, кабели с ПЭ изоляцией эффективно используются на атомных электростанциях и для погружных насосов при добыче нефти с рабочей температурой до 120 °С.

В связи с тем, что сечение проводов может быть достаточно большим (диаметр от 0.1 до 120 мм), для модификации изоляции кабелей и проводов с целью обеспечения равномерного распределения поглощенной дозы электронов используется процесс 2х или 4х – стороннего облучения.

На рис. 1.1 представлен вид сканера с дополнительными электромагнитами и схема 4х – стороннего облучения изоляции кабеля пучком электронов.



Рис.1.1. Вид сканера с дополнительными электромагнитами для 4х – стороннего облучения изоляции кабеля. Схема 4х – стороннего облучения изоляции кабеля: 1 – магнитный переключатель, 2 – система сканирования, 3 – траектории движения электронов, 4 – поворотный магнит, 5 – выходное окно сканера, 6 – область облучения изоляции кабелей.

Производство термостойких пластиков [64, 77, 93-94].

Радиационной обработкой можно повысить термостойкость большинства пластиков, что повышает их эксплуатационные характеристики и расширяет области их использования. Например, радиационно-модифицированные полиэтиленовые трубы могут применяться для перекачки любых жидкостей с температурой до 100⁰С и под давлением $6 \cdot 10^5$ Па. Такие трубы могут эксплуатироваться в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения. При этом ресурс эксплуатации таких систем в несколько раз выше (более 25 лет), чем стальных из-за отсутствия коррозии при существенно меньшей стоимости.

Производство материалов с эффектом «памяти» формы [95-98].

Эффект «памяти» формы заключается в способности облученного и деформированного полиэтилена или любого другого полимера, имеющего кристаллическую фазу, возвращаться к исходному состоянию после прогрева. ПЭ относится к кристаллизующимся полимерам. Температуру, при которой исчезает кристаллическая фаза полимера, принимают за его точку плавления. Выше этой температуры ПЭ находится в вязкотекучем состоянии.

Если ПЭ образец сначала подвергнуть радиационному воздействию, т. е. создать в нем трехмерную сетчатую структуру, а затем нагреть выше температуры плавления и деформировать, то при последующем охлаждении с сохранением напряжения в образце вновь происходит кристаллизация, и макромолекулы локализуются в новом положении. Однако, при нагреве образца выше температуры плавления, т. е. удалении кристаллической фазы, образец редуформируется под влиянием межмакромолекулярных связей и «вспоминает» ту форму, которую он имел при облучении.

На основании этого эффекта из полимеров изготавливают термоусаживаемые трубы, муфты, ленты, упаковочные пленки, которые эффективно используются для герметизации стыков труб, кабелей, герметичной упаковки различных материалов и изделий.

Радиационная стерилизация медицинских изделий [38, 99-102].

Радиационная стерилизация медицинских изделий и материалов является одним из наиболее развитых радиационно-технологических процессов, внедренных во многих странах. Стерилизация медицинских изделий сводится к подавлению ионизирующим излучением жизнеспособности микрофлоры, возникшей в процессе производства изделия. Технология радиационной стерилизации базируется на способности ионизирующего излучения уничтожать посредством разрушения ДНК ткани живых микроорганизмов, образующиеся в медицинских изделиях в процессе изготовления, хранения или использования.

В производстве используют несколько видов стерилизации: ионизирующее излучение, газовая стерилизация окисью этилена и паровая, которые должны обеспечивать стерильность медицинского изделия на весь заявленный срок хранения. Использование радиационных методов стерилизации более технологично, экологически безопасно и экономически выгодно. При радиационной стерилизации медицинские изделия облучаются непосредственно в герметичной упаковке. Стоимость стерилизации ионизирующим излучением в 4 раза ниже, чем стоимость стерилизации термическим или газовым способом.

Радиационная стерилизация используется в следующих направлениях:

- стерилизации медицинских изделий;
- стерилизация лекарственных препаратов, косметических материалов и др.;
- стерилизация одноразовой одежды и белья для хирургических, инфекционных и других отделений;
- обработка тканей и органов человека;
- обработка крови и ее компонентов.

Ассортимент изделий медицинского назначения, подвергаемых радиационной стерилизации, составляет более 300 видов изделий. Чаще всего стерилизуют: одноразовые шприцы, системы переливания крови, скальпели, бинты, тампоны, вату, различного вида катетеры, иглы, шовный хирургический материал, хирургическую одежду, перевязочные материалы, и др.

Радиационная стерилизация медицинских изделий осуществляется, когда они уже помещены в герметичные упаковки, что обеспечивает длительные сроки сохранения стерильности. Диапазон используемых доз для радиационной стерилизации составляет 15 – 40 кГр. и может полностью обеспечиваться существующими радиационными установками на основе ускорителей электронов.

1.2. Дозиметрия пучков высокоэнергетических электронов

Дозиметрия ионизирующих излучений (греч. dosis доза, порция + metreo измерять) – раздел радиационной физики и измерительной техники, занимающийся измерением и изучением полей ионизирующих излучений, изучением эффектов их взаимодействия с веществом, а также создаваемых в результате этого дозных полей в веществе. Дозиметрия ионизирующих излучений широко используется при разработке методов формирования полей излучения и дозных полей с заданными параметрами. Методы дозиметрии ионизирующих излучений применяют при разработке способов использования источников ионизирующих излучений в народном хозяйстве, науке и медицине [93,103 - 104].

Экспериментальные методы дозиметрии ионизирующих излучений базируются, в основном, на способности излучения производить ионизацию вещества. Переданная в этом процессе энергия преобразуется в видимый свет (люминесцентный метод), токи проводимости в полупроводниковых системах (полупроводниковый метод), на радиолизе веществ в результате химических реакций (химический метод), на почернении фотоэмульсии или появлении в ней изображений следов ионизирующих частиц (фотографический метод), на непосредственном измерении выделяющегося в веществе тепла (калориметрический метод) [93, 105-106].

Базовые термины и определения [1, 2, 33].

Поглощенная доза (absorbed dose) ионизирующего излучения – D это отношение средней энергии dE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме

$$D = dE/dm$$

В системе СИ для дозы принята единица измерения грэй (Гр., международное Gy). 1 Гр. равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг. передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.:

Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения dD/dt – это отношение приращения поглощенной дозы dD за интервал времени dt к этому интервалу времени. Единицей мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения в системе СИ является грэй за секунду.

Дозиметр (dosimeter) – устройство или система, имеющее воспроизводимый и поддающийся измерению отклик к ионизирующему излучению, который используется для измерения поглощенной дозы в материале.

Энергия ионизирующих частиц и энергия ионизирующего излучения E в системе СИ выражаются в джоулях (Дж.). Однако, для E в ядерной физике и радиационных технологиях применяют внесистемную единицу электронвольт (эВ.):

Образцовый дозиметр (reference standard dosimeter) – дозиметр высокого метрологического качества, используемый как эталон для обеспечения единства измерений и передачи размера единицы поглощенной дозы от первичного эталона рабочим дозиметрам.

Рабочий дозиметр (routine dosimeter) – дозиметр, калиброванный с помощью первичного, рабочего эталона или эталона сравнения, и используемый для технических измерений поглощенной дозы.

Средний ток пучка (average beam current) – усредненный во времени поток электронов, производимый ускорителем электронов.

Энергия электронов (electron energy) – кинетическая энергия электронов в пучке электронов.

Пробег электронов (R) – расстояние/глубина проникновения электронов в гомогенном материале в направлении оси пучка электронов (рис. 1.2.).

Практический пробег электронов (practical range) (R_p) – расстояние от поверхности входа пучка электронов в мишень из гомогенного материала до

точки, в которой касательная к кривой зависимости дозы поглощенной дозы от глубины, построенная в точке ее наиболее крутого спада (в точке перегиба), находящейся на прямолинейном ниспадающем участке, пересекает ось глубин.

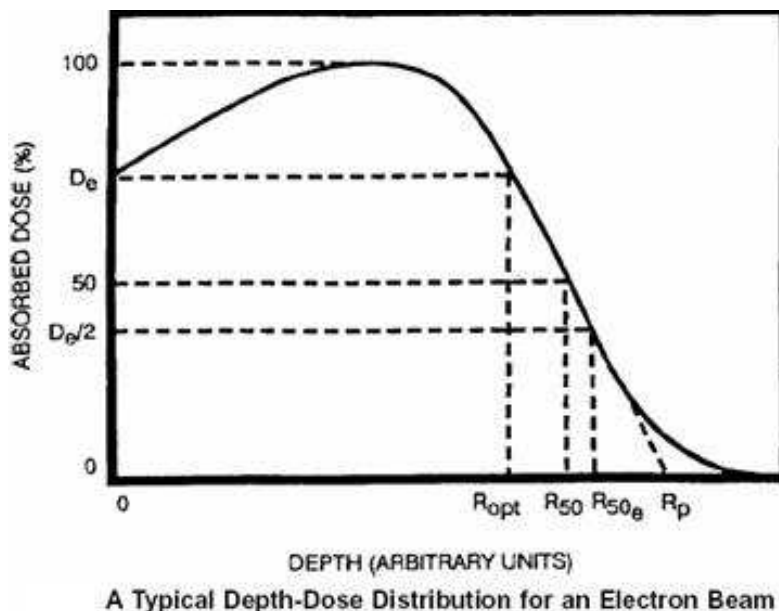


Рис.1.2. Определение характеристик пробега электронов в гомогенном материале.

Величина “половинная глубина” (half-value depth) (R_{50}) соответствует уменьшению поглощенной дозы в гомогенном материале до 50% ее максимального значения.

Оптимальная толщина (R_{opt}) при одностороннем облучением мишени пучком электронов – толщина гомогенного материала, на котором значение поглощенной дозы электронов равно значению поглощенной дозы электронов на поверхности входа пучка электронов в мишень.

Карта дозы (Dose map) – представление трехмерного распределения поглощенной дозы в облучаемом материале.

Коэффициент однородности поглощенной дозы излучения в облучаемом материале определяется отношением значений D_{max} – максимального значения поглощенной дозы к D_{min} – минимальному значению поглощенной дозы в объеме облучаемой продукции:

$$DUR = D_{max}/D_{min}$$

Величина *DUR* является одним из основных показателей контроля качества продукции, обрабатываемой ионизирующим излучением.

Предельно допустимая энергия электронов, используемая в промышленных радиационно-технологических процессах, ограничена появлением эффекта «наведенной активности» в материалах мишени или в конструкциях радиационного оборудования в результате ядерных реакций или ядерных фотоэффектов. Международным Агентством по Атомной Энергии и Всемирной Организацией Здравоохранения установлено предельное значение энергии ионизирующего излучения в 10 МэВ при проведении радиационно-технологических процессов, связанных с модификацией материалов и изделий массового потребления, обработкой медицинских изделий и пищевых продуктов.

Методы регистрации характеристик электронного излучения

Калориметрический метод регистрации ионизирующих излучений, в том числе и электронов, основан на том, что энергия ионизирующего излучения *E* поглощается веществом и превращается в тепло [93, 105-106].

Энергия излучения определяется следующим соотношением:

$$E = m \cdot C \cdot \Delta T$$

- *E* – энергия излучения,
- *C* – теплоемкость материала калориметра,
- *m* – масса материала калориметра,
- ΔT – изменение температуры материала калориметра при облучении.

Калориметрический метод позволяет непосредственно измерять переданную веществу энергию ионизирующего излучения, а, следовательно, и абсолютно определять поглощенную дозу излучения *D* в этом веществе. Калориметрический метод является одним из абсолютных методов измерения в дозиметрии ионизирующих излучений.

Химические методы регистрации ионизирующих излучений основаны на необратимых химических изменениях в некоторых веществах под действием

ионизирующих излучений [107-108]. В результате изменений облучаемая среда может изменить оптическую плотность, цвет, выход химических реакций.

Применение химических методов дозиметрии, как правило, связано с измерением больших доз (от 1 до 10^5 Гр.) электронов, гамма, нейтронов, протонов и смешанных потоков ионизирующих излучений от мощных облучательных установок. В практике используются жидкие, твердые и газообразные химические вещества, на основе которых созданы жидкие, твердотельные и газообразные химические дозиметры. Все дозиметрические пленки относятся к классу химических твердотельных дозиметров.

Твердотельные химические дозиметры изготавливают на основе полимерных пленок или стекол [109-112]. В качестве полимерных дозиметров используют пленки из различных полимерных материалов, таких как поливинилхлорид, целлофан, полиэтилен, ацетат, триацетат и др. Под действием излучения на полимерные пленки оптическая плотность пленки изменяется линейно в зависимости от дозы излучения в некотором диапазоне поглощенных доз.

1.3. Определение энергии электронов в технологических процессах

Применение прецизионных спектрометров излучения, которые широко используются в научных экспериментах для измерения энергетических характеристик пучков заряженных частиц, вызывает большие сложности в силу принципиальных ограничений по интенсивности потоков высокоэнергетического ионизирующего излучения. Поэтому в настоящее время в практике радиационно-технологических центров применяются приборы, основанные на использовании закономерностей пробег-энергия для частиц излучения [2].

Дозиметрические приборы мониторинга радиационно-технологических процессов измеряют пространственные распределения дозы или остановившегося заряда электронов, что позволяет на основе результатов измерений с использованием специальных вычислительных методов определять энергетические характеристики электронного излучения.

Движение электрона в веществе сопровождается изменением импульса частицы при каждом ее взаимодействии с атомами мишени (рис. 1.3), что приводит к потере энергии и изменению направления движения электрона в мишени. После потери всей кинетической энергии электрона останавливается, что определяет появление зарядов в точках остановки электронов в мишени.

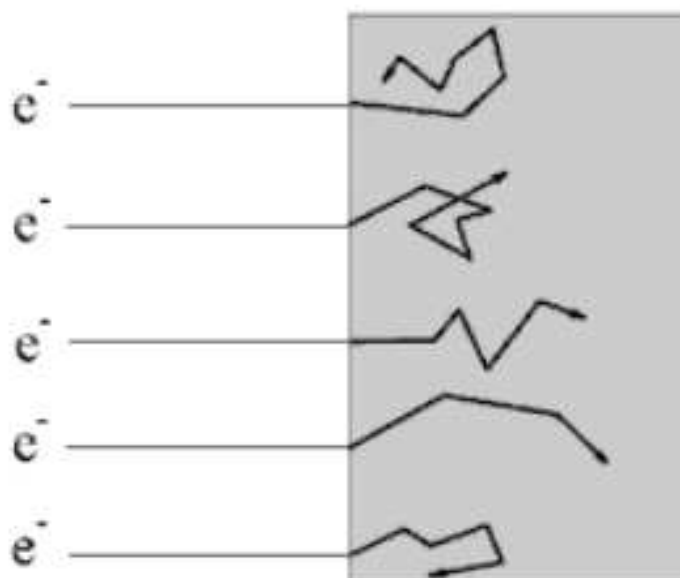


Рис. 1.3. Траектории движения электронов в мишени

Глубины прохождения частиц в мишени связаны с ее начальной энергией и, следовательно, на основе результатов измерений глубинных распределений переданной веществу энергии электронов и остановившегося заряда в мишени можно определять энергетические характеристики электронного излучения.

Измерение глубинного распределения дозы электронов

Глубинные распределения дозы электронов в полубесконечной среде для моноэнергетических пучков с различной энергией показано на рис. 1.4.

Электрон может пройти дважды через одну и ту же плоскость, параллельную границе раздела среды. Кроме того, прохождение заряженных частиц через вещество сопровождается образованием вторичных электронов, которые также дают вклад в величину дозы в мишени. Этим обусловлена нелинейность зависимости дозы электронного излучения от глубины и рост дозы на малых глубинах в мишени (рис. 1.4).

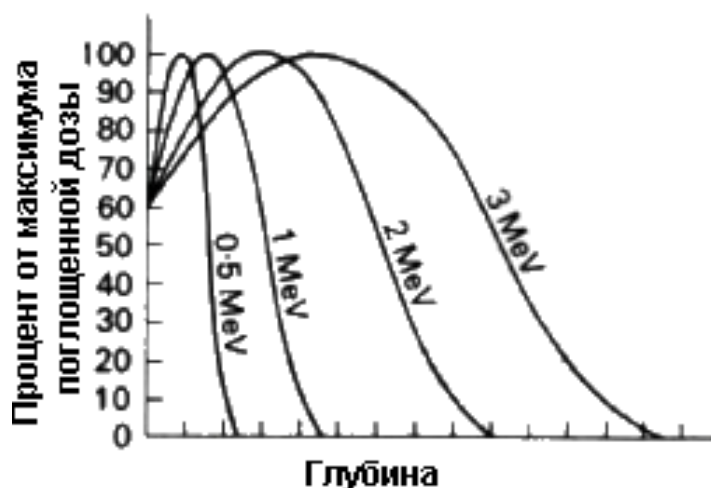


Рис. 1.4. Глубинные распределения поглощенной дозы для различных энергий ионизирующего излучения

Измерение глубинного распределения поглощенной дозы в практике радиационно-технологических центров выполняется с использованием двух видов приборов: дозиметрического стека и дозиметрического клина [113-116].

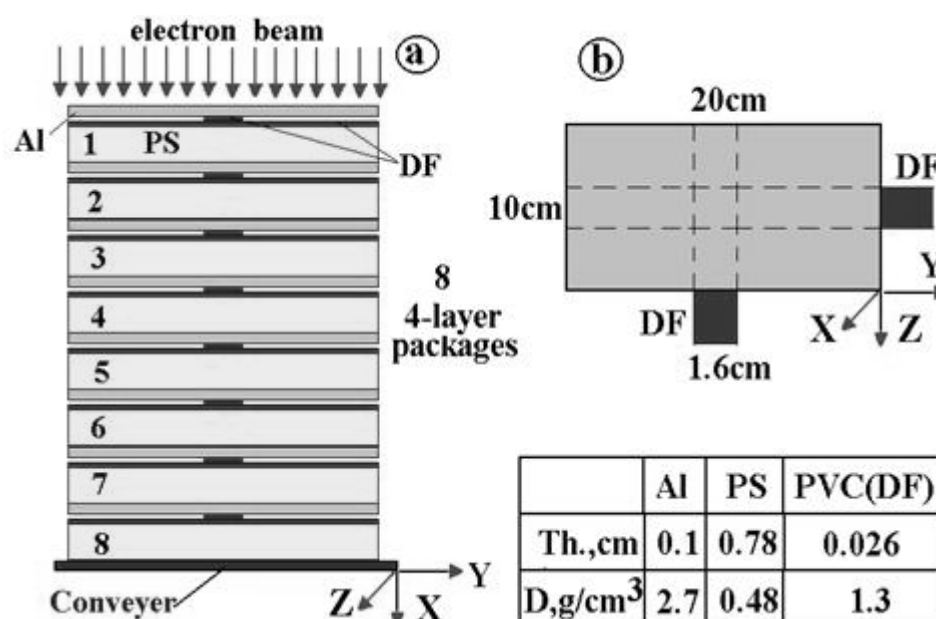


Рис. 1.5. Модель дозиметрического стека с набором дозиметрических пленок для измерения глубинного распределения дозы электронного излучения. Представлен стек, состоящий из 8 одинаковых пакетов, которые содержат слой из алюминия, слой из полистирола и дозиметрическую пленку PVC.

Стек состоит из последовательного набора пластин (поглотителей), между которыми установлены детекторы (рис. 1.5). Детектор – эмульсионная пленка,

засвечиваемая проходящими через нее электронами, располагается за поглотителем – однородной металлической пластиной, часто алюминиевой. Электроны, падающие на прибор, проходят пропорциональный их начальной энергии путь и останавливаются на некоторой глубине.

В детектирующем слое (эмульсионная пленка) поглощается часть энергии частиц, проходящих через слой и, за счет этого, изменяется прозрачность эмульсионной пленки. Облученные пленки анализируются с помощью спектрофотометра, и на основе полученных данных строится зависимость величины поглощенной дозы от глубины, на которой находилась соответствующая пленка.

Модель дозиметрического клина и его техническая реализация показаны на рисунке 1.6. Дозиметрический клин представляет собой разрезанный под углом параллелепипед, между частями которого размещена детектирующая пленка. Пучок заряженных частиц падает на прибор (рис. 1.6а). Дозиметрическая пленка засвечивается при воздействии пучка электронов в зависимости от поглощенной дозы. На пленке отображается глубинное распределение дозы электронов, так как в различные точки пленки электроны попадают после прохождения через переднюю часть клина, размер которого существенно изменяется. Глубинные распределения дозы электронов получают с помощью фотометрирования пленок.

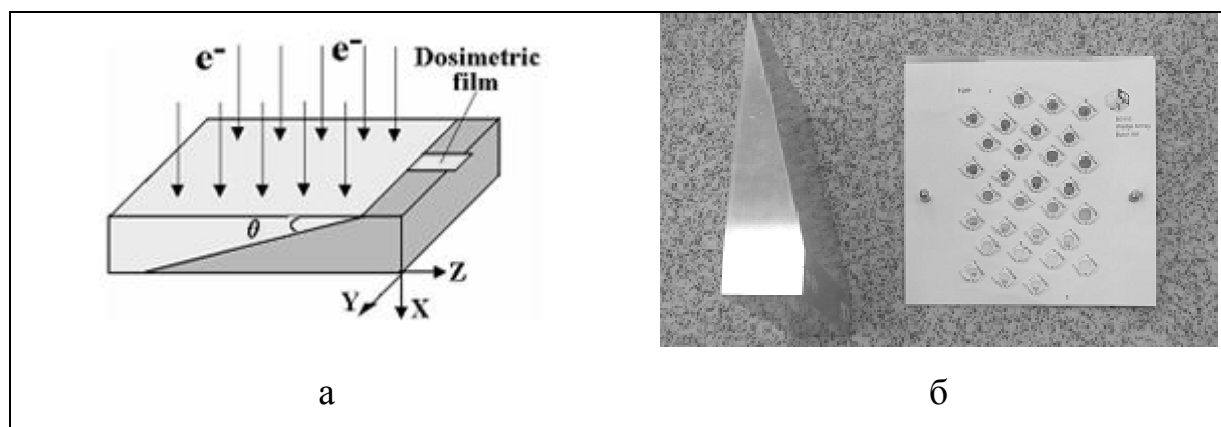


Рис. 1.6. Дозиметрический клин, для измерения распределения дозы электронного излучения в дозиметрических пленках на радиационно-технологических линиях: а) схема, б) прибор.

Процесс получения результатов измерений с использованием дозиметрических стека или клина, – облучение прибора, извлечение и анализ пленки, расчет энергетических характеристик излучения, требует выполнения разнородных операций, что не позволяет проводить мониторинг радиационно-технологических процессов в реальном времени. В этой связи представляют интерес и в последнее время получили развитие методы и приборы, базирующиеся на измерении глубинного распределения остановившихся электронов в мишени.

Измерение глубинного распределения заряда в мишени.

На рисунке 1.7 показана схема прибора мониторинга параметров электронного излучения на основе измерения глубинного распределения остановившегося заряда [117-119]. Прибор состоит из двух алюминиевых пластин разной толщины, установленных в изолированном корпусе. К каждой пластине подключен токовый интегратор.

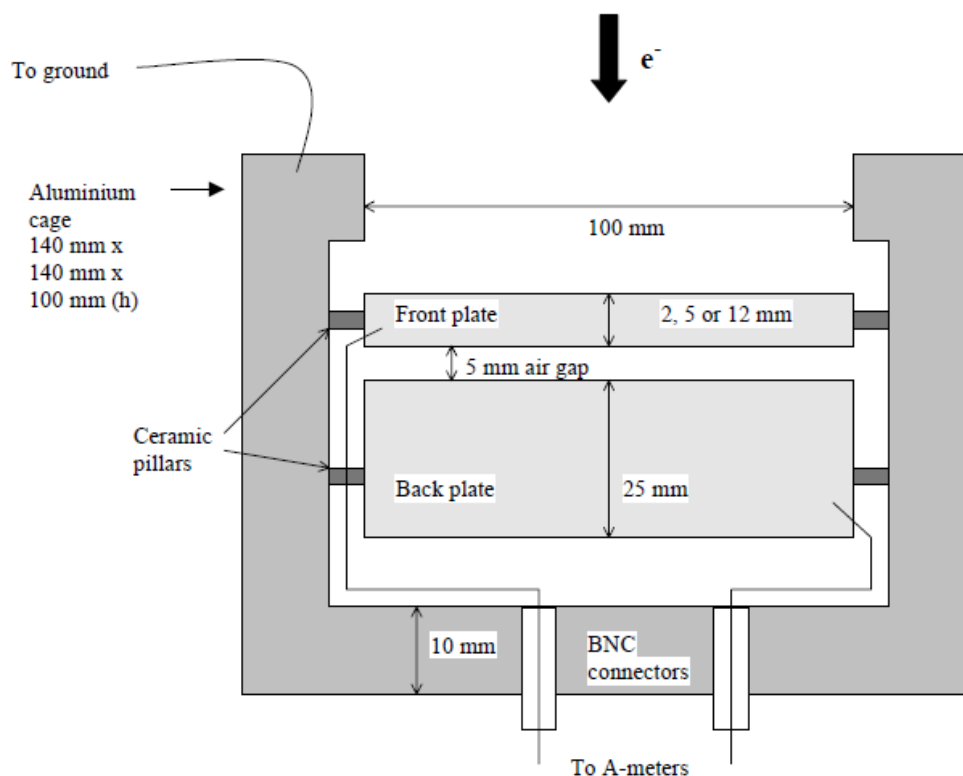


Рис. 1.7. Схема прибора для измерения остановившегося заряда

В зависимости от энергии электроны останавливаются на различной глубине, тем самым сообщая соответствующей пластине заряд. Возникающий электрический ток может быть измерен непосредственно, либо проинтегрирован за выбранный промежуток времени и измерен как заряд, остановившийся в соответствующей пластине [117].

В процессе калибровки прибора устанавливается зависимость между энергетическими характеристиками пучка электронов (E_p , E_{av}) и коэффициентом, равным отношению остановившегося в первой пластине заряда ко всему заряду, сообщенному обеим пластинам [118]. В работе [119] показано, что полученная в процессе калибровки зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией и позволяет определять стандартные характеристики энергии электронного излучения E_{av} и E_p [2].

Авторы работ [117, 118] указывают на то, что метод дозиметрии на основе измерения остановившегося заряда позволяет определять стандартные характеристики энергии электронного излучения без существенной задержки, связанной с обработкой результатов измерений, и является перспективным для реализации систем контроля радиационно-технологических процессов в реальном времени.

Отметим работу [120], в которой рассматривается устройство измерения остановившегося заряда, в виде стека, состоящего из 10 алюминиевых поглотителей (толщиной по 6 мм. первый и последний, и по 2 мм. остальные).

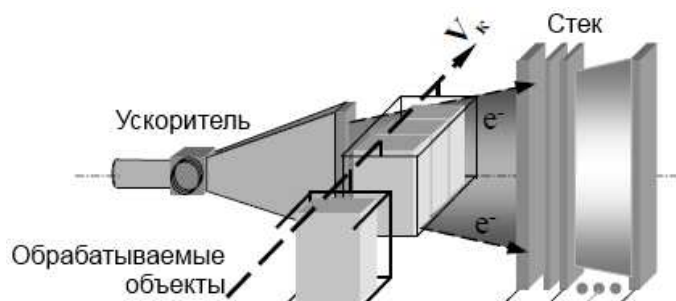


Рис. 1.8. Использование стека для контроля энергии излучения в реальном времени

Стек устанавливается за объектами облучения (рис. 1.8) и предназначен для мониторинга энергии излучения. В работе описано программное обеспечение, позволяющее выполнять контроль энергии излучения в реальном времени. Однако авторы на основе зарядового распределения рассчитывают только одну из стандартных характеристик энергии электронного излучения – среднюю энергию электронов пучка.

1.4. Выводы раздела 1

Область применения радиационных технологий на основе пучков высокоэнергетических электронов уже сегодня по размеру сопоставима с ядерной энергетикой. Под эгидой МАГАТЭ, продолжается активное продвижение радиационных технологий, как в развитых, так и развивающихся странах.

Успешная реализация радиационных технологий не возможна без современных средств дозиметрии излучений и зависит от развития методов обработки результатов дозиметрических измерений, компьютерного моделирования и анализа процессов облучения.

Применение в радиационных технологиях устройств, которые традиционно используются в научных экспериментах для измерения энергетических характеристик заряженных частиц, сложно в силу ограничений по интенсивности потоков излучения. Поэтому в практике радиационно-технологических центров применяются методы дозиметрии, основанные на использовании закономерностей пробег-энергия для частиц излучения. В этих методах дозиметрическими приборами измеряют пространственные распределения дозы или остановившегося заряда электронов и с использованием вычислительных методов определять энергетические характеристики электронного излучения.

В практике радиационно-технологических центров измерение глубинного распределения дозы высокоэнергетического электронного излучения выполняется с использованием двух видов приборов: дозиметрического клина или дозиметрического стека.

РАЗДЕЛ 2
ЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ
В ДОЗИМЕТРИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**2.1. Сравнение эмпирических формул, рекомендованных
международными стандартами**

При проведении сравнений точности эмпирических зависимостей для распределений дозы электронов в алюминии были выделены три группы соотношений:

группа 1 – эмпирические формулы, приведенные в ICRU Report 35 [2];

$$\begin{array}{ll} E_p = 5,09 * R_p + 0,2, & 5 \text{ МэВ} < E_p < 25 \text{ МэВ} \\ E_{av} = 6,20 * R_{50}, & 10 \text{ МэВ} < E_{av} < 25 \text{ МэВ} \end{array}$$

группа 2 – формулы в ISO/ASTM Standard: 51649 [1];

$$\begin{array}{ll} E = 0,423 + 4,69 * R_p + 0,0532 * R_p^2 & 2,5 \text{ МэВ} < E < 25 \text{ МэВ} \\ E = 0,734 + 5,78 * R_{50} + 0,0504 * R_{50}^2 & 2,5 \text{ МэВ} < E < 25 \text{ МэВ} \end{array}$$

группа 3 – формулы в ASTM Standard: E 1649-94 [3].

$$\begin{array}{ll} E = 0,069 + 7,44 * R_p - 8,56 * R_p^2 & 0,1 \text{ МэВ} < E < 1 \text{ МэВ} \\ E = 0,068 + 10,72 * R_{50} - 21,05 * R_{50}^2 & 0,1 \text{ МэВ} < E < 1 \text{ МэВ} \\ E = 0,256 + 4,91 * R_p - 0,0248 * R_p^2 & 1 \text{ МэВ} < E < 10 \text{ МэВ} \\ E = 0,297 + 6,61 * R_{50} - 0,325 * R_{50}^2 & 1 \text{ МэВ} < E < 10 \text{ МэВ} \\ E = 1,27 + 4,33 * R_p + 0,0596 * R_p^2 & 10 \text{ МэВ} < E < 50 \text{ МэВ} \\ E = 2,15 + 4,65 * R_{50} + 0,223 * R_{50}^2 & 10 \text{ МэВ} < E < 50 \text{ МэВ} \end{array}$$

Здесь R_p и R_{50} – пространственные характеристики распределения дозы электронного излучения: практический пробег электронов и глубина половинного уменьшения дозы в мишени соответственно.

В качестве показателя ошибки $K_{j,i}(E)$ эмпирических формул использовали относительное отклонение энергии электронов E , для которой взято значение пространственного параметра R_i , от энергии электронов $E_j(R_i)$, которая "восстановлена" с помощью эмпирической формулы из j – й группы:

$$K_{j,i}(E) = [E_j(R_i(E)) - E] / E, \quad (2.1)$$

где: $R_i(E)$ – зависимость пространственного параметра i -го вида ($i = p$ для R_p и $i = 50$ для R_{50}) от энергии электронов E ; $E_j(R_i)$ – эмпирическая формула из группы j ($j = 1, 2, 3$, в соответствии приведенным выше определениям) для зависимости энергии электронов от пространственного параметра i -го вида.

Результаты расчетов $K_{j,i}(E)$ показателей ошибки эмпирических формул для набора значений энергий электронов E и пространственных параметров $R_i(E)$ приведены в таблицах 2.1 и 2.2. В первом столбце таблиц приведены значения энергии электронов E , соответствующие этим энергиям значения R_p (для таб. 2.1) и R_{50} (для таб. 2.2) в соответствии с теми, которые приведены в ASTM Standard: E 1649-94 [3]. Значения R_p и R_{50} использовались для расчета энергии электронов в соответствии с эмпирическими формулами. Рассчитанные значения показателей ошибки $K_{j,i}(E)$ представлены в столбцах таблиц. Два числа (через знак делить) в одной ячейке таблицы показывают результаты расчетов по двум эмпирическим формулам для граничных энергий, соответствующих 1 и 10 МэВ. Первое число – значение, полученное по формуле для области до граничной энергии, второе – значение для области энергии выше этой граничной энергии. Курсивом в таблице выделены значения, рассчитанные для граничных энергий (жирный шрифт) и вне области применимости эмпирических формул.

Отметим, что для граничных энергий 1 МэВ и 10 МэВ из двух, разделенных знаком деления, первое число меньше, а второе больше нуля. Поэтому, даже наиболее полная аппроксимация данных, описанная в ASTM E 1649-94 [3], не позволяет однозначно выбрать эмпирическую формулу из предоставляемого набора для проведения расчетов в областях вблизи граничных энергий.

Таблица 2.1. Показатели относительной ошибки (%) эмпирических формул зависимости энергии $E(R_p)$ от практического пробега R_p электронов в алюминии.

E, МэВ	R_p	$K_{1,p}(E)$	$K_{2,p}(E)$	$K_{3,p}(E)$
0,2	0,0161	-	-	- 6.7
0,5	0,063	-	-	0.7
1	0,152	-	-	0.2 / 0.2
2	0,356	0.6	5.0	0.04
5	0,971	2.8	0.5	0.00
10	2,00	3.8	0.2	- 0.2/1.7
20	4,04	3.8	1.2	-1.3
50	9.89	1.1	4.0	- 0.2

Таблица 2.2. Показатели относительной ошибки (%) эмпирических формул зависимости энергии $E(R_{50})$ от значения R_{50} в алюминии.

E, МэВ	R_{50}	$K_{1,50}(E)$	$K_{2,50}(E)$	$K_{3,50}(E)$
0,2	0,0116	-	-	- 5.2
0,5	0,0448	-	-	1.2
1	0,111	-	-	- 0.1 / 2.7
2	0,259	-	11.7	- 0.6
5	0,741	- 8.1	0.9	0.3
10	1,59	- 1.4	0.5	- 0.1 / 1.1
20	3,28	1.7	1.2	- 1.0
50	7.56	- 6.2	- 5.4	0.1

Как следует из данных, приведенных в таблицах, различия в оценке энергии электронов с использованием эмпирических формул могут составлять несколько процентов и существенно зависят от диапазона (области) энергий. Этот вывод согласуется с приводимыми в официальных документах (стандартах) общими описаниями точности эмпирических формул.

Наблюдающиеся погрешности эмпирических формул для зависимости энергии электронов от пространственных параметров глубинного распределения дозы связаны со следующими факторами:

1. Неопределенностью выбора метода и вида функции для аппроксимации результатов измерений глубинного распределения дозы, что необходимо для определения значений пространственных характеристик распределения дозы электронного излучения.
2. Неопределенностью выбора метода и вида функции для аппроксимации зависимостей пространственных характеристик распределения дозы $R_p(E)$ и $R_{50}(E)$ от энергии электронов E .
3. Зависимостью результатов аппроксимации дискретных данных от размера области аппроксимации и количества данных в этой области.

На основе компьютерных экспериментов, в рамках полуэмпирической модели глубинного распределения дозы электронного излучения, оценена неопределенность методов расчета стандартных пространственных характеристик R_p и R_{50} распределения дозы за счет выбора вида функции для аппроксимации результатов измерений глубинного распределения дозы.

Значения R_p и R_{50} рассчитывали с использованием двух этапов:

На первом этапе моделировали на основе полуэмпирической модели и с использованием метода Монте-Карло величины $D(x,E)$ – глубинные распределения дозы моноэнергетических электронов с энергией электронов E в полубесконечной алюминиевой мишени. Для расчетов были использованы вычислительные блоки "Analytics" и "Monte Carlo" в программном обеспечении ModeRTL [14]. В результате, значения дозы $D(x,E)$ были получены в 50 пространственных точках, которые равномерно расположены в области глубин x от поверхности мишени $x = 0$ до $x = R_0(E)$ – полного пробега электронов в приближении непрерывного замедления.

На втором этапе определяли практический пробег электронов R_p с использованием двух численных методов, основанных на аппроксимации

полученных значений дозы $D(x,E)$ линейной функцией и полиномом 4-й степени [15]. Для аппроксимации выбирали область глубин, в которой изменение дозы в пределах 0,2-0,8 максимальной доза в мишени, в соответствии с рекомендациями ISO/ASTM Standard: 51649 [1]. В этих расчетах количество точек, в которых осуществлялась аппроксимация данных, было в диапазоне 10 – 14.

Представленные в таблице 2.3 значения R_p , получены на основе полуэмпирической модели с помощью аппроксимации данных линейной функции (значения в столбце R_p -Line) и полинома 4-й степени (значения в колонке R_p -Pol). Значения в колонке R_p -MC определены на основе метода Монте-Карло и рассчитаны как среднее значение результатов, полученных с использованием аппроксимации данных линейными функциями и полиномами 4-й степени. Оценка точности расчетов была проведена на основе различия значений, полученных с использованием этих двух методов аппроксимации.

Глубины половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} определяли с использованием набора значений $D(x,E)$, полученных на первом этапе. Максимальная доза в мишени считалась равной максимальному значению дозы в этом наборе. Значения R_{50} (данные в столбце R_{50} -Mod) определяется с помощью линейной интерполяции дозы между ближайшими узлами.

Для сравнения, в таблице 2.3 представлены значения R_p (R_p -St) и R_{50} (R_{50} -St), взятые из таблицы, приведенной в стандарте ASTM: E 1649-94 [3].

Таблица 2.3. Значения характеристик распределения дозы R_p и R_{50} в алюминиевой мишени, рассчитанные различными вычислительными методами.

E, МэВ	R_p -Line	R_p -Pol	R_p -MC	R_p -St	R_{50} -Mod	R_{50} -St
0,2	0,0160	0,0158	0.0168	0,0161	0,0114	0,0116
0,5	0,0628	0,0622	0.0641	0,063	0,0448	0,0448
1	0,1564	0,1547	0.159	0,152	0,1115	0,111
2	0,3558	0,3516	0.360	0,356	0,2576	0,259
5	0,9748	0,9617	0.983	0,971	0,7370	0,741
10	2,028	2,007	2.021	2,00	1,5904	1,59
20	4,107	4,075	4.037	4,04	3,3152	3,28

На основе приведенных в таблице данных проведена оценка неопределенности результатов, полученных в рамках полуэмпирической модели глубинного распределения дозы электронного излучения. Величина относительной неопределенности составляет несколько процентов в области низких энергий (для энергии 0.2 МэВ равна 2.8%) и уменьшается до 1% при увеличении энергии электронов до 20 МэВ.

Данные, приведенные в таблице, показывают согласие результатов моделирования пространственных характеристик распределения дозы R_p и R_{50} на основе полуэмпирической модели и с использованием метода Монте-Карло с данными, приведенными в ASTM Standard: E 1649-94 [3]. В энергетическом диапазоне, который представляет основной практический интерес для радиационных технологий, относительная неопределенность моделирования не превышает 2 %, что соответствует неопределенности обработки глубинных распределений дозы электронного излучения, измеренных с использованием алюминиевого дозиметрического клина. Отметим, что наблюдается систематическое завышение значений R_p , полученных на основе линейной аппроксимации дискретных данных (значения в колонке R_p –Line) по отношению к значениям, полученным с использованием полиномиальной аппроксимации (значения в колонке R_p –Pol).

На основании приведенных выше оценок величин неопределенностей можно заключить, что используемые вычислительные методы позволяют достаточно точно моделировать в алюминиевой мишени пространственные характеристики распределения дозы R_p и R_{50} , в рамках полуэмпирической модели глубинного распределения дозы электронного излучения.

2.2. Эмпирические формулы для дозиметрии методом параметрической подгонки полуэмпирической модели распределения дозы

Метод дозиметрии электронного излучения на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели (Parametric Fitting of Semi-Empirical Model – PFSEM метод) глубинного распределения дозы к результатам измерений, выполненных с помощью дозиметрического клина, предложен и реализован в работах [16-22, 44,49]. Очевидно, что использование вычислительных методов, основанных на физических моделях переноса электронного излучения в веществе, позволит проводить более полное восстановление информации, которая содержится в результатах измерений глубинного распределения дозы. В предложенном методе дозиметрии электронного излучения используется аппроксимация результатов измерений глубинного распределения дозы с помощью полуэмпирической модели глубинного распределения дозы моноэнергетических электронов, нормально падающих на полубесконечную мишень. Эта полуэмпирическая модель глубинного распределения дозы реализована в программном обеспечении EMID [7]. При реализации PFSEM метода дозиметрии [16-18] используется подгонка параметров полуэмпирической модели для аппроксимации результатов измерений, полученных с помощью дозиметрического клина:

$$Q^2(E_0) = \sum_{i=1}^N [D_e(x_i, E_0) - D_i]^2, \text{ при подгонке одного параметра}$$

$$Q^2(dX, E_0) = \sum_{i=1}^N [D_e(x_i + dX, E_0) - D_i]^2, \text{ при подгонке двух параметров} \quad (2.2)$$

Здесь

$D_e(x, E)$ – доза электронов с энергией E на расстоянии x от поверхности мишени,

(D_i, x_i) – нормированные результаты измерений в точках $i = 1 \dots N$, как набор пар значений доза D_i и пространственная координата x_i ,

N – число пространственных точек в одном измерении.

Метод координатного спуска используется для минимизации $Q^2(E_0)$ (при подгонке параметра E_0) или $Q^2(dX, E_0)$ (при двухпараметрической подгонке параметров E_0 и dX) при определении значения энергии электронов E_0 и смещения начальной точки dX глубинного распределения дозы.

Апробация PFSEM метода была успешно выполнена при обработке результатов измерений, полученных с использованием дозиметрического клина, в Институте Ядерной Химии и Технологии, Варшава, Польша [19-22, 44,49].

На рис. 2.1 проиллюстрирован метод обработки результатов измерений с использованием двухпараметрической подгонки полуэмпирической модели (PFSEM метод) для одного из примеров проведенных измерений распределений дозы электронов.

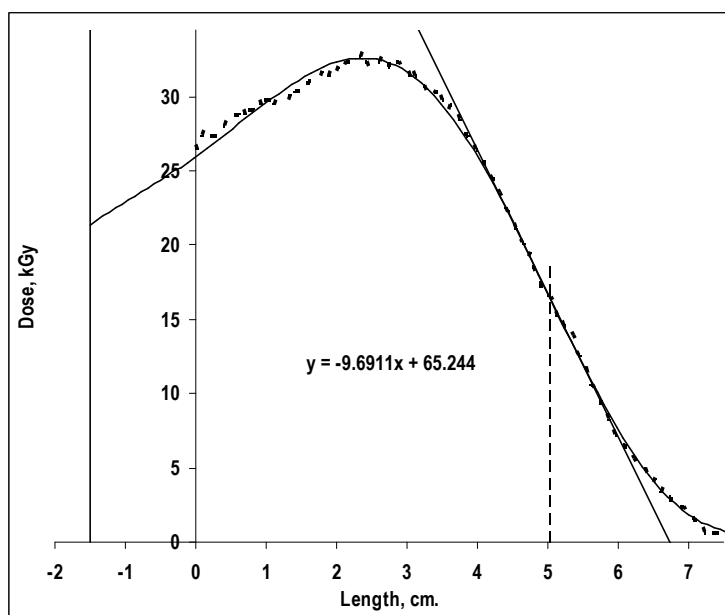


Рис. 2.1. Двухпараметрическая подгонка результатов измерений. Точки – результаты измерений. Сплошная кривая – расчет дозы в полуэмпирической модели с подогнанными параметрами модели.

Геометрическая интерпретация смещения начальной точки dX глубинного распределения дозы в методе двухпараметрической подгонки (см. рис. 2.1.) и установленный в результате апробации [44,49,19,22] факт, что PFSEM метод достаточно точно определяет пространственные характеристики глубинного

распределения дозы (практический пробег электронов R_p и глубину половинного уменьшения дозы в мишени R_{50}), позволяет записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R_p &= R_p^*(E_0) - dX \\ R_{50} &= R_{50}^*(E_0) - dX \end{aligned} \quad (2.3)$$

где R_p , R_{50} – пространственные характеристики для измеренной глубинной зависимости дозы электронного излучения; $R_p^*(E)$, $R_{50}^*(E)$ – зависимости пространственных характеристик дозы электронного излучения от энергии электронов E , установленной в рамках полуэмпирической модели глубинного распределения дозы; E_0 , dX – значения параметров полуэмпирической модели, определяемых PFSEM методом по результатам измерений глубинной зависимости дозы электронного излучения.

Таким образом, для определения пространственных характеристик (R_p , R_{50}) распределения дозы на основе PFSEM метода необходимо знать зависимости ($R_p^*(E)$, $R_{50}^*(E)$) пространственных характеристик распределения дозы от энергии электронов E в полуэмпирической модели дозы электронного излучения. Для получения эмпирических формул, описывающих эти зависимости, выполнена серия расчетов глубинных распределений дозы в полуэмпирической модели глубинного распределения дозы. Энергия электронов выбиралась в области релятивистских энергий – от 1 МэВ до границы оцененной точности полуэмпирической модели, соответствующей 20 МэВ. Значения R_p получены с использованием метода линейной аппроксимации численных значений глубинного распределения дозы. Результаты расчетов представлены в таблице 2.4 и на рисунке 2.2.

Значения пространственных характеристик R_p^* и R_{50}^* распределения дозы аппроксимированы с использованием линейной и квадратичной функций.

Аппроксимации полиномами 2-й степени имеют вид:

$$\begin{aligned} R_p^*(E) &= 8 \cdot 10^{-6} \cdot E^2 + 0.2089 \cdot E - 0.0641 \\ R_{50}^*(E) &= 0.0004 \cdot E^2 + 0.1628 \cdot E - 0.0736 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Таблица 2.4. Значения практического пробега электронов R_p^* и глубины половинного уменьшения дозы в мишени R_{50}^* , полученные в полуэмпирической модели поглощения энергии электронов.

Е, МэВ	R_p^* , см.	R_{50}^* , см.	Е, МэВ	R_p^* , см.	R_{50}^* , см.
1	0.156	0.112	9	1.81	1.42
2	0.356	0.258	10	2.03	1.59
3	0.561	0.412	11	2.23	1.76
4	0.767	0.574	12	2.44	1.96
5	0.975	0.737	14	2.87	2.29
6	1.18	0.91	16	3.29	2.65
7	1.40	1.075	18	3.70	2.98
8	1.60	1.25	20	4.11	3.32

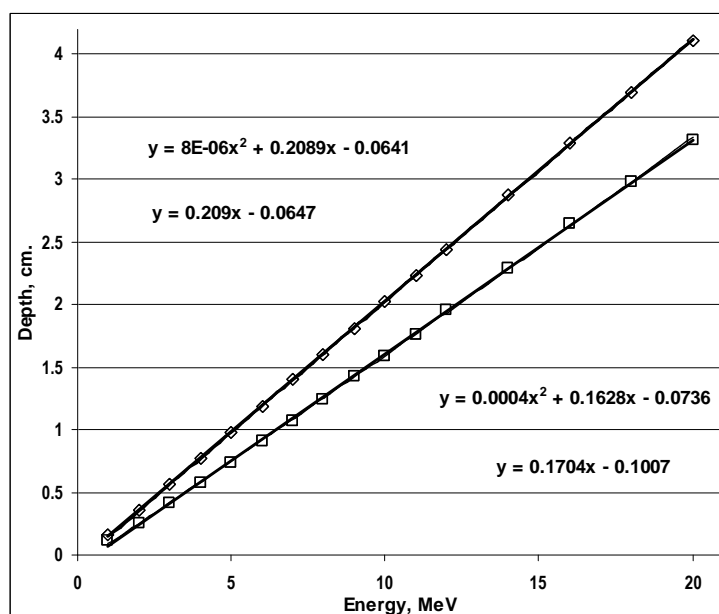


Рис. 2.2. Зависимости пространственных характеристик $R_p^*(E)$ и $R_{50}^*(E)$ глубинного распределения дозы от энергии электронов E . Ромбы — значения R_p^* , квадраты — значения R_{50}^* . Сплошные кривые — линейная и квадратичная аппроксимации данных.

Как следует из формул (2.4), вклад квадратичного члена в рассматриваемой области энергий не велик. Поэтому, представляет интерес линейная аппроксимация:

$$R_p^*(E) = 0.209 * E - 0.0647 \quad (2.5)$$

$$R_{50}^*(E) = 0.1704 * E - 0.1007$$

Зависимости, соответствующие эмпирическим формулам (2.4) и (2.5) представлены на рис. 2.2 непрерывными кривыми. Как видно из рисунка, отличие значений линейной от квадратичной аппроксимаций малы, и полученные простые эмпирические формулы достаточно хорошо описывают зависимости пространственных характеристик $R_p^*(E)$ и $R_{50}^*(E)$ дозы электронного излучения от энергии электронов E .

Для оценки точности полученных эмпирических формул проведено сравнение отношений пространственных характеристик распределения дозы в алюминиевой мишени для различных энергий моноэнергетических электронов

$$\lambda(E) = R_p(E)/R_{50}(E). \quad (2.6)$$

В таблице 2.5 представлены значения отношения $\lambda^*(E)$, рассчитанного с использованием формул (2.5)

$$\lambda^*(E) = R_p^*(E)/R_{50}^*(E) = (0.209 * E - 0.0647) / (0.1704 * E - 0.1007) \quad (2.7)$$

и отношений $\lambda(E)$ и $\lambda_M(E)$, рассчитанных в соответствии со значениями R_p и R_{50} , взятыми из таблицы, приведенной в стандарте ASTM: E 1649-94 [3], и из приведенной выше таблицы 2.4, соответственно.

Как следует из сравнения данных, приведенных в таблице 2.5, использование полученных эмпирических формул позволяет удовлетворительно описать значения отношений пространственных характеристик распределения дозы $\lambda(E)$ лишь для достаточно высоких энергий электронов $E > 5$ МэВ (сравните значения в колонках $\lambda(E)$ и $\lambda^*(E)$). Это связано с наличием существенной относительной погрешности эмпирических формул (2.4) и (2.5) за счет использования аппроксимации данных методом наименьших квадратов (сравните значения в колонках $\lambda(E)$ и $\lambda_M(E)$).

Таблица 2.5. Отношение $\lambda(E)$ пространственных характеристик распределения дозы в алюминиевой мишени для различных энергий моноэнергетических электронов.

E, МэВ	$R_p^*(E)$	$R_{50}^*(E)$	$\lambda^*(E)$	$\lambda(E)$	$\lambda_M(E)$
1	0.144	0.070	2.07	1.37	1.39
2	0.353	0.240	1.47	1.37	1.38
5	0.980	0.751	1.30	1.31	1.32
10	2.025	1.603	1.26	1.26	1.28
20	4.115	3.307	1.24	1.23	1.24

Дальнейшие оценки точности полученных эмпирических формул будут проведены в следующем пункте этого раздела при использовании пространственных характеристик $R_p^*(E)$ и $R_{50}^*(E)$ дозы электронного излучения в методах обработки результатов измерений.

2.3. Апробация метода параметрической подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений

2.3.1. Измерения глубинных распределений дозы электронного излучения методом дозиметрического клина.

Для сравнения практической и вычислительной дозиметрии проводились эксперименты на линейном ускорителе электронов Elektronika 10/10 в Институте Ядерной Химии и Технологий, Варшава, Польша. Общий вид радиационно-технологической линии стерилизационного центра показан на рисунке 2.3. На рисунке видны сканер и конвейерная линия, на которой расположены алюминиевые ящики с облучаемой продукцией.

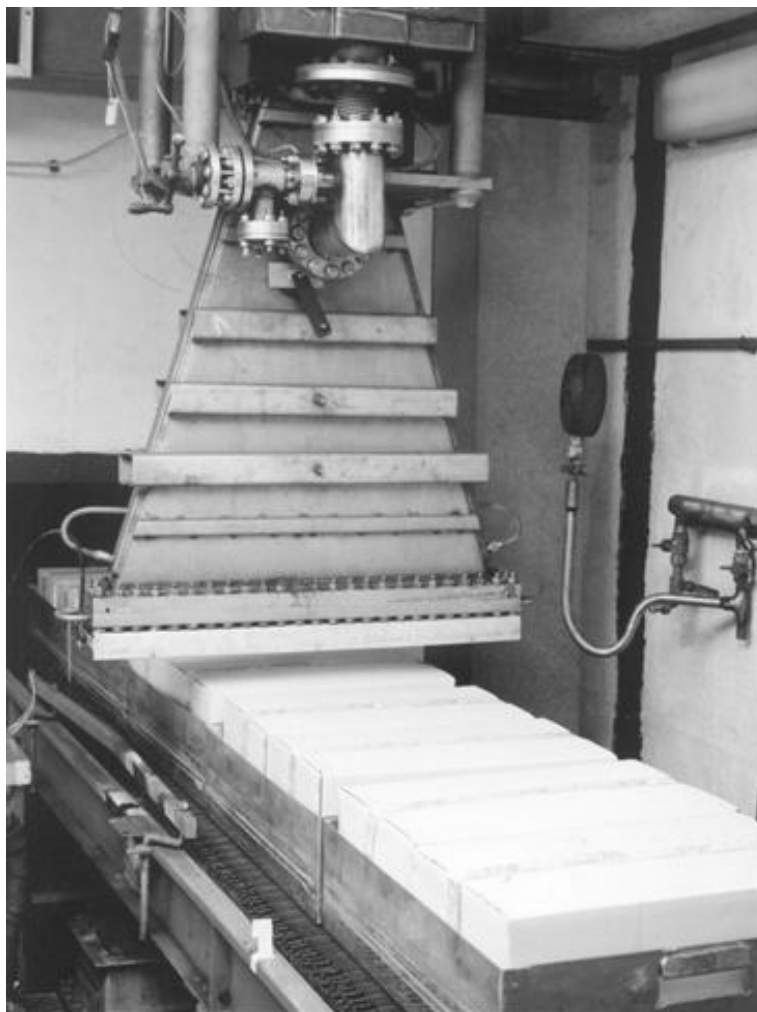


Рис.2.3. Радиационно-технологическая линии стерилизационного центра в Институте Ядерной Химии и Технологий, Варшава, Польша.

Радиационно-технологическая линии имеет следующие штатные параметры импульсного электронного излучения:

- длительность импульса в пучке электронов – 5.6 мкс,
- частота следования импульсов – 370 Гц,
- средний ток пучка – 1.04 мА,
- ширина сканирования – 58 см,
- частота сканирования – 5 Гц,
- угловой разброс в пучке электронов – 6 градусов,
- максимальная энергия пучка электронов – 10 МэВ,

- спектр энергии электронов зависит от режимов работы ускорителя.

Примеры различных режимов работы ускорителя приведены на рисунке 2.4. Кривая 1 показывает спектр электронов при среднем токе магнетрона, равном 600 мА и импульсном токе электронной пушки = 400 мА. Кривая 2 – спектры электронов при среднем токе 700 мА и импульсном токе 500 мА. Кривая 3 – спектры при среднем токе 550 мА и импульсном токе 300 мА.

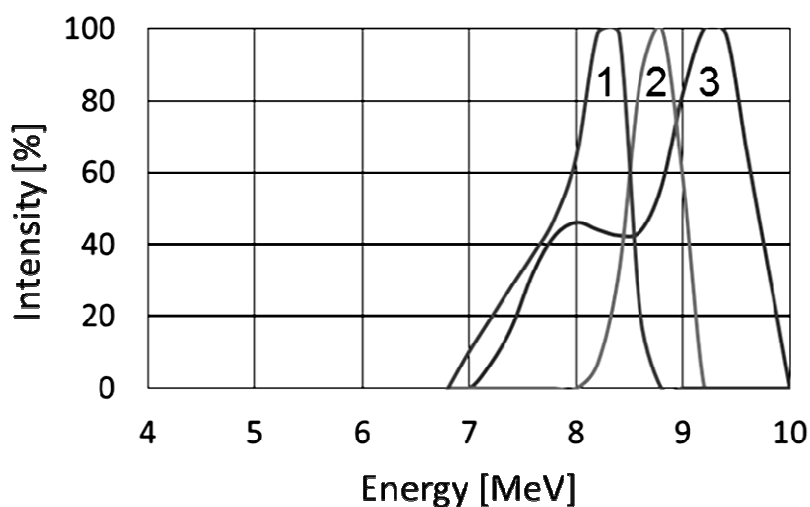


Рис.2.4. Спектр пучка электронов на ускорителе Elektronika 10/10 при разных режимах работы ускорителя (1 – средний ток 600 мА, импульсный ток 400 мА; 2 – 700 мА, 500 мА; 3 – 550 мА, 300 мА).

- скорость движения конвейерной линии изменялась в пределах 1-0.1 м/мин. Изменение скорости движения конвейерной линии позволяло оперативно изменять величину поглощенной дозы в облучаемых материалах без изменения параметров самого ускорителя электронов.

Контроль поглощенной дозы в облучаемых материалах проводился с использованием RISO калориметров из полистирола [109]. Калориметры располагались в алюминиевых ящиках и использовались для периодического контроля величины дозы электронного излучения в облучаемой продукции. Доза излучения в облучаемых материалах была в диапазоне от 10 до 50 кГр.

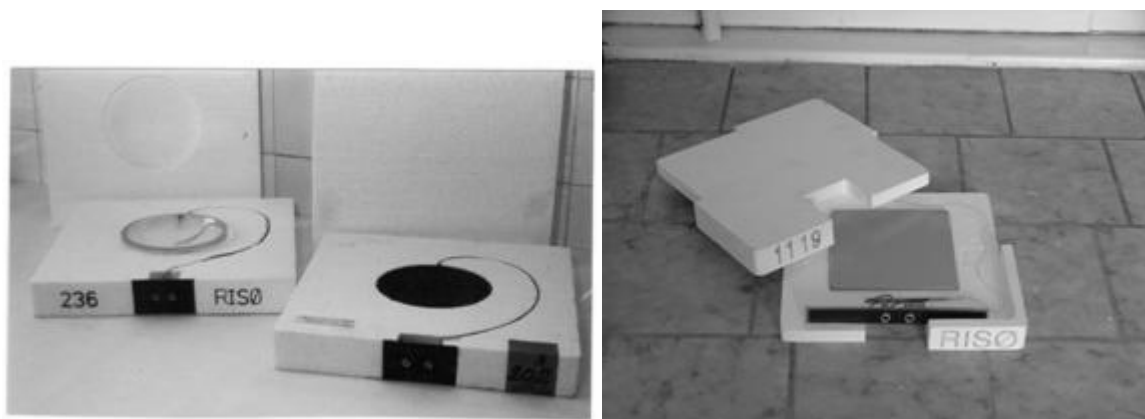


Рис. 2.5. Фотографии калориметров фирмы RISO, изготовленных из графита и полистирола.

Дозиметрический клин использовался для периодического контроля энергии пучка электронов в процессе облучения продукции. Энергию пучка электронов определяли в соответствии с процедурой контроля наиболее вероятной энергии электронного излучения E_p , которая описана в международных стандартах ICRU Report 35 и ISO/ASTM Standard 51649.

Энергия электронного излучения E_p определяется следующим образом:

- Измеряется глубинное распределение дозы электронного излучения в дозиметрическом клине.
- Определяется точка максимального спада, и проводится касательная в этой точке глубинного распределения дозы.
- Определяется величина практического пробега электронов R_p .
- Рассчитывается значение наиболее вероятной энергии E_p на основе эмпирических соотношений $E_p(R_p)$, которые рекомендованы в ICRU Report 35 и ISO/ASTM Standard 51649:

Глубинные распределения дозы электронного излучения измерялись в алюминиевых клиньях с дозиметрическими пленками СТА, PVC и ВЗ. В разделе 1 на рис.1.6 представлены: модель дозиметрического клина с установленной дозиметрической пленкой и фотография дозиметрического клина из алюминия с установленными детекторами.

Неопределенность измерений величины дозы оценивалась как сумма неопределенностей, связанных с калибровкой дозиметрической пленки с

воспроизводимостью измерений в серии экспериментов, с неопределенностью величины дозы, поставляемой ускорителем электронов, и со случайной составляющей погрешности методов обработки результатов измерений на спектрофотометре. Дозиметрические пленки калибровались аланиновыми дозиметрами, которые были аттестованы в Национальной Физической Лаборатории, Teddington, Middlesex, Великобритания.

Спектрофотометр FDR001 в автоматическом режиме использовался для измерения оптической плотности в облученных пучком электронов СТА дозиметрических пленках на длине волны 280нм. Характеристики СТА дозиметрических пленок: толщина 0.125 мм, ширина 8мм, плотность 1.32 г/см³. Состав - триацетат целлюлозы, Максимум суммарной неопределенности, связанной с определением величины дозы электронного излучения в алюминиевых клиньях с дозиметрическими пленками СТА для значений доз, больше 5 кГр, не превышала 8% . Неопределенность измерения длины на дозиметрических пленках составляла 0.1см.

Спектрофотометр SEMCO S/E_c в автоматическом режиме использовался для измерения оптической плотности на длине волны 394нм в облученных пучком электронов PVC дозиметрических пленках. Характеристики PVC дозиметрических пленок: толщина – 0,026 см, ширина – 1.6 см, длина 10 и 20 см, плотность – 1.32 г/см³. Состав – поливинилхлорид. PVC дозиметрические пленки в области облучения на пучке электронов приобретают коричневый цвет. Для фиксации цвета пленки во времени облученные PVC пленки выдерживали в термошкафу при температуре 70⁰С.

Результаты обработки дозиметрической пленки PVC, облученной пучком электронов в дозиметрическом клине с использованием спектрофотометра SEMCO S/E_c, показаны на рис. 2.6. Угол между двумя частями клина равен 16⁰.

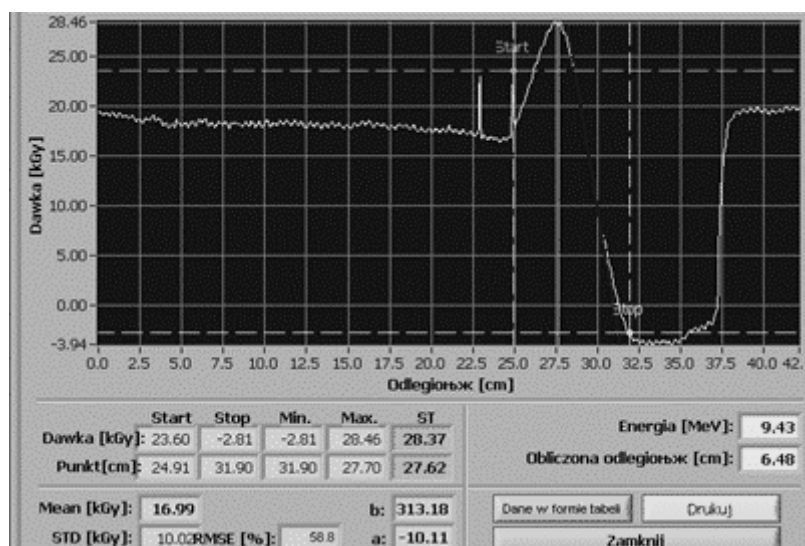


Рис. 2.6. Результаты обработки дозиметрической пленки PVC с использованием спектрофотометра SEMCO S/E_c. Величина практического пробега $R_p = 6.48$ см и наиболее вероятная энергия электронов $E_p = 9.43$ МэВ.

Плоский сканер фирмы RISO, использовался для обработки дозиметрических пленок ВЗ. Характеристики пленок ВЗ: толщина 0,02 мм, ширина 10-15 мм, плотность - 1.12 г/см³. Состав пленки – поливинилбутирал. При облучении пучком электронов пленки ВЗ принимали розовый цвет.

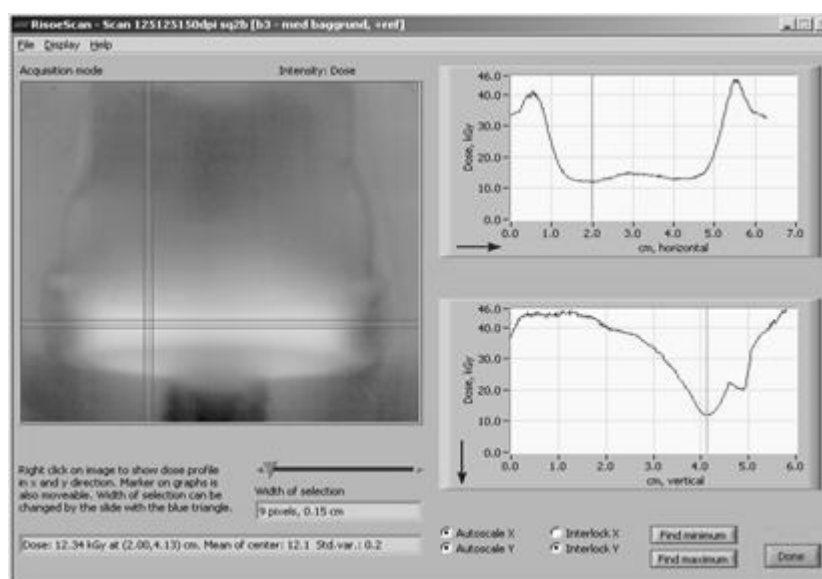


Рис.2.7. Распределение поглощенной дозы электронов в дозиметрической пленке ВЗ. Вверху – распределение поглощенной дозы по горизонтали. Внизу – распределение поглощенной дозы по вертикали.

Результаты измерений глубинных распределений дозы электронного излучения с использованием дозиметрической пленки СТА, расположенной в стандартном алюминиевом дозиметрическом клине, при двух режимах облучения, отличающихся величиной стерилизационной дозы (первый режим - 35 kGy и второй - 28 kGy), представлены на рис. 2.10 [19].

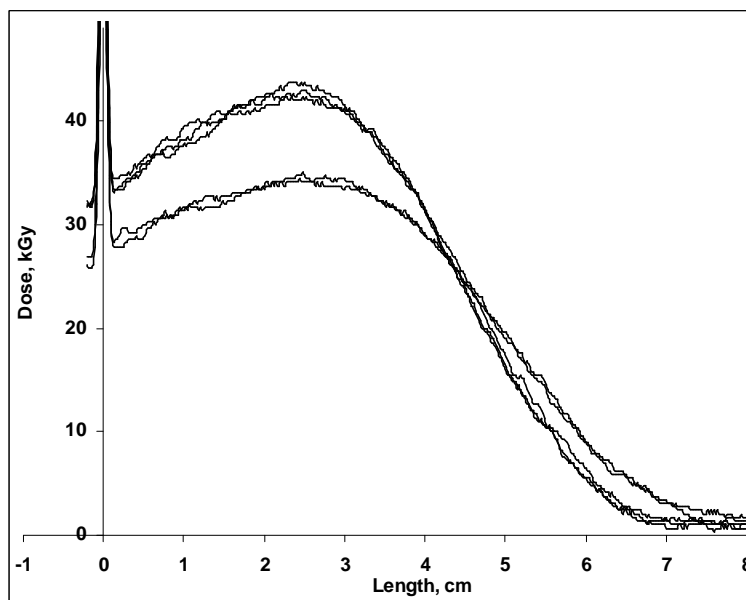


Рис.2.8. Результаты измерений распределений дозы электронного излучения в дозиметрической пленке, расположенной в стандартном алюминиевом дозиметрическом клине.

2.3.2. Обработка результатов измерений распределений дозы электронного излучения в дозиметрической пленке.

Предварительная обработка экспериментальных данных, полученных с использованием стандартного алюминиевого дозиметрического клина, была выполнена в Институте Ядерной Химии и Технологии, Польша [19-22, 44,49]:

– установлены начальные точки в измеренных значениях глубинных зависимостей дозы в дозиметрических СТА пленках, облучаемых в дозиметрическом клине,

– устранены систематические погрешности результатов измерений величины поглощенной дозы.

Результаты предварительной обработки экспериментальных данных глубинных зависимостей дозы электронного излучения в СТА дозиметрических пленках представлены на рисунке 2.9.

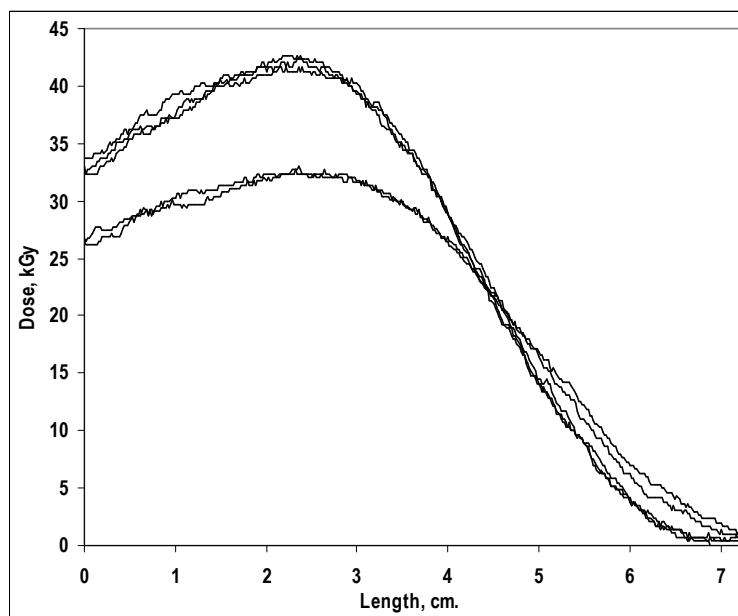


Рис. 2.9. Глубинные распределения дозы электронного излучения в дозиметрических пленках, облучаемых в стандартном дозиметрическом клине.

Как видно из рисунка, экспериментальные данные не пригодны для расчета стандартными методами численного дифференцирования величин «скорости уменьшения дозы» (первая производная) и «точки максимального скорости уменьшения дозы» (вторая производная), которые определены в стандартной процедуре вычисления значений величины практического пробега электронов R_p .

Результаты расчетов характеристик электронных пучков с использованием PFSEM метода и методов полиномиальной аппроксимации DELEN [17] представлены в таблице 2.6. Значения в колонке R_p –Av были рассчитаны как средние значения, полученные аппроксимацией результатов измерений с использованием линейных функций и полиномов 4-й степени. Расчет неопределенности значений R_p , выполнялся на основе сравнения результатов, полученных с использованием двух вычислительных методов определения касательной – аппроксимации результатов измерений линейной функцией и

полиномом 4-й степени. Результаты расчета неопределенности значений величины R_p приведены в столбце Unc. Оценка неопределенности значений R_{50} , определялась с учетом пространственного разрешения измерений и составляла величину, не превышающую 0.5% для всех результатов измерений, приведенных в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Характеристики электронных пучков с использованием PFSEM метода и методов полиномиальной аппроксимации DELEN.

Образцы	PFSEM		DELEN		R_p -Av, см	Unc. %	R_{50} , см
	E_0 , МэВ	dX, см	R_p -Line	R_p -Pol			
R1_1	10.95	0.370	1.83	1.81	1.82	0.79	1.41
R1_2	11.39	0.423	1.89	1.88	1.88	0.53	1.42
R2_1	10.03	0.336	1.69	1.65	1.67	2.56	1.26
R2_2	9.96	0.308	1.72	1.68	1.70	2.09	1.28
R2_3	9.93	0.311	1.70	1.65	1.67	2.62	1.27

Отметим, что значения R_p , полученные с использованием аппроксимации результатов измерений линейной функцией (R_p -Line) по отношению к значениям, полученным с использованием полинома 4-той степени (R_p -Pol), систематически завышены. Аналогичный факт обнаружен при обработке результатов вычислений глубинных зависимостей дозы на базе полуэмпирической модели (см. таб. 2.3).

Для измеренных глубинных зависимостей дозы по параметрам, рассчитанным PFSEM методом (см. таб. 2.6.), определим пространственные параметры R_p и R_{50} согласно соотношениям (2.3) с использованием эмпирических формул (2.5).

Результаты этих расчетов представлены в таблице 2.7 в колонках ПЭМ. Для сравнения, в колонках СтМ представлены данные, полученные стандартными методами. Относительное отклонение результатов, представленных в колонках ПЭМ и СтМ, помещено в колонке Пог.

Таблица 2.7. Пространственные характеристики $(R_p, R_{50})_i$, полученные стандартными методами и PFSEM методом с использованием эмпирических формул (2.5).

	R_p , см.			R_{50} , см.		
	СтМ	ПЭМ	Пог, %	СтМ	ПЭМ	Пог, %
R1_1	1.82	1.85	1.77	1.41	1.40	1.12
R1_2	1.88	1.89	0.62	1.42	1.42	0.09
R2_1	1.67	1.70	1.52	1.26	1.27	1.13
R2_2	1.70	1.71	0.42	1.28	1.29	0.48
R2_3	1.67	1.70	1.54	1.27	1.28	0.75

Как следует из таблицы, пространственные характеристики распределений дозы, такие как практический пробег электронов R_p и глубина половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} , рассчитанные с использованием соотношений (2.3) и эмпирических формул (2.5), совпадают с точностью до оцененной погрешности результатов измерений с полученными традиционными расчетными методами. Отметим, что для области энергий электронов, используемых в экспериментах (см. E_0 в таб. 2.6.), отличие результатов, полученных с использованием линейной аппроксимации (2.5), от аппроксимации полиномами 2-й степени (2.4) не превышает 0.05% для величины R_p и менее 0.5% для величины R_{50} .

Сравнение данных, приведенных в таблице 2.7 показывает, что значения R_p в колонке ПЭМ систематически больше, чем значения в колонке СтМ, и близко к значениям, приведенным в таблице 2.3 в колонке R_p -Line. Это связано с тем, что при определении эмпирических соотношений использовали данные таблицы 2.4, которые получены на основе линейной аппроксимации значений глубинного распределения дозы электронного излучения.

Как следует из данных, приведенных в таблице 2.7, обработка PFSEM методом результатов измерений глубинного распределения дозы электронного излучения позволяет с высокой точностью (<2%) определять пространственные характеристики распределений дозы, такие как практический пробег R_p электронов и глубину половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} . В этой связи, представляет интерес вычислительный метод получения стандартных пространственных характеристик дозы электронного излучения, который включает в себя измерения глубинного распределения дозы стандартным дозиметрическим клином, но не содержит неопределенных и некорректных процедур обработки результатов измерений. Кроме того, этот вычислительный метод является альтернативным относительно калориметрического метода дозиметрии электронного излучения, так как позволяет определять среднюю энергию электронов в пучке в соответствии со значением глубины половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} .

2.4. Выводы раздела 2

В этом разделе проведено сравнение эмпирических формул, связывающих характеристики энергии электронного пучка (наиболее вероятная энергия E_p и средняя энергия E_{av} электронов) с пространственными характеристиками глубинного распределений дозы (практический пробег электронов R_p и глубина половинного уменьшения дозы в мишени R_{50}), представленных в международных стандартах ICRU Report 35, ASTM Standard: E 1649-94, ISO/ASTM Standard 51649.

Показано, что различия в оценке энергии электронов с использованием эмпирических формул могут составлять несколько процентов и существенно зависят от диапазона энергий электронов.

Установлено, что погрешности эмпирических формул связаны со следующим:

- неопределенностью выбора метода и вида функции при аппроксимации результатов измерений глубинного распределений дозы, что требуется для

определения значений пространственных характеристик R_p и R_{50} распределений дозы;

- неопределенностью выбора метода и вида функции для получения эмпирических зависимостей пространственных характеристик R_p и R_{50} от энергии электронов E .

Проведено сравнение значений практического пробега электронов R_p и глубины половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} , полученных с использованием различных методов расчета глубинных зависимостей дозы электронного излучения (полуэмпирическая модель и моделирование методом Монте-Карло) и различных вычислительных методов определения пространственных характеристик распределений дозы (линейная и полиномиальная аппроксимация дискретных данных). Установлено, что неопределенность результатов расчетов (моделирования) этих величин может составлять несколько процентов.

Рассчитан систематический набор глубинных зависимостей дозы электронного излучения в плоской алюминиевой мишени на базе полуэмпирической модели и получены эмпирические соотношения для зависимостей пространственных характеристик $R_p(E)$ и $R_{50}(E)$ дозы электронного излучения от энергии электронов E .

Проведена апробация эмпирических соотношений $R_p(E)$ и $R_{50}(E)$ при обработке результатов измерений глубиной зависимости дозы, выполненных в радиационно-технологическом центре. Установлено, что полученные соотношения позволяют с высокой точностью (<2%) определять величины R_p и R_{50} , по результатам обработки измерений методом двухпараметрической подгонки. В этой связи, можно предложить новый метод получения стандартных пространственных характеристик дозы электронного излучения, который включает в себя измерения глубинного распределения дозы стандартным дозиметрическим клином, но не содержит неопределенных и некорректных процедур обработки результатов измерений. Следует отметить, что предложенный вычислительный метод является альтернативным относительно

калориметрического метода дозиметрии электронного излучения из-за возможности определять среднюю энергию электронов в пучке.

Отметим, что в практической дозиметрии электронного излучения наряду с дозиметрическими клиньями для измерения глубинного распределения дозы используют стеки (Stack Energy Measurement Device), состоящие из набора плоских слоев материала, между которыми расположены дозиметрические пленки. В этой связи, представляют интерес исследования, аналогичные проведенным в этом разделе, для рекомендованных в стандартах материалов. В частности, для воды и полистирена эмпирические формулы, связывающие энергию электронов с практическим пробегом электронов R_p и глубиной половинного уменьшения дозы в мишени R_{50} , приведены и обсуждаются в [2].

Результаты, полученные в этом разделе, опубликованы в [44, 45, 52, 54].

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ

3.1. Формализация процедуры определения практического пробега

Определение величины практического пробега электронов R_p дано в [2] – «The *practical range* R_p is defined as point where the tangent at the steepest point (the inflection point) on the almost straight descending portion of the depth versus absorbed dose curve meets the extrapolated bremsstrahlung background.» В соответствии с этим определением значение R_p должно вычисляться из соотношений:

$$D_{rad} = D(x_p) + D'(x_p) \cdot (R_p - x_p) \quad (3.1)$$

$$x_p = \arg \max_{x \in [R_m, R_0]} (-D'(x))$$

где

$D(x)$ и $D'(x)$ – глубинное распределение дозы электронного излучения и его производная,

x_p – точка максимального спадания дозы в диапазоне глубин от R_m , где доза имеет максимальное значение, до глубины R_0 – полного пробега электронов,

D_{rad} – экстраполированное значение дозы тормозного излучения.

При этом величина x_p может быть определена методами поиска минимума функции $D'(x)$, либо с использованием второй производной распределения дозы электронного излучения $D''(x)$ из уравнения

$$D''(x_p) = 0 \quad (3.2)$$

Таким образом, формализация процедуры определения практического пробега электронов R_p показывает, что для корректного расчета величины практического пробега электронов требуются знания производных глубинного

распределения дозы электронного излучения. Отметим, что результаты измерений глубинного распределения дозы электронного излучения, выполненные с использованием стандартного оборудования, представляют собой наборы дискретных данных, поэтому для получения квазирешений некорректной математической задачи – дифференцирование функции заданной таблично, используют различные методы аппроксимации табличных данных.

Общепринятым методом аппроксимации, применяемым в практике радиационно-стерилизационных центров, является метод, использующий линейную аппроксимацию данных в области спада глубинной зависимости дозы электронного излучения. Известны работы, в которых предложены и апробируются методы, использующие аппроксимацию результатов измерений в области спада глубинных распределений дозы электронного излучения полиномами различных степеней [16], в частности, полиномом 4-й степени [15]. Однако и традиционный метод, и предложенные методы полиномиальной аппроксимации могут использовать лишь малую часть результатов измерений в области глубин, где предлагаемая аппроксимация возможна, например, для линейной аппроксимации используют интервал глубин на спаде глубинного распределения дозы электронного излучения, в котором относительная величина дозы изменяется от 0.8 до 0.2 максимального значения дозы. По-видимому, более полную информацию, которую содержат результаты измерений глубинного распределения дозы электронного излучения, можно извлечь лишь при использовании вычислительных методов, которые базируются на физических моделях переноса электронного излучения в веществе.

В этой связи, представляет интерес PFSEM метод – аппроксимация результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения на основе подгонки методом наименьших квадратов параметров полуэмпирической модели глубинного распределения дозы моноэнергетического электронного пучка, нормально падающего на полубесконечную мишень.

Рассматриваемая полуэмпирическая модель хорошо описывает значения глубинных распределений дозы электронного излучения в мишени, и поэтому

следует ожидать, что значения величин R_{50} , которая определяется как глубина в мишени, на которой значение дозы уменьшается до 50% относительно максимального значения дозы в мишени [2], может быть рассчитана PFSEM методом с удовлетворительной точностью. Однако, для расчета величин практического пробега электронов R_p , в соответствии с выражениями (3.1) и (3.2) необходимы знания первой и второй производных дозы электронного излучения.

Как правило модельные зависимости, построенные на аппроксимации эмпирических данных, не обеспечивают корректного описания производных от этих зависимостей. Поэтому оценка точности моделирования величин стандартных пространственных характеристик R_p и R_{50} распределений дозы на основе полуэмпирической модели глубинного распределения дозы электронного излучения представляет интерес для дальнейшего развития новых вычислительных методов определения энергии электронов в радиационных технологиях.

Отметим, что, согласно (3.2), величина x_p определяется с использованием второй производной распределения дозы электронного излучения, и поэтому можно ожидать большой погрешности результатов определении точки x_p при использовании численных методов. В этой связи представляет интерес изучение зависимости отклонения величины практического пробега R_p от величины ошибки определения точки x_p . Для изучения этой зависимости рассмотрена соответствующая соотношению (3.1) функция $R(x)$:

$$R(x) = x - \frac{D(x) - D_{rad}}{D'(x)} \quad (3.3)$$

Производная $R'(x)$ равна

$$R'(x) = \frac{(D(x) - D_{rad}) \cdot D''(x)}{(D'(x))^2} \quad (3.4)$$

и, в случае $x = x_p$, в силу $D''(x_p) = 0$, из (3.4) имеем $R'(x_p) = 0$.

Так как, для $x = x_p$ справедливо $R_p = R(x_p)$, величина практического пробега электронов R_p является минимальным значением функции (3.3), которое реализуется при значении аргумента $x = x_p$.

Отметим, что при получении этого вывода не используются какие либо предположения относительно функции $D(x)$, и поэтому следует ожидать слабую зависимость отклонения величины практического пробега R_p от величины ошибки определения точки x_p , для всех численных методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения.

3.2. Численное дифференцирование распределений дозы по глубине в мишенях из различных материалов

Проведена серия компьютерных экспериментов с использованием программного обеспечения RT-Office для оценки возможностей методов численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения. Получены наборы дискретных данных о распределениях дозы, рассчитанные методом Монте-Карло в детальной физической модели, и с использованием полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе. Проведены расчеты распределений дозы электронного излучения в мишенях из алюминия, углерода, полистирена и воды при облучении электронами с энергиями 2, 5 и 10 МэВ. Результаты моделирования распределений дозы получены методом Монте-Карло с относительной статистической неопределенностью не более 10^{-4} . Результаты компьютерных экспериментов были аппроксимированы методом наименьших квадратов с использованием линейной функции и полиномов 3-й и 4-й степени. Выражения для первой и второй производных от аппроксимирующих функций получены в аналитическом виде.

Результаты расчетов распределения дозы, первой и второй производной распределения дозы электронного излучения, выполненные различными вычислительными методами, показаны на рисунках 3.1 – 3.6. В приложении 1 приведена более полная информация относительно результатов расчетов первой и

второй производной распределения дозы электронного излучения, выполненных различными вычислительными методами. На рисунках 3.1 и 3.2 представлены распределения дозы для мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 и 5 МэВ, соответственно. На рисунках 3.3 и 3.4 представлены результаты расчетов для мишеней из углерода и полистирена, облучаемых электронами с энергией 10 МэВ. На рисунках 3.5 и 3.6 – результаты расчетов для мишеней из алюминия и углерода, облучаемых электронами с энергией 10 МэВ. Маркерами отмечены результаты расчета, полученные на основе моделирования распределений дозы методом Монте-Карло, кружки – значения дозы, ромбы и треугольники – значения первой и второй производной распределения дозы электронного излучения соответственно. На рисунках 3.1-3.4 непрерывные кривые отображают результаты, полученные на основе расчетов распределений дозы электронного излучения по полуэмпирической модели, пунктирные кривые – результаты, полученные на основе моделирования распределений дозы электронного излучения методом Монте-Карло и аппроксимации этих данных полиномами 4-й степени. На рисунках 3.5-3.6 непрерывные кривые отображают результаты, полученные на основе моделирования распределений дозы электронного излучения методом Монте-Карло и аппроксимации этих данных полиномами 3-й степени, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных. Вертикальная пунктирная прямая отмечает точку максимального спада глубинного распределения доз x_p , которая определяется из уравнения $D''(x_p) = 0$. На рисунках приведены полиномы, аппроксимирующие данные, которые были получены методом Монте-Карло.

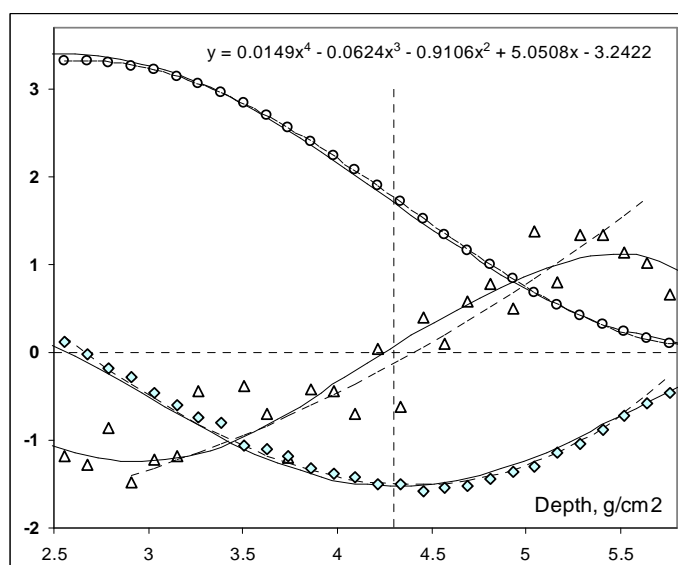


Рис. 3.1. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

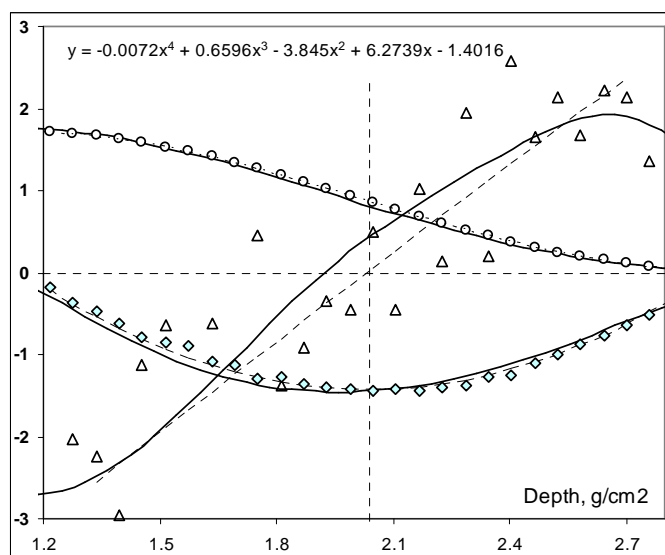


Рис. 3.2. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

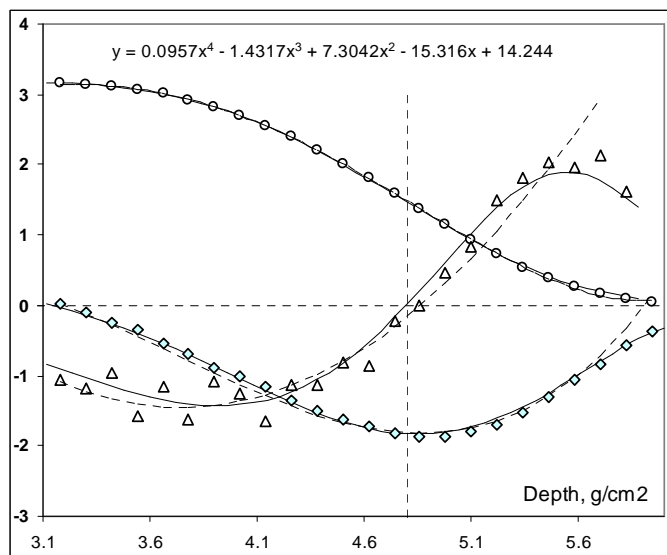


Рис. 3.3. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 4-й степени.

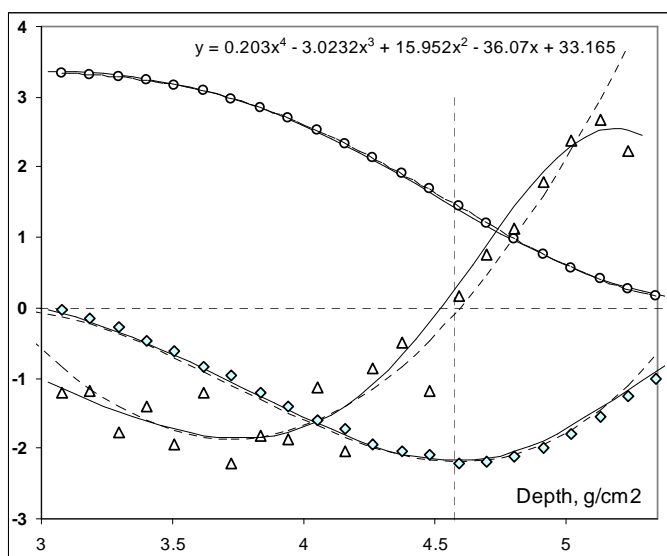


Рис. 3.4. Распределение доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 4-й степени.

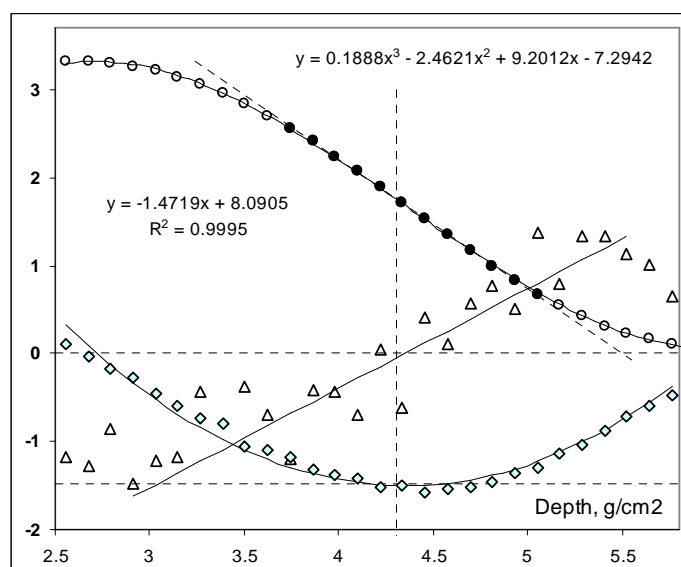


Рис. 3.5. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

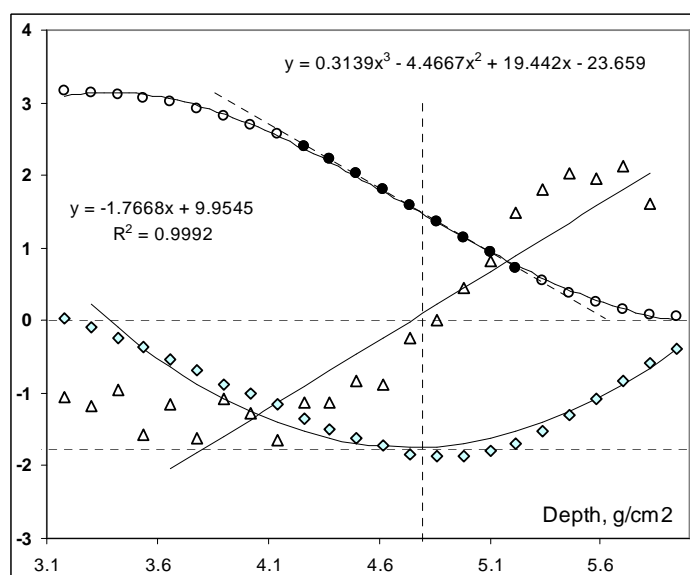


Рис. 3.6. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 3-й степени, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

Как видно из рисунков, полуэмпирическая модель глубинного распределения доз электронного излучения и методы полиномиальной аппроксимации набора дискретных данных позволяют с удовлетворительной точностью рассчитывать значения глубинного распределения доз электронного излучения и ее первых производных.

Сравнение зависимостей второй производной глубинного распределения доз электронного излучения, приведенных на рисунках 3.1 – 3.6, подтверждает вывод о том, что положение точки x_p , которое определяется второй производной глубинного распределения доз электронного излучения, может иметь достаточно большую погрешность.

Результаты расчетов зависимостей $R(x)$, согласно (3.3), с использованием различных вычислительных методов для различных материалов приведены на рисунках 3.7-3.10. В приложении 2 приведена более полная информация относительно результатов расчетов этих зависимостей с использованием различных вычислительных методов для различных материалов. Маркерами отмечены результаты, полученные на основе данных моделирования глубинного распределения доз электронного излучения методом Монте-Карло. Сплошные кривые – расчет с использованием полуэмпирической модели глубинного распределения доз электронного излучения, прерывистые кривые – расчеты на основе аппроксимации полиномом 3-й степени и 4-й степени (пунктирные кривые) данных, полученных методом Монте-Карло. Пунктирные прямые – линейная аппроксимация данных, полученных методом Монте-Карло, в области уменьшения дозы от 0.2 до 0.8 максимума дозы в мишени. Вертикальные пунктирные прямые отмечают точку x_p , определенную с использованием полуэмпирической модели распределения дозы электронного излучения.

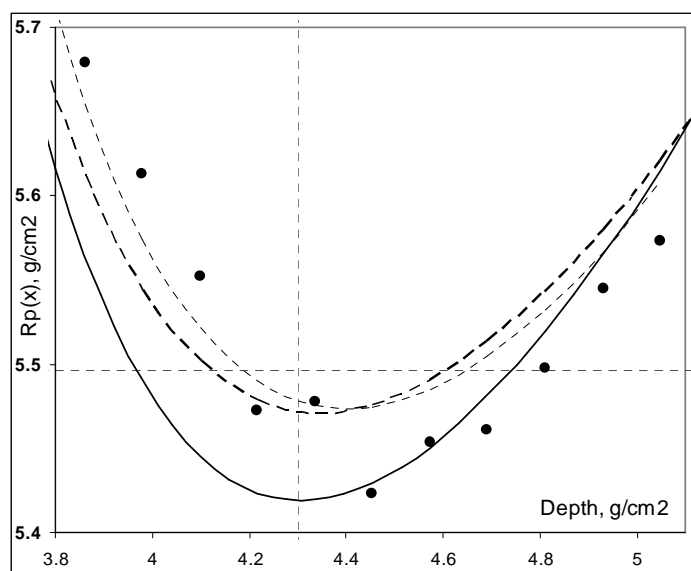


Рис. 3.7. Зависимость $R(x)$ в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

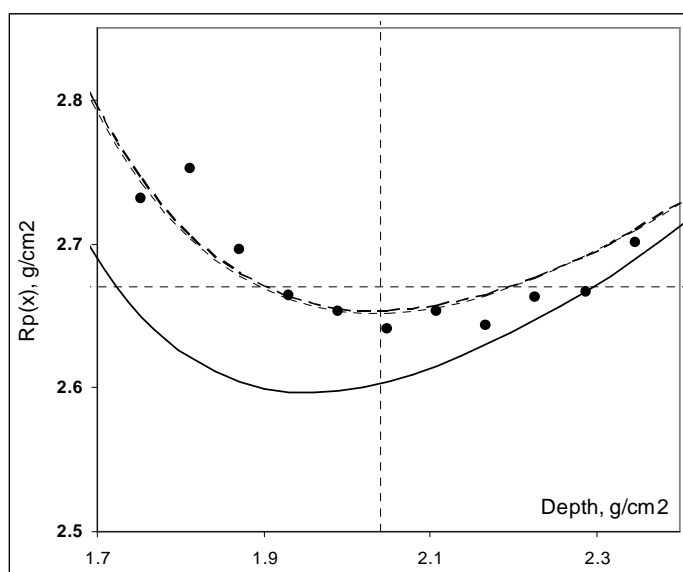


Рис. 3.8. Зависимость $R(x)$ в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ.

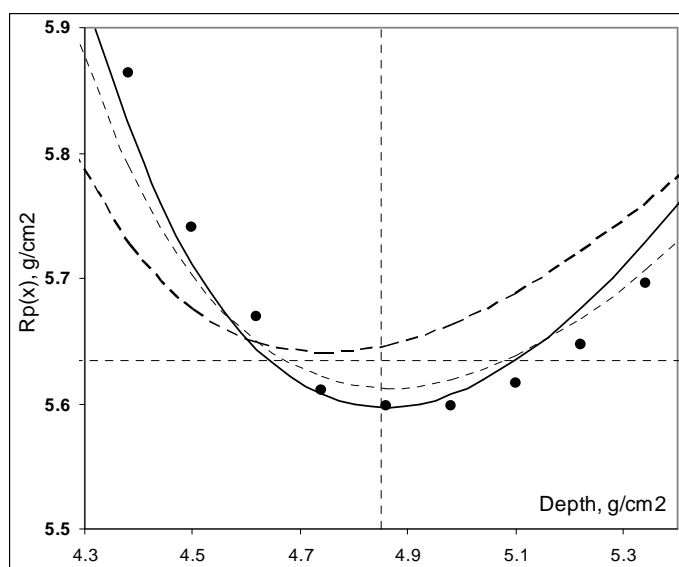


Рис. 3.9. Зависимость $R(x)$ в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

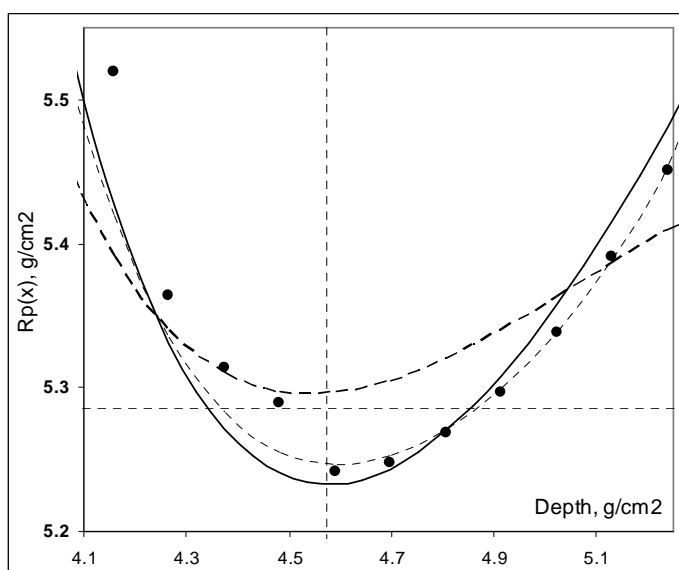


Рис. 3.10. Зависимость $R(x)$ в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

Как видно из рисунков, в зависимости $R(x)$ наблюдается минимум в точках x_p , что находится в соответствии с выводом, полученным в предыдущем пункте этого раздела. Отметим, что положение минимума может существенно смещаться в зависимости от метода обработки дискретных данных. Однако, неопределенность положения точки x_p не приводит к сильным изменениям

результатов расчета величины практического пробега электронов R_p . Интересно отметить, что наличие безусловного минимума в зависимости $R(x)$ является причиной систематического смещения результатов расчета значений величины практического пробега электронов R_p при использовании линейной аппроксимации результатов измерений глубинного распределения доз электронного излучения в области глубин, близких к точке x_p .

3.3. Сравнение точности методов численного дифференцирования распределений дозы для получения практического пробега

Проведено сравнение различных методов численного дифференцирования глубинного распределения доз электронного излучения на основе точности результатов расчета величин практического пробега электронов, полученных этими методами. Для этого моделировали методом Монте-Карло глубинные распределения дозы электронного излучения для набора веществ и энергий электронов.

Результаты расчетов величин практического пробега электронов R_p с использованием различных вычислительных методов для различных материалов приведены в таблицах 3.1-3.3.

Для идентификации колонок таблиц 3.1 и 3.2 введены следующие обозначения:

- MC – Получение данных – метод Монте-Карло,
вычисление производных – методы численного дифференцирования с минимальным числом узлов, результат в г/см².
- SM – Получение данных – полуэмпирическая модель,
вычисление производных – методы численного дифференцирования с минимальным числом узлов, результат в г/см².
- M1 – Получение данных – метод Монте-Карло,
вычисление производных – линейная аппроксимация данных в ограниченной области значений, результат в г/см².

- М3 – Получение данных – метод Монте-Карло,
вычисление производных – аппроксимация данных полиномом 3-й степени в области от глубины, где наблюдается максимум дозы, до $R_0(E)$ полного пробега электронов, рассчитанного в приближении непрерывного замедления, результат в $г/см^2$.
- М4 – Получение данных – метод Монте-Карло,
вычисление производных – аппроксимация данных полиномом 4-й степени в области от глубины, где наблюдается максимум дозы, до $R_0(E)$ полного пробега электронов, рассчитанного в приближении непрерывного замедления, результат в $г/см^2$.
- Av – Среднее значение величины практического пробега электронов R_p , полученное с использованием различных вычислительных методов, результат в $г/см^2$.
- σ – Среднеквадратическое отклонение величины практического пробега электронов R_p , полученное с использованием различных вычислительных методов, результат в $г/см^2$.
- Unc – Неопределенность результатов расчета величины практического пробега электронов R_p , результат в %.

Таблица 3.1. Результаты расчета величин практического пробега электронов R_p , полученные с использованием различных вычислительных методов.

	MC	SM	M1	M3	M4	Av	σ	Unc, %
Al, 10	5.424	5.423	5.497	5.471	5.475	5.458	0.033	0.60
C, 10	5.598	5.6	5.634	5.64	5.613	5.617	0.019	0.34
PS, 10	5.244	5.236	5.286	5.296	5.246	5.262	0.027	0.52
Water, 10	4.995	5.068	5.034	5.023	5.006	5.025	0.028	0.56
Wood, 10	5.254	5.332	5.295	5.302	5.256	5.288	0.033	0.62
Al, 5	2.643	2.598	2.669	2.653	2.652	2.643	0.027	1.02
Al, 2	0.968	0.95	0.978	0.968	0.968	0.966	0.010	1.05

Таблица 3.2. Отклонения от средних значений результатов расчета величин практического пробега электронов R_p , полученных с использованием различных вычислительных методов.

	MC, %	SM, %	M1, %	M3, %	M4, %
Al, 10	-0.62	-0.64	0.71	0.24	0.31
C, 10	-0.34	-0.30	0.30	0.41	-0.07
PS, 10	-0.33	-0.49	0.46	0.65	-0.30
Water, 10	-0.60	0.85	0.18	-0.04	-0.38
Wood, 10	-0.64	0.84	0.14	0.27	-0.60
Al, 5	0	-1.70	0.98	0.38	0.34
Al, 2	0.17	-1.70	1.20	0.16	0.16

Результаты расчета практического пробега электронов R_p имеют относительно небольшую неопределенность, связанную с использованием различных вычислительных методов (колонки σ и Unc в таблице 3.1). Отметим, что наибольшие значения неопределенности наблюдаются для случая алюминиевой мишени, облучаемой электронами с энергиями 2 и 5 МэВ. Это связано с существенными отклонениями результатов расчетов, выполненных с использованием полуэмпирической модели (колонка SM в таблице 3.2), относительно среднего значения величины практического пробега электронов R_p . Это означает, что полуэмпирическая модель не может обеспечить уровень погрешности, меньший 1% для широкого диапазона энергий электронного излучения. Как следует из сравнения данных, представленных в таблице 3.2, использование метода линейной аппроксимации данных в ограниченной области значений (колонка M1) приводит к систематическому завышению результатов расчета величины практического пробега электронов R_p . Причина такого завышения уже указывалась в этой работе при изучении безусловного минимума зависимости $R(x)$ в точке x_p .

Результаты, полученные для алюминиевой мишени, облучаемой электронами с энергиями 2, 5 и 10 МэВ, позволяют провести их сравнение с данными, приведенными в [3], которые уже были использованы в этой работе для оценки точности стандартных эмпирических соотношений для зависимости энергии электронов E от пространственных характеристик R_p и R_{50} распределения дозы электронов в алюминии. Данные для сравнения приведены в таблице 3.3. Здесь в колонке R_p представлены значения практического пробега электронов R_p из [3], данные колонок Av и σ взяты из таблицы 3.1, но представлены в единицах $г/см^2$. В колонке $\Delta R_p/\sigma$ представлены относительные отклонения значений практического пробега электронов R_p , полученных в этой работе (колонка Av) от приведенных в [3] в единицах среднеквадратических отклонений (колонка σ).

Таблица 3.3. Сравнение результатов расчета практического пробега электронов в алюминии для различных энергий электронов.

$E, \text{МэВ}$	R_p	Av	σ	$\Delta R_p/\sigma$
2	0,356	0,358	0,0038	0,526
5	0,971	0,979	0,0099	0,808
10	2,00	2,021	0,0122	1,721

Полученные результаты согласуются с данными стандарта [3] на уровне, не превышающем величины двух σ .

3.4. Выводы раздела 3

Проведена серия расчетов первой и второй производных от функций, используемых для аппроксимации результатов измерений и компьютерной реализации полуэмпирической модели глубинных распределений дозы электронного излучения. Показано, что полуэмпирическая модель глубинных распределений дозы электронного излучения и методы полиномиальной аппроксимации (полиномы 3-й и 4-й степени) позволяют с удовлетворительной точностью рассчитывать значения глубинных распределений дозы электронного излучения и их первых производных. Сравнение вторых производных,

полученных на основе различных методов аппроксимации глубинных распределений дозы электронного излучения, приводит к выводу о том, что положение точки x_p , которое необходимо для вычислений значений практического пробега электронов R_p , может быть определено лишь с достаточно большой погрешностью.

Изучена зависимость погрешности величины практического пробега электронов R_p от погрешности определения положения точки x_p . Показано, что зависимость величины практического пробега электронов $R(x)$ от точки x , выбранной на глубинном распределении дозы электронного излучения, имеет минимум при $x = x_p$ для всех численных методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения. Откуда следует вывод о слабой зависимости погрешности величины практического пробега электронов R_p от погрешности определения положения точки x_p . Отмечено, что наличие безусловного минимума в зависимости $R(x)$ является причиной систематического смещения результатов расчета значений величины практического пробега электронов R_p при использовании линейной аппроксимации глубинных распределений дозы электронного излучения.

На основе численного дифференцирования результатов измерений вычислены значения практического пробега электронов R_p в соответствии с приведенным в стандартах определением. Результаты расчетов представлены в графическом и табличном виде, и иллюстрируют полученные выводы.

Сравнение результатов, полученных с использованием различных численных методов обработки измерений, позволило оценить точность методов определения характеристик энергии электронов. Показано, что относительная неопределенность, связанная с использованием различных вычислительных методов, результатов расчета практического пробега электронов R_p оценивается как 1%. Отмечается, что наибольшие отклонения наблюдаются для случая алюминиевой мишени, облучаемой электронами с энергиями 2 и 5 МэВ. Это

связано с погрешностью значений глубинных распределений дозы электронного излучения, рассчитанных с использованием полуэмпирической модели.

Результаты, полученные в третьем разделе, представлены в работах [45, 46, 51].

РАЗДЕЛ 4

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

4.1. Оценки области допустимых значений энергии электронов

Процедура контроля энергии электронов в процессе облучения объектов, проходящих радиационную обработку, связана с необходимостью поддержания энергии электронов в некотором диапазоне значений. Этот диапазон значений энергии электронов в пучке определяется из условий, накладываемых на значения дозы в облучаемом объекте. Так, например, для процессов радиационной стерилизации к таким условиям относятся:

– минимальное значение дозы в облучаемом объеме Ω должно быть больше некоторого заданного значения дозы D_{st} (стерилизационная доза), требуемого для выполнения радиационной стерилизации

$$\min_{x \in \Omega} (D_M(x, E)) \geq D_{st}, \quad (4.1)$$

– уровень неоднородности дозы в облучаемом объеме Ω , который определяется как отношение максимального значения к минимальному значению дозы в облучаемом объеме, не должен превышать некоторого заданного значения DUR , требуемого для выполнения радиационной стерилизации

$$\frac{\max_{x \in \Omega} (D_M(x, E))}{\min_{x \in \Omega} (D_M(x, E))} \leq DUR. \quad (4.2)$$

Здесь $D_M(x, E)$ – глубинное распределение дозы электронного излучения в материале M при облучении электронами с энергией E .

Приведенные выше условия используются для определения границ энергии электронного пучка, в которых допустимо проводить процесс облучения. При оптимальном планировании процесса облучения область изменений энергии электронов пучка ΔE определяется величинами $\Delta D(x_c)$ неопределенности результатов измерений дозы в критических пространственных точках x_c , в которых наблюдаются максимум и минимум дозы электронного излучения.

Поэтому, при проведении процессов стерилизации, допустимая область энергий электронов определяется как актуальными параметрами радиационной установки, так и характеристиками объектов, проходящих радиационную обработку. Для малых неопределенностей результатов измерений дозы $\Delta D(x_c)$ допустимая область энергий электронов ΔE может быть определена на основе величины частной производной дозы $D_M(x, E)$ по энергии следующим образом:

$$\Delta E = \Delta D(x_c) \cdot \left(\frac{\partial D_M(x_c, E)}{\partial E} \right)^{-1}. \quad (4.3)$$

В этой связи, в дозиметрии электронного излучения представляет интерес развитие вычислительных методов определения частной производной дозы электронного излучения по энергии электронов на основе результатов измерений, проводимых стандартными методами дозиметрии в промышленных стерилизационных центрах.

В отличие от численного дифференцирования дозы по глубине на основе результатов измерений глубинного распределения дозы электронов в облучаемом объекте, для численного дифференцирования дозы по энергии электронов получить экспериментальные данные в промышленных стерилизационных центрах не представляется возможным. Поэтому, одной из ключевых задач дозиметрии электронного излучения в радиационных технологиях является развитие вычислительных методов определения частных производных распределения дозы по энергии электронов.

Определение частных производных дозы электронного излучения в различных материалах по энергии электронов, проводили с использованием компьютерных экспериментов, в которых моделировали глубинные распределения дозы при облучении этих материалов моноэнергетическими пучками электронов с незначительно отличающимися энергиями. Моделирование глубинных распределений дозы электронного излучения проводилось методом Монте-Карло в детальной физической модели с использованием программного обеспечения RT-Office [14].

Результаты моделирования глубинных распределений дозы $D_M(x, E)$ в веществах полиэтилен, углерод, вода, тефлон, дерево, алюминий, облучаемых моноэнергетическим пучком электронов с различными энергиями из двух наборов – (4.95, 5, 5.05) и (9.9, 10, 10.1) МэВ, были получены с малой относительной статистической погрешностью (<0.03%).

С использованием стандартной двухточечной процедуры численного дифференцирования

$$\left(\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \right)_{i,j} = \frac{D_M(x, E_i) - D_M(x, E_j)}{E_i - E_j} \quad (4.4)$$

были рассчитаны частные производные дозы электронного излучения по энергии электронов по результатам моделирования глубинных распределений дозы $D_M(x, E)$. Здесь индексы i и j определяют значения энергии электронов E_i и E_j из указанных выше наборов энергий, которые используются для расчета значения производной $\left(\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \right)_{i,j}$.

Результаты расчетов частных производных дозы электронного излучения по энергии в полиэтиленовой мишени на основе использования данных, соответствующих набору энергий электронов (9.9, 10, 10.1) МэВ, показаны на рисунке 4.1. На рисунке треугольники отмечают значения производной, рассчитанные с использованием пары энергий электронов (9.9, 10) МэВ, прямоугольники – пары энергий (10, 10.1) МэВ и окружности – (9.9, 10.1) МэВ. Для сравнения, на рисунке приведены значения частной производной дозы электронного излучения $\partial D_M(x, E) / \partial E$ в зависимости от глубины x , рассчитанные с использованием компьютерной реализации [7] полуэмпирической модели поглощения энергии электронного излучения. Кроме того, на рисунке показано глубинное распределение дозы электронов с энергией 10 МэВ (пунктирная кривая), вертикальная пунктирная прямая отмечает глубину максимума производной дозы электронного излучения.

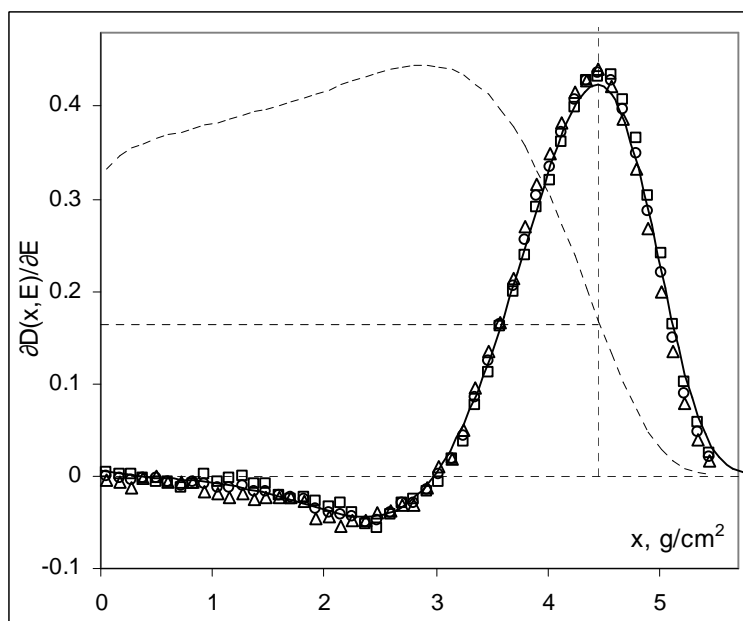


Рис. 4.1. Частные производные дозы по энергии электронов в зависимости от глубины в полиэтиленовой мишени для области энергий электронов 10 МэВ. Треугольники – численное дифференцирование с использованием пары энергий электронов (9.9, 10) МэВ, прямоугольники – пара энергий (10, 10.1) МэВ и окружности – энергии (9.9, 10.1) МэВ. Сплошная кривая – расчет на основе полуэмпирической модели поглощения энергии электронов. Пунктирная кривая – глубинное распределение дозы электронов с энергией 10 МэВ.

Сравнение результатов, рассчитанных на основе двухточечной процедуры численного дифференцирования глубинных распределений дозы, полученных методом Монте-Карло с малой статистической погрешностью, показывает, что процедура (4.4) устойчива к выбору значений энергий и размеру интервала между энергиями. Поэтому, получаемые результаты численного дифференцирования $\partial D_M(x, E)/\partial E$ на основе такого подхода могут быть использованы для оценки погрешности различных методов расчета частных производных дозы по энергии электронов.

Для иллюстрации оценки погрешности различных методов расчета частных производных дозы по энергии электронов, на рисунке 4.2 приведены частные производные дозы электронного излучения в полиэтиленовой мишени для

энергии электронов $E = 5$ МэВ (значения показаны треугольниками) и $E = 10$ МэВ (значения показаны кружочками).

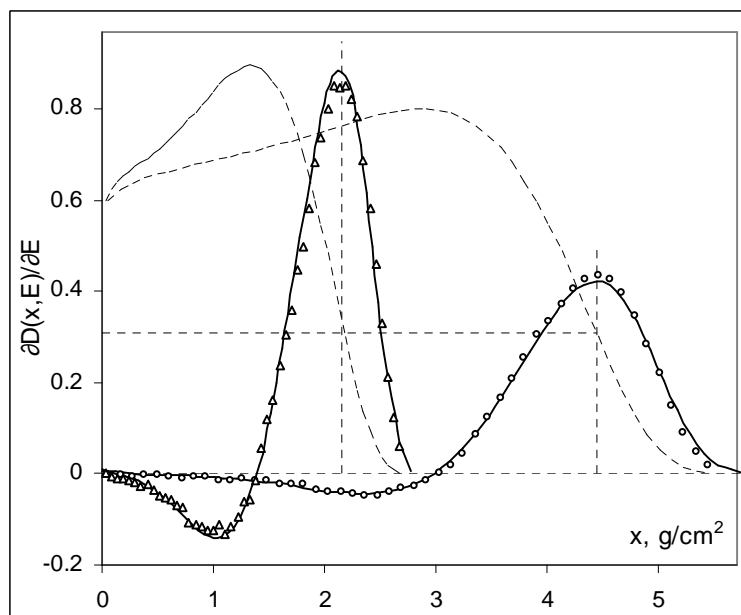


Рис. 4.2. Частные производные дозы по энергии электронов в зависимости от глубины в полиэтиленовой мишени в области энергий электронов 5 МэВ (треугольники) и 10 МэВ (окружности). Точки – расчет на основе численного дифференцирования данных, полученных методом Монте-Карло. Сплошные кривые – расчет на основе полуэмпирической модели поглощения энергии электронного излучения. Пунктирные кривые – глубинные распределения дозы электронного излучения для энергий электронов 5 и 10 МэВ.

Для сравнения вычислительных методов на рисунке приведены результаты расчетов частных производных дозы электронного излучения по энергии электронов в полиэтиленовой мишени для энергий электронов 5 и 10 МэВ, выполненных в полуэмпирической модели (сплошные кривые). Сравнение результатов, рассчитанных на основе численного дифференцирования дискретных данных, полученных методом Монте-Карло [14] с малой статистической погрешностью, и на основе компьютерной реализации [7] полуэмпирической модели дозы электронного излучения показывает их хорошее согласие. Таким образом, на основе численных экспериментов показана возможность расчета частной производной дозы электронного излучения по

энергии электронов с использованием полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе.

Отметим, что на глубинах, где наблюдаются максимумы частных производных дозы электронного излучения, величины дозы близки к половинному значению дозы на границах мишени, на которую падает электронное излучение.

Представленные в работе [45] и в этом разделе выводы указывают на возможность использования полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе для расчета не только глубинных распределений дозы электронного излучения, но и частных производных дозы по глубине мишени и энергии электронов в пучке. Однако, эти выводы базируются на исследованиях случаев, когда точно установлено соответствие между параметрами полуэмпирической модели и результатами компьютерных экспериментов, полученных с малой модельной и статистической погрешностью. В практике дозиметрического контроля результаты измерений могут иметь значительные случайные погрешности, и определение модельных параметров, соответствующих контролируемому процессу, может содержать большую неопределенность значений. В этой связи, представляет интерес рассмотрение эмпирических закономерностей, проявляющихся в распределениях дозы электронного излучения, как функций от глубины в мишени и энергии электронного излучения.

4.2. Формализация калибровочной симметрии распределений дозы электронного излучения

Проведены исследования возможностей использования эмпирических закономерностей распределений дозы электронного излучения, в частности, калибровочной (масштабной) симметрии. Для этого методом Монте-Карло были рассчитаны наборы глубинных распределений доз в мишенях из углерода, полиэтилена и алюминия при облучении моноэнергетическими пучками электронов с энергиями $E_e = 3, 5, 8, 10, 12$ МэВ. Для иллюстрации калибровочной

симметрии на рисунках 4.3 и 4.4 представлен набор глубинных распределений доз электронного излучения в мишени из полиэтилена, облучаемой моноэнергетическими электронами с энергиями 3, 5, 8, 10, 12 МэВ.

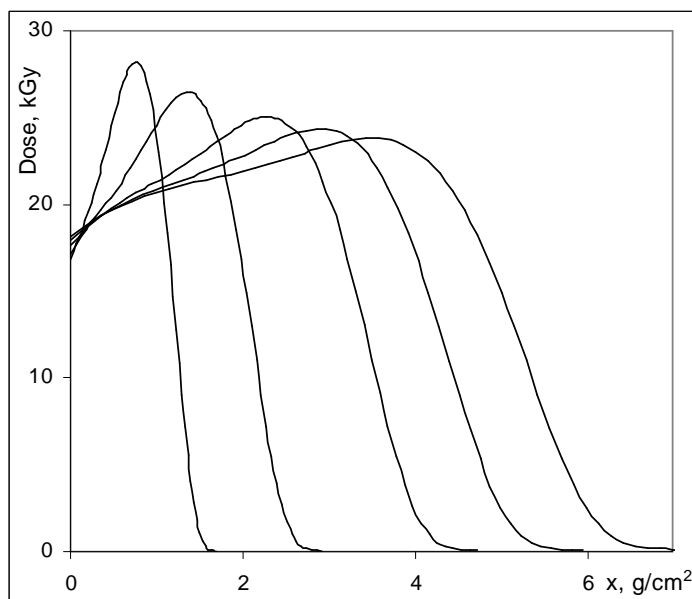


Рис. 4.3. Зависимости величины дозы электронного излучения от глубины x при облучении полиэтиленовой мишени моноэнергетическими пучками электронов с различными энергиями.

Зависимости распределений доз электронов от величины $x/R_{ex}(E)$ – относительной глубины в полиэтиленовой мишени, представленной в единицах $R_{ex}(E)$ – экстраполированного пробега электронов в веществе мишени [2], показаны на рисунке 4.4. Кроме того, на рисунке указаны оптимальная толщина мишени R_{opt} (точка, в которой величина дозы равна значению дозы на передней границе мишени – метка 1) при одностороннем облучении и глубина расположения критической точки X_c (точка, в которой величина дозы равна половине значения дозы на передней границе мишени – метка 2) при двухстороннем облучении. При выборе масштабного множителя, зависящего от энергии электронов $R_{ex}^{-1}(E)$, для глубины в мишени x наблюдается хорошее совпадение значений глубинных распределений доз в области спадания значений величины дозы. Это диапазон доз от значения на передней границе мишени $D_{av}(0)$ (относительное значение дозы равное единице) до значений дозы при $x = R_{ex}(E)$.

Такая закономерность наблюдается для широкого класса материалов (см. рис. 4.5 и 4.6) и называется калибровочной симметрией.

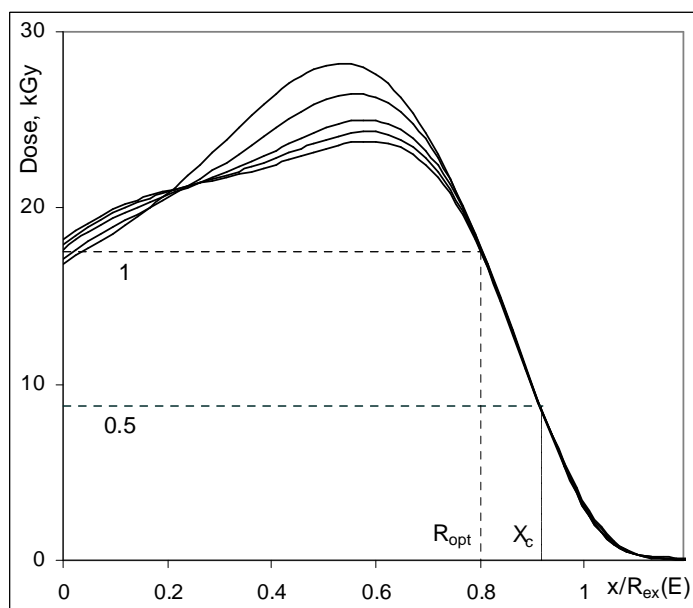


Рис. 4.4 Зависимости дозы электронного излучения от величины относительной глубины $x/R_{ex}(E)$ в полиэтиленовой мишени при облучении моноэнергетическими пучками электронов с различными энергиями.

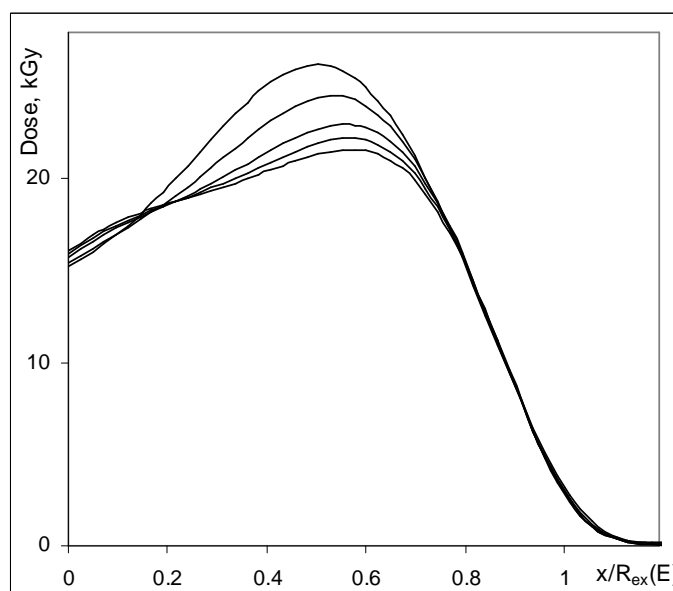


Рис. 4.5 Зависимости дозы электронного излучения от величины $x/R_{ex}(E)$ – относительной глубины в мишени из углерода при облучении моноэнергетическими пучками электронов с различными энергиями.

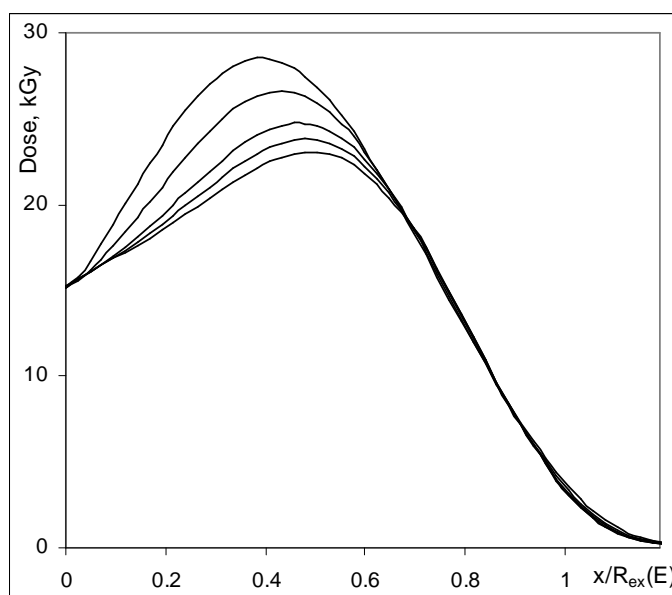


Рис. 4.6 Зависимости дозы электронного излучения от величины $x/R_{ex}(E)$ – относительной глубины в алюминиевой мишени при облучении моноэнергетическими пучками электронов с различными энергиями.

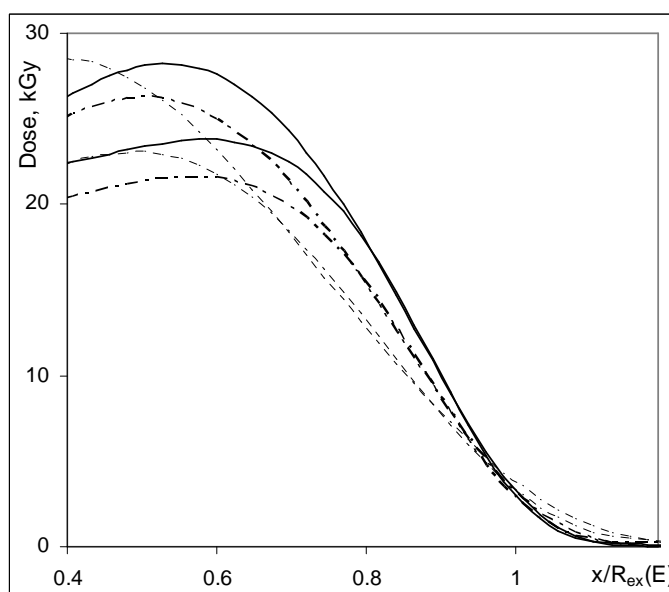


Рис. 4.7. Глубинные распределения доз электронов с энергиями 3 и 12 МэВ в мишенях из полиэтилена (сплошные кривые), углерода (штрихпунктирные кривые) и из алюминия (пунктирные кривые).

Для сравнения глубинных зависимостей дозы электронного излучения в различных материалах на рис.4.7 представлены распределения доз в полиэтилене (сплошные кривые), углероде (штрихпунктирные кривые) и алюминии

(пунктирные кривые) при энергии 3 и 12 МэВ. Калибровочная симметрия наблюдается для различных веществ мишени, и скорость спадания дозы (наклон) уменьшается с увеличением эффективного атомного номера вещества мишени.

Следует отметить, что область глубин, в которой наблюдается калибровочная симметрия, имеет малый размер (от 0.8 до 1.0). Однако, в этой области глубин величина дозы уменьшается сильно, и эта область представляет основной интерес на этапе планировании радиационной стерилизации при определении толщины объектов, проходящих обработку. Именно в этой области глубин расположены критические пространственные точки x_c дозы электронного излучения, в которых необходимо проводить расчеты допустимой области энергий электронов ΔE в соответствии с формулой (4.3). Относительное положение критических точек R_{opt} и X_c (точки пересечения распределения доз с горизонтальными прямыми) для различных материалов и энергий электронов изменяются слабо.

Для области глубин x , в которой наблюдается калибровочная симметрия, будем полагать справедливыми следующие тождества:

$$D_M(x, E) \equiv D_M^*(z(E)), \quad z(E) \equiv x/R_{ex}(E), \quad (4.5)$$

В этом предположении, частные производные распределения дозы по энергии и по глубине могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} = \frac{-x}{R_{ex}^2(E)} \cdot \frac{\partial D_M^*(z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial R_{ex}(E)}{\partial E}$$

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial x} = \frac{1}{R_{ex}(E)} \cdot \frac{\partial D_M^*(z)}{\partial z}$$

Откуда следует соотношение между частными производными дозы

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} = -z(E) \cdot \frac{\partial R_{ex}(E)}{\partial E} \cdot \frac{\partial D_M(x, E)}{\partial x} \quad (4.6)$$

Это соотношение представляет большой практический интерес, так как позволяет рассчитать частную производную дозы по энергии электрона на основе результатов измерений, выполненных с помощью дозиметрического клина.

Распределения дозы $D_M(x, E)$ в веществах полиэтилен, углерод, вода, тефлон, древесина, алюминий при облучении моноэнергетическими пучками электронов с

различными энергиями из двух наборов (4.95, 5, 5.05) и (9.9, 10, 10.1) МэВ были рассчитаны методом Монте-Карло. Результаты расчетов получены с малой статистической погрешностью ($<0.03\%$).

Проведена оценка возможностей использования полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе для расчета частной производной распределения дозы электронного излучения по энергии. Результаты расчетов для полиэтиленовой мишени, облучаемой электронами с энергией 5 и 10 МэВ, приведены на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно. Точки – значения производных дозы по энергии электронов, рассчитанные по результатам моделирования методом Монте-Карло. Незаполненные кружочки – результаты численного дифференцирования набора этих дискретных данных по энергии электронов. Сплошные кривые – производные дозы по энергии электронов, полученные на основе полуэмпирической модели глубинного распределения дозы электронного излучения.

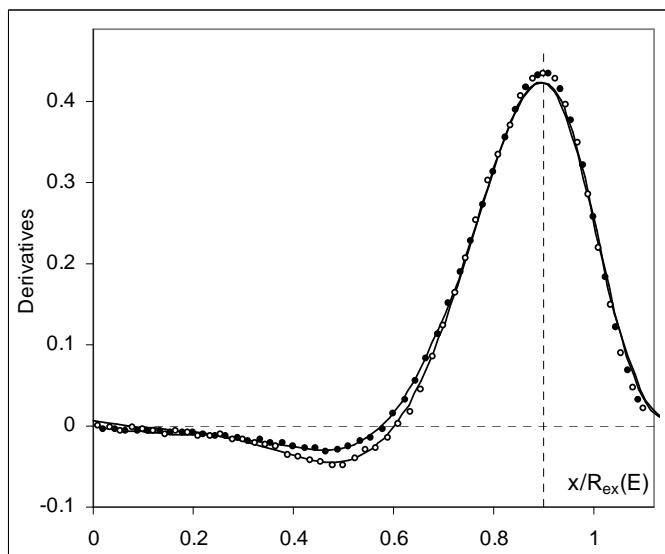


Рис. 4.8. Производные дозы по энергии электронов, полученные различными методами, для полиэтилена, облучаемого электронами с энергией 10 МэВ.

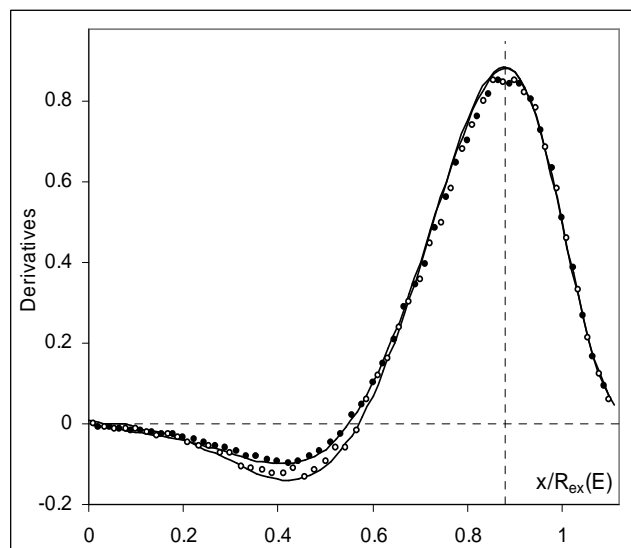


Рис. 4.9. Производные дозы по энергии электронов, полученные различными методами, для полиэтилена, облучаемого электронами с энергией 5 МэВ.

Существенные отличия в результатах, полученных различными методами, наблюдаются лишь в области нарушения калибровочной симметрии глубинных распределений доз, т.е. для глубин $x < 0.6 \cdot R_{ex}(E)$.

4.3. Расчет границ области допустимых значений энергии электронов

Для реализации соотношения (4.6) в методе расчета частной производной дозы по энергии электрона необходимо определить производную величины экстраполированного пробега электронов по энергии электрона. Величина экстраполированного пробега электронов $R_{ex}(E)$ хорошо известна [2] и имеются эмпирические соотношения для расчета значений этой величины в различных веществах и при различных энергиях электронов.

С использованием блока “Analytics” программного обеспечения RT-Office [14] были вычислены значения экстраполированного пробега электронов $R_{ex}(E)$ в веществах полиэтилен, углерод, дерево, вода, тефлон, алюминий для электронов с энергией E в области от 2 до 12 МэВ. Аппроксимация зависимостей экстраполированного пробега от энергии электронов с использованием линейных функций была выполнена с использованием метода наименьших квадратов.

Результаты параметрической подгонки коэффициентов (A_M, B_M) линейных функций

$$R_{ex}(E) = A_M \cdot E + B_M \quad (4.7)$$

для различных веществ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Коэффициенты линейной аппроксимации зависимости экстраполированного пробега электронов (г/см^2) от энергии электронов (МэВ).

	Polyethylene	Carbon	Wood	Water	Teflon	Aluminum
A_M	0.5046	0.5626	0.5348	0.5086	0.5773	0.5431
B_M	- 0.0993	- 0.1568	- 0.1414	- 0.1379	- 0.185	- 0.205

Как следует из приведенных в таблице данных, для всех рассмотренных веществ в области энергий электронов от 5 до 10 МэВ вклад коэффициента B_M в величину экстраполированного пробега электронов не велик.

Используя соотношение (4.6) и предположение о линейной зависимости экстраполированного пробега от энергии электронов (4.7) получаем:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} = - \frac{x \cdot A_M}{A_M \cdot E + B_M} \cdot \frac{\partial D_M(x, E)}{\partial x} \quad (4.8)$$

Численная проверка этого соотношения между частными производными выполнена на основе данных о глубинных распределениях дозы электронного излучения, полученных с использованием метода Монте-Карло, и полуэмпирической модели поглощения энергии электронов. Результаты апробации различных методов расчета производных дозы по энергии электронов для полиэтиленовой мишени, облучаемой электронами с энергией 5 и 10 МэВ, приведены на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно. Точки – значения производных дозы по энергии электронов, рассчитанные на основе распределений дозы, которые были получены методом Монте-Карло. Незаполненные кружочки – результаты численного дифференцирования набора дискретных данных по энергии электронов. Эти результаты совпадают с приведенными на рисунке 4.2. Заполненные кружочки – результаты, полученные на основе численного

дифференцирования распределений дозы по глубине и использования соотношения между частными производными (4.8). Сплошные кривые – производные дозы по энергии электронов, полученные на основе полуэмпирической модели дозы электронного излучения. Эти результаты получены как методом численного дифференцирования дозы по энергии электронов (совпадают с приведенными на рисунке 4.1), так и с использованием соотношения (4.8) на базе численного дифференцирования распределений дозы по глубине. Из рисунков 4.8 и 4.9 видно, что существенные отличия в результатах численного дифференцирования дозы по энергии электронов, полученных различными методами, наблюдаются лишь в области нарушения калибровочной симметрии глубинных распределений доз.

Для области глубин x , в которой наблюдается калибровочная симметрия, из (4.5) следует тождество:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \equiv \frac{-z(x, E)}{R_{ex}(E)} \cdot \frac{dR_{ex}(E)}{dE} \cdot \frac{dD_M^*(z)}{dz} . \quad (4.9)$$

Для случая линейной зависимости экстраполированного пробега от энергии электронов $R_{ex}(E) = A_M \cdot E + B_M$, соотношение (4.9) будет иметь вид:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \equiv \frac{-z(x, E) \cdot A_M}{A_M \cdot E + B_M} \cdot \frac{dD_M^*(z)}{dz} . \quad (4.10)$$

В предположении, что вклад коэффициента B_M в линейной зависимости экстраполированного пробега от энергии не велик (см. таб. 4.1), для области энергий от 5 до 10 МэВ величина $\eta_M(x, E) = E \cdot \partial D_M(x, E) / \partial E$ слабо зависит от энергии электронов.

Для проверки этого вывода проведенная серия расчетов. На рисунке 4.10 представлены величины $\eta_M(x, E)$ для полиэтиленовой (сплошные кривые) и алюминиевой (пунктирные кривые) мишеней, облучаемых электронами с энергией 5 и 10 МэВ. Расчеты выполнены с использованием полуэмпирической модели поглощения энергии электронов и численного дифференцирования данных, полученных методом Монте-Карло (отдельные точки).

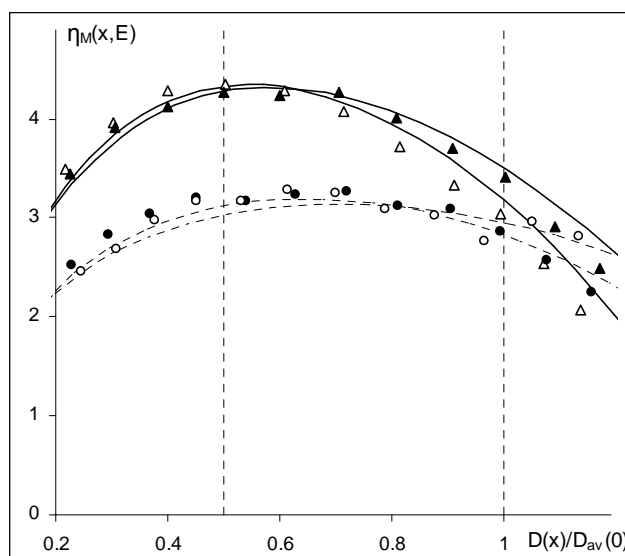


Рис. 4.10. Величины $\eta_M(x, E)$, в алюминиевой (пунктирные кривые) и в полиэтиленовой (сплошные кривые) мишенях, облучаемых электронами с энергией 5 и 10 МэВ.

Как видно из рисунка, калибровочная симметрия глубинных распределений доз электронного излучения приводит к слабой зависимости величины $\eta_M(x, E)$ в области значений доз, представляющих интерес при планировании процесса радиационной стерилизации.

Допустимое относительное изменение энергии электрона $\frac{\Delta E_M(E)}{E}$ определяется относительной погрешностью измерений дозы $\frac{\Delta D_M(z_c)}{D_M(0, E)}$ в критических точках z_c и может быть представлено в виде:

$$\frac{\Delta E_M(E)}{E} = \frac{1}{\eta_M(z_c, E) D_M(0, E)}, \quad (4.11)$$

где $D_M(0, E)$ величина дозы на передней границе мишени $z = 0$ при облучении электронами с энергией E . При планировании процессов радиационной стерилизации, как правило, полагают, что значение дозы на передней границе объекта облучения равна величина стерилизационной дозы $D_M(0, E) = D_{st}$.

Таким образом, соотношение (4.11) позволяет оценивать допустимые изменения энергии электронов в процессе радиационной стерилизации. Так, например, в случае одностороннего облучения полиэтилена в оптимальном

режиме $D_M(R_{opt})/D_{st}=1$ согласно данным приведенным на рис. 4.10 имеем $\eta_M(R_{opt}, E) \approx 3.2$. В этом случае для величины относительной случайной ошибки измерения дозы от величины стерилизационной дозы $\Delta D_M(R_{opt})/D_{st} = 5\%$, величина допустимых изменений энергии электронов $\Delta E_M(E)/E$, согласно соотношению (4.11), не должна превышать 1.6%. Оценка в случае двухстороннего облучения полиэтилена в оптимальном режиме $D_M(x_c)/D_{st} = 0.5$ дает $\eta_M(x_c, E) \approx 4.3$, и при $\Delta D_M(x_c)/D_{st} = 5\%$ получаем $\Delta E_M(E)/E \leq 1.1\%$. Оценки для мишеней из материала с эффективным атомным номером большим, чем у полиэтилена, например алюминия, дают величины допустимых изменений энергии электронов близкие к 1.7%.

Приведенные выше численные оценки относительных величины допустимых изменений энергии электронов показывают, что проведение контроля энергии электронов в процессе радиационной стерилизации не возможно без вычислительных методов, которые обеспечивают относительную точность определения величины энергии электронов не меньше одного процента.

4.4. Выводы раздела 4

В численных экспериментах продемонстрирован метод расчета частных производных распределений дозы электронного излучения по энергии на основе полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе. Это позволяет для решений оптимизационных задач получать необходимые данные в рамках полуэмпирической модели вместо моделирования методом Монте-Карло с малой статистической погрешностью, что существенно уменьшает трудоемкость (затраты времени) планирования и контроля радиационно-технологического процесса.

На основе эмпирической закономерности для глубинных распределений дозы электронного излучения получены соотношения, связывающие частную производную дозы по энергии электрона с частной производной дозы по глубине. Проведена апробация этих соотношений на основе данных о глубинных

распределениях дозы электронного излучения, полученных с использованием метода Монте-Карло и полуэмпирической модели поглощения энергии электронов. Результаты апробации позволяют предложить метод расчета производной дозы по энергии и оценки области допустимых изменений энергии электронов в процессе облучения по результатам измерений, проводимых стандартными методами в промышленных стерилизационных центрах.

Приведенные выше численные оценки относительных величины допустимых изменений энергии электронов показывают, что проведение контроля энергии электронов в процессе радиационной стерилизации не возможно без вычислительных методов, которые обеспечивают относительную точность определения величины энергии электронов не меньше одного процента. Результаты, полученные в этом разделе, представлены в работах [47, 48, 53, 56].

РАЗДЕЛ 5.

ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ В ДОЗИМЕТРИИ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. Технология получения и сохранения результатов компьютерных экспериментов

Для проведения компьютерных экспериментов было выбрано специализированное программное обеспечение Радиационно-Технологический Офис (RT-Office) [14]. RT-Office реализует компьютерные технологии на всех этапах выполнения работ на РТ линиях с излучателями в виде электронов, X-ray и γ -ray. RT-Office – это общая программная оболочка, которая обеспечивает гибкое интеллектуальное взаимодействие между специализированными модулями для оптимального планирования процесса облучения и контроля его проведения.

Возможности RT-Office базируются на:

- разработанных полуэмпирических моделях распределения поглощенной дозы в пространственно-неоднородных объектах, облучаемых сканирующими/стационарными пучками электронов и фотонов;
- эффективных программах, моделирующих методом Монте-Карло процессы облучения;
- самосогласованных геометрических и физических моделях основных функциональных элементов и режимов облучения реального радиационного оборудования;
- базах данных о характеристиках оборудования и объектов, используемых в радиационных технологиях;
- компьютерных методах экспертизы и контроля условий проведения облучения;
- компьютерных методах представления, анализа и интерпретации расчетных данных;

– методах валидации теоретических предсказаний на основе сравнения расчетных данных, полученных различными независимыми методами моделирования или/и сравнением с практической дозиметрией.

Для моделирования глубинного распределения дозы в объекте была выбрана специализированная программа ModeRTL (Моделирование РТ линии), входящая в состав RT-Office. ModeRTL включает в себя пять тематических взаимосвязанных блоков, каждый из которых выполняет свои специфические функции. При решении поставленной задачи был использован аналитический блок для быстрых аналитических оценок, блок для точных вычислений методом Монте-Карло с заданной статистикой, и блок для визуализации, анализа и сравнения полученных результатов расчета.

Для выбора типа базы данных были проанализированы некоторые системы управления данными. Сравнивались возможности использования MySQL и PostgreSQL серверов баз данных, а также библиотеки SQLite. В связи с тем, что RT-Office содержит однопользовательские десктопные модули, нет необходимости поддерживать сетевой доступ. В результате была выбрана реляционная встраиваемая SQLite. SQLite не представляет собой независимый процесс, с которым взаимодействует программа, а является составляющей программы, и полностью интегрируется в нее. Она хранит всю базу данных в единственном стандартном файле на том компьютере, на котором исполняется программа.

Для разработки клиента к SQLite БД был выбран язык программирования C#. Такой выбор был сделан по причине обширной документации по использованию SQLite в C# проектах, наличия стабильной версии драйвера System.Data.Sqlite – ADO.NET провайдера для SQLite. Для написания приложения использовалась среда разработки Visual Studio C# Express, платформа .Net Framework 4.0.

Структура файла результатов, полученных с использованием ModeRTL, приведена на рисунке 5.1. Для использования в качестве эталонных данных при сравнении вычислительных методов обработки данных необходимо только

глубинное распределение дозы в центре мишени. Программная оболочка «Etalon», разработанная для получения эталонных данных, запускает выполнение программы ModeRTL, передавая ей параметры, после чего анализирует полученные и сохраненные в файле результаты моделирования, выделяет необходимую часть и сохраняет их в БД.

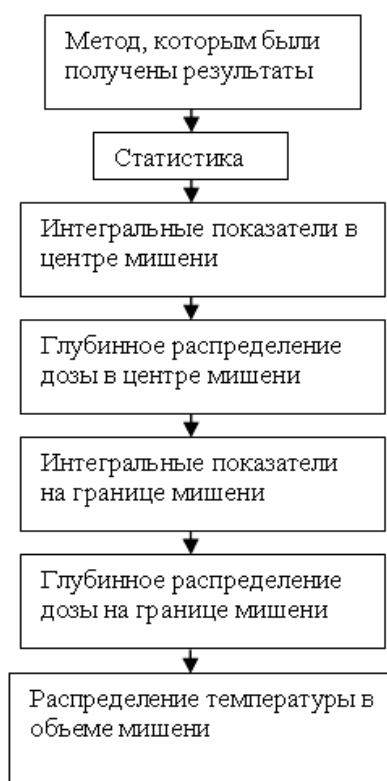


Рис. 5.1. Структура результатов расчета ModeRTL

На рис. 5.2 приведена структура данных, представляющих собой глубинное распределение дозы в центре мишени, сохраняемых в SQLite БД.

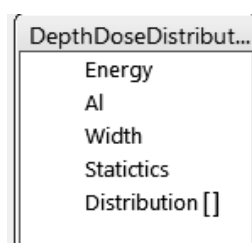


Рис. 5.2. Структура данных, сохраняемых в БД

Поле Distribution представляет собой массив данных и имеет тип BLOB (массив двоичных данных). «Etalon» обеспечивает сериализацию и

десериализацию данных, т.е. процесс преобразования объекта в поток байтов для хранения или передачи его в БД и обратный процесс распаковки данных.

Разработанная программная оболочка «Etalon» позволяет динамически выбрать из БД необходимый набор результатов компьютерных экспериментов. Выбранные из БД данные могут быть представлены в текстовом формате с возможностью дальнейшего использования в любом инструментальном программном средстве, в котором исследуются различные методы обработки экспериментальных данных.

5.2. Сравнение методов обработки результатов измерений глубинных распределений дозы на наборах тестовых данных

Сравнения методов обработки результатов измерений проводили на наборе тестовых глубинных распределений дозы электронного излучения, который был рассчитан методом Монте-Карло в детальной физической модели прохождения электронного излучения в веществе. Для этого использовали вычислительный блок “Monte-Carlo” в программном обеспечении ModeRTL [14]. Глубинные распределения дозы были рассчитаны в алюминиевой мишени, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Значения дозы $D_e(x)$ были получены в 50 пространственных точках, которые равномерно покрывают интервал глубин x от поверхности мишени до R_0 – полного пробега электронов с энергией 10 МэВ, рассчитанного в приближении непрерывного замедления. Для моделирования тестовых распределений дозы, использовали 10^3 электронных траекторий. Это обеспечило в 26 компьютерных экспериментах относительную статистическую погрешность результатов моделирования на уровне 4 %, что сравнимо с погрешностью результатов измерений.

На рисунке 5.3 показаны две гистограммы из набора тестовых глубинных распределений дозы электронного излучения. Для сравнения на рисунке сплошной кривой показана зависимость дозы электронного излучения от глубины в алюминиевой мишени.

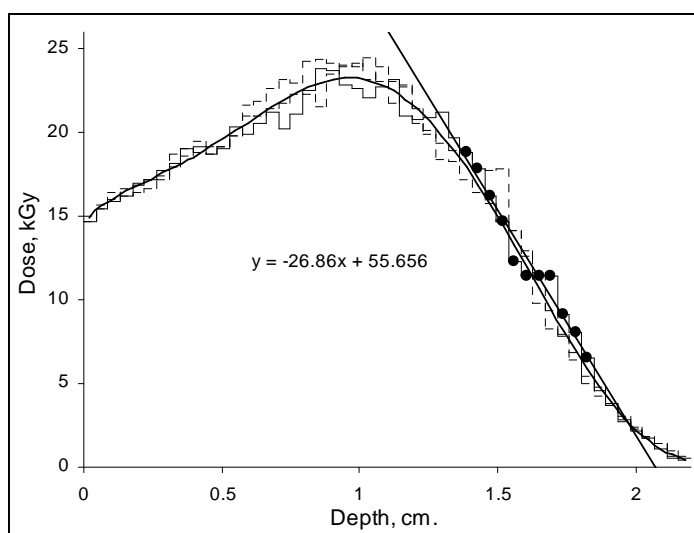


Рис. 5.3. Примеры статистически независимых тестовых глубинных распределений дозы электронного излучения.

Проведено изучение величин случайной погрешности глубинных распределений дозы в тестовых примерах. На рисунке 5.4 показаны статистические характеристики случайной погрешности дозы в зависимости от глубины.

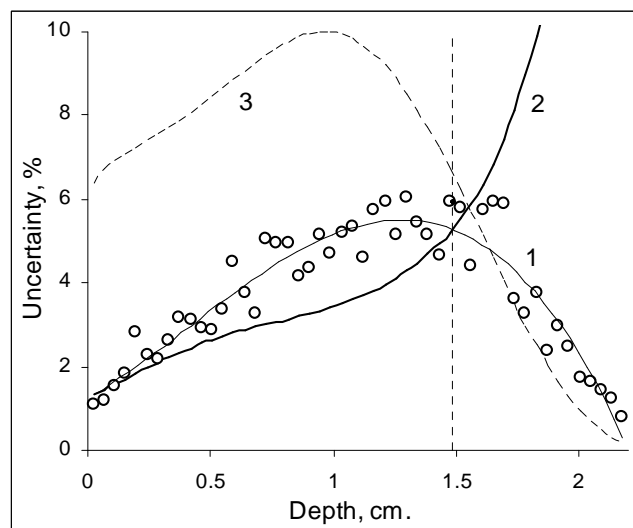


Рис. 5.4. Статистические характеристики случайной погрешности дозы электронного излучения в зависимости от глубины в мишени.

Точки на рисунке – отношение значений среднеквадратичного отклонения к среднему значению дозы по всей области глубин, полученные в результате статистической обработки 26 тестовых примеров. Кривая 1 – аппроксимация

полиномом 4-й степени дискретных данных, представленных на рисунке в виде точек. Кривая 2 – отношение значения величины среднеквадратичного отклонения к значению дозы в зависимости от глубины в мишени. Кривая 2 рассчитана на основе значений аппроксимирующего полинома (кривая 1) и значений глубинного распределения дозы (пунктирная кривая 3).

Из рисунка видно, что значение неопределенности дозы существенно изменяется с глубиной и наблюдается сильное отличие зависимостей, представленных кривыми 1 и 2, от линейной зависимости. Это означает, что для набора тестовых примеров величины случайных погрешностей дозы не возможно описать с использованием простых моделей – «постоянная абсолютная погрешность» либо «постоянная относительная погрешность».

Проведена статистическая оценка плотности вероятности случайных отклонений дозы электронного излучения в наборе тестовых примеров. Величины отклонений дозы для каждой глубины нормировалась на значение среднеквадратичного отклонения дозы на этой глубине (см. рис. 5.4. кривая 1). Гистограмма на рисунке 5.5 представляет функцию плотности вероятности относительных отклонений дозы, которая получена статистической обработкой набора тестовых примеров. Для сравнения на рисунке приведено стандартное (параметры $(0,1)$) нормальное распределение – сплошная кривая.

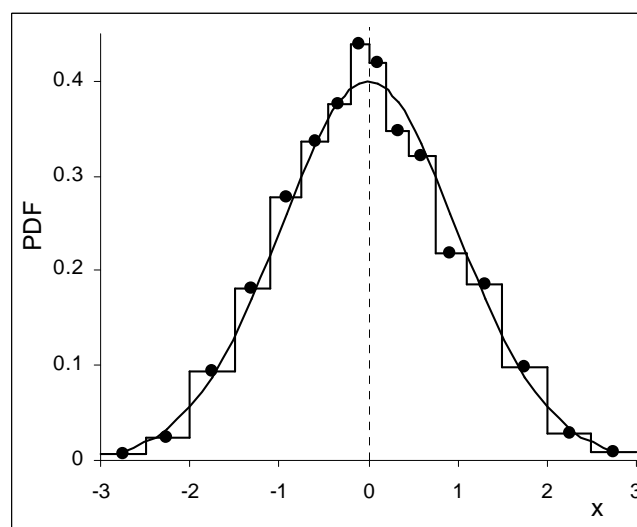


Рис. 5.5. Плотность вероятности случайных отклонений дозы электронного излучения в наборе тестовых примеров.

Распределение отклонений дозы в тестовых примерах можно полагать нормальным распределением вероятности.

Для сравнения вычислительных методов определения практического пробега электронов на основе обработки тестовых наборов данных были выбраны:

- линейная аппроксимация глубинного распределения дозы в ограниченной области значений доз,
- аппроксимация глубинного распределения дозы в ограниченной области значений доз с использованием полиномов 4-й степени,
- параметрическая подгонка полуэмпирической модели к глубинному распределению дозы в области глубин, где определены значения доз.

При сравнении методов выбирались наборы значений доз из различных областей с симметричными границами относительно величины дозы $D(x_p)$ в точке перегиба x_p глубинного распределения дозы электронного излучения. На основе численных исследований глубинного распределения дозы $D(x)$ в алюминиевой мишени, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ, можно полагать

$$K_p = \frac{D(x_p)}{D_{\max}} \approx 0.50, \quad \text{где} \quad D_{\max} = \max_{x \in [R_m, R_o]} (D(x)) \quad (5.1)$$

В таблице 5.1, приведены значения нижней K_{\min} и верхней K_{\max} границы областей значений доз, которые выбираются для выполнения аппроксимации.

Таблица 5.1. Значения нижней K_{\min} и верхней K_{\max} границы областей значений доз, которые выбираются для выполнения аппроксимации.

Area	K_{\min}	K_{\max}	N_p	R_p -Line	R_p -Pol
A ₁	0	1	27	--	2.024
A ₂	0.2	0.8	12	2.036	2.017
A ₃	0.25	0.75	10	2.030	2.015
A ₄	0.3	0.7	6	2.024	2.014
A ₅	0.4	0.6	4	2.018	--

В колонке N_p приведено количество значений дозы, которые принадлежат области обработки данных (число обрабатываемых узлов). Область A_1 имеет максимальное число узлов ($N_p = 27$), так как содержит весь набор данных на спаде глубинного распределения дозы. Область A_4 имеет минимальное число узлов ($N_p = 6$) для аппроксимации полиномами 4-й степени, потому, что число обрабатываемых узлов должно быть больше пяти.

Как базовые данные в таблице приведены результаты расчета практического пробега электронов R_p (в единицах [см]) на основе обработки глубинного распределения дозы, которое было получено с малой статистической погрешностью ($<0.05\%$) методом Монте-Карло. Обработку этого распределения дозы, проводили с использованием линейной аппроксимации (данные в колонке R_p -Line) и аппроксимации полиномами 4-й степени (колонка R_p -Pol).

Для примера один из методов определения величин практического пробега электронов на основе обработки тестовых глубинных распределений дозы иллюстрируется на рисунке 5.3. В этом методе используется линейная аппроксимация данных в области A_2 . Линейное уравнение, которое описывает касательную к глубинному распределению дозы в точке перегиба, показано на рисунке. Это позволяет рассчитать значение практического пробега электронов ($R_p = 2.072$ см.) для показанного на рисунке тестового случая.

В таблице 5.2 представлены средние значения (колонка \bar{A}_v) и среднеквадратичное отклонение (колонка σ) величин практического пробега, рассчитанных с использованием набора тестовых случаев. Величина неопределенности результатов обработки (колонка **Unc**) рассчитана как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению практического пробега.

Таблица 5.2. Средние значения и среднеквадратичное отклонение величин практического пробега, рассчитанных с использованием набора тестовых глубинных распределений дозы электронного излучения

Area	Polinom			Line		
	Av, см.	σ , см.	Unc., %	Av, см.	σ , см.	Unc., %
A1	2.017	0.028	1.40	--	--	--
A2	1.962	0.064	3.27	2.048	0.042	2.02
A3	1.941	0.059	3.04	2.038	0.050	2.43
A4	1.913	0.088	4.59	2.022	0.076	3.74
A5	--	--	--	2.058	0.293	14.25

Как видно из таблицы, среднеквадратичное отклонение величин практического пробега электронов возрастает с уменьшением области обработки данных. Сравнение данных таблицы 5.1 и 5.2 показывает, что средние значения величин практического пробега электронов, получаемые с использованием линейной аппроксимации (колонка Line) и аппроксимации полиномами 4-й степени (колонка Polinom), удовлетворительно согласуются в пределах статистической неопределенности результатов расчета.

Результаты обработки набора тестовых примеров методом параметрической подгонки полуэмпирической модели к глубинным распределениям дозы представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Параметры, полученные методом параметрической подгонки полуэмпирической модели к глубинным распределениям дозы.

	E_1	E_0	dX	R_p
Av-stc	10.11	9.91	- 0.032	2.021
σ	0.089	0.248	0.038	0.021
Unc., %	0.877	2.50	1.54	1.05
Av-ddd	10.11	9.93	- 0.03	2.023
MC	10.10	9.98	- 0.02	2.024

Для каждого тестового случая определялись значения подгоночных параметров:

E_I – энергия электрона при однопараметрической подгонке полуэмпирической модели,

E_0, dX – энергия электрона и смещение начальной точки глубинного распределения дозы при двухпараметрической подгонке полуэмпирической модели. Значение величины практического пробега R_P для каждого тестового случая рассчитывалось по эмпирической формуле, которая приведена в [19]. Рассчитанные с использованием всего набора тестовых случаев средние значения, среднеквадратичные отклонения и статистические неопределенности подгоночных параметров и величин практического пробега представлены в строках с метками **Av-stc**, **σ** и **Unc** соответственно.

Для сравнения, в строке с меткой **Av-ddd** приведены значения подгоночных параметров и величина практического пробега электронов для глубинного распределения дозы, полученного осреднением распределений дозы по набору тестовых случаев. Кроме того, в строке **MC** приведены характеристики глубинного распределения дозы, которое было получено методом Монте-Карло с использованием детальной физической модели с малой статистической погрешностью (<0.05%).

При проведении сравнений неопределенности величины практического пробега, которая рассчитывается различными вычислительными методами, следует учитывать существенное изменение случайной погрешности величины дозы с глубиной (см. рис 5.4). В таблице 5.4, приведены средние значения величины дозы (колонка **D_{Av}**) и случайной погрешности дозы (колонка **Δ_{Av}**) для различных областей **A_i**, которые используются при аппроксимации данных. Коэффициенты η_P распространения случайной погрешности обрабатываемых данных на результаты обработки, которые получены различными методами, представлены в колонках η_P **{Line}** и η_P **{Pol}**.

$$\eta_p(A_i) = \frac{\sigma(A_i)}{R_p(A_i)} \bigg/ \frac{\Delta_{Av}(A_i)}{D_{Av}(A_i)} \quad (5.2)$$

Таблица 5.4. Средние значения величины дозы (D_{Av}) и случайная погрешность дозы (Δ_{Av}) для различных областей A_i , которые используются при аппроксимации данных.

Area	D_{Av} , [kGy]	Δ_{Av} , [kGy]	η_p {Line}	η_p {Pol}
A1	12.27	0.65	--	0.26
A2	11.34	0.73	0.32	0.51
A3	11.34	0.76	0.37	0.45
A4	11.34	0.78	0.55	0.67
A5	11.34	0.84	1.92	--
Atot	15.44	0.58	--	--

Данные для расчета коэффициентов $\eta_p(A_i)$ взяты из таблицы 5.2 (колонки A_v и σ). Для расчета коэффициента $\eta_p(A_{tot})$ – метода параметрической подгонки полуэмпирической модели к глубинным распределениям дозы использованы данные колонки R_p таблицы 5.3, $\eta_p(A_{tot}) \approx 0,28$.

Как следует из данных, приведенных в таблицах 5.2 и 5.3, средние значения величин практического пробега, полученные различными вычислительными методами, удовлетворительно согласуются в пределах среднеквадратичных отклонений. Сравнение значений коэффициентов распространения случайной погрешности обрабатываемых данных на результаты обработки $\eta_p(A_i)$, (см. таблицу 5.4.) со значением коэффициента $\eta_p(A_{tot})$ метода двухпараметрической подгонки полуэмпирической модели позволяет обосновано рекомендовать PFSEM метод для компьютерной дозиметрии электронного излучения в радиационных технологиях.

5.3. Апробация методов численного дифференцирования результатов измерений дозы, выполненных методом дозиметрического клина

В этом подразделе исследования методов численного дифференцирования глубинного распределения дозы электронного излучения продолжается на базе

данных, полученных в специально проведенных экспериментах [19] с использованием стандартного дозиметрического клина. Рассматриваются вычислительные методы определения первой и второй производных распределения дозы по глубине, которые используют подгонку полуэмпирической модели или аппроксимацию полиномом 4-й степени результатов измерений. На основе результатов обработки экспериментальных данных оценивается устойчивость этих вычислительных методов к величине случайной составляющей погрешности обрабатываемых данных.

Определение первой и второй производных распределения дозы по глубине на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели поглощения энергии электронов к результатам измерений проводилось в соответствии с методикой, описанной в [45]. На рисунке 5.6 приведены результаты численного дифференцирования данных о глубинном распределении дозы в стандартном дозиметрическом клине, которые были получены осреднением трех измерений [19], проведенных на радиационно-технологической установке в режиме 1.

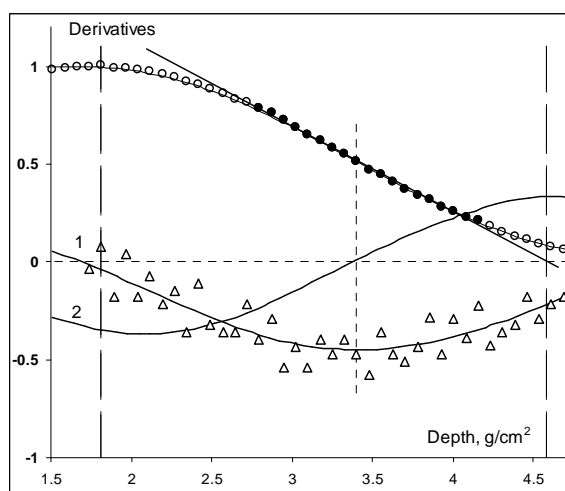


Рис. 5.6. Глубинное распределение дозы, первая и вторая производные распределения дозы по глубине, рассчитанные на основе метода параметрической подгонки полуэмпирической модели к данным измерений.

На рисунке 5.7 приведены результаты расчетов производных для случая одного измерения распределения дозы, проведенного во режиме облучения 2. Пустые кружочки – данные измерений распределения дозы, заполненные

кружочки – выбранные данные для линейной аппроксимации (сплошная прямая), треугольники – результаты численного дифференцирования данных измерений. Сплошные кривые – распределение дозы, первая производная (кривая 1) и вторая производная (кривая 2) распределения дозы по глубине.

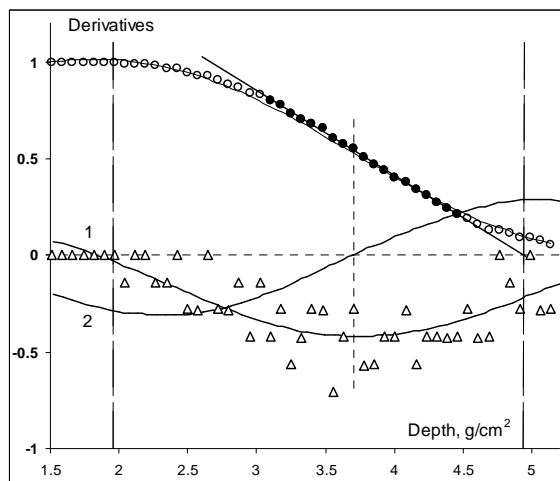


Рис. 5.7. Глубинное распределение дозы, первая и вторая производные распределения дозы по глубине, рассчитанные на основе метода параметрической подгонки полуэмпирической модели к данным измерений.

Как видно из рисунков, метод параметрической подгонки полуэмпирической модели позволяет проводить удовлетворительную оценку производной дозы по глубине для значений случайных составляющих погрешности измерений глубинных распределений дозы, выполняемых стандартными методами в радиационно-технологических (стерилизационных) центрах.

Для проведения аппроксимации с использованием полинома 4-й степени в данных измерений выделяли «широкую» область глубин, где наблюдается спадание величины дозы. Нижней границей области считали глубину расположения максимального значения дозы D_{max} . Если значение D_{max} имеется в наборе глубин, то границей области считается наибольшее значение глубины из этого набора. Верхней границей области глубин полагали величину практического пробега электронов R_p , рассчитанную на основе линейной интерполяции данных в области глубин $0.8 - 0.2 D_{max}$. Процедура определения величины R_p и границы (вертикальные прямые) области глубин выделенной для

обработки данных с использованием аппроксимации полиномом 4-й степени, показаны на рисунке 5.6.

На рисунках 5.8 и 5.9 представлены результаты численного дифференцирования распределений дозы с использованием аппроксимации результатов измерений (рис. 5.6 и 5.7) полиномами 4-й степени в «широкой» области глубин. Кружочки заполненные – выбранные данные измерений для аппроксимации. Кривая, проходящая через заполненные кружочки – аппроксимация данных. Сплошные кривые 1 и 2 – первая и вторая производные дозы, рассчитанные на основе полиномиальной аппроксимации.

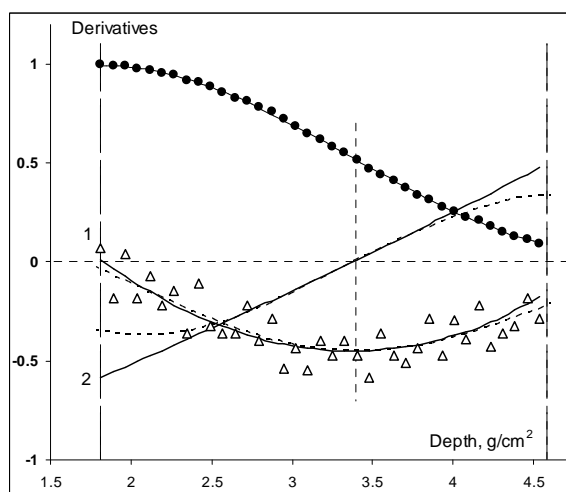


Рис. 5.8. Аппроксимация полиномом 4-й степени результатов измерений, полученных осреднением трех измерений, в «широкой» области глубин.

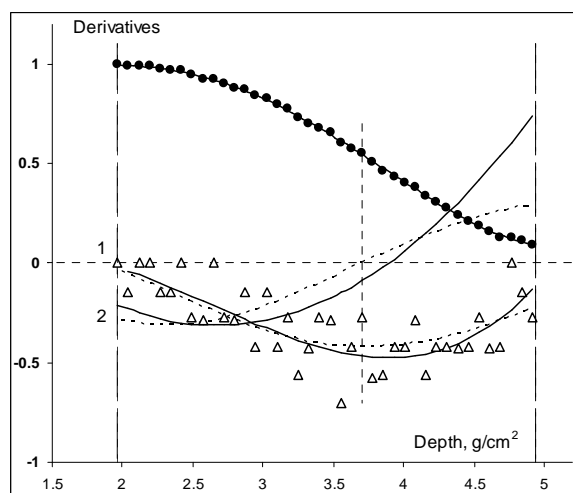


Рис. 5.9. Аппроксимация полиномом 4-й степени результатов, полученных в одном измерении, в «широкой» области глубин.

Проведено численное дифференцирование распределений дозы с использованием аппроксимации результатов измерений (рис.5.6 и 5.7) полиномами 4-й степени в «узкой» области глубин, где наблюдается близкое к линейной зависимости уменьшение глубинного распределения дозы (рис. 5.10 и 5.11). Использовали область глубин от 0.8 до 0.2 D_{max} . Кружочки пустые – результаты измерений, кружочки заполненные – выбранные для аппроксимации данные измерений. Кривая, проходящая через заполненные кружочки – аппроксимация полиномом 4-й степени. Сплошные кривые 1 и 2 – первая и вторая производные дозы, рассчитанные на основе полиномиальной аппроксимации.

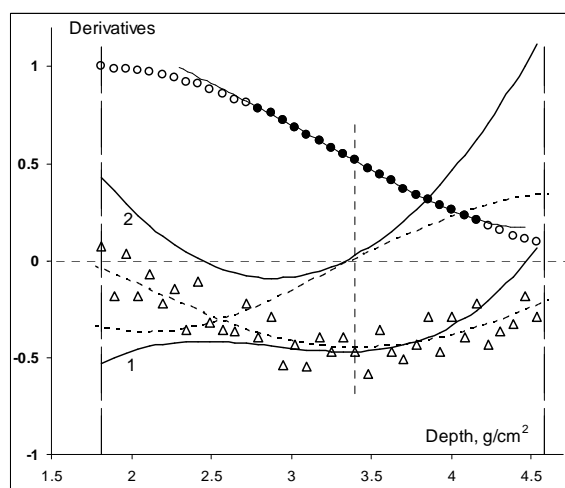


Рис. 5.10. Аппроксимация результатов измерений, полученных осреднением трех измерений, в «узкой» области глубин.

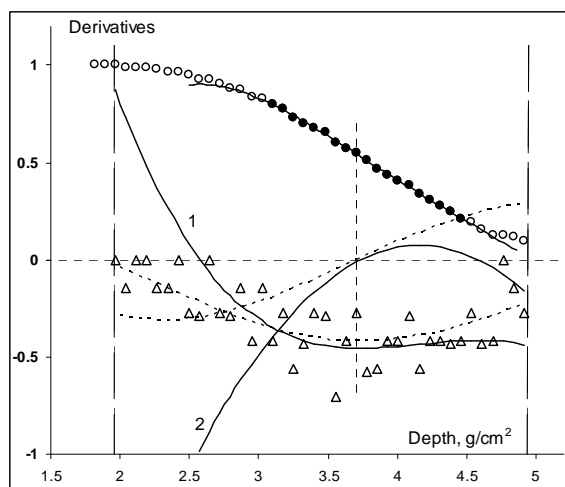


Рис. 5.11. Аппроксимация результатов, полученных в одном измерении, в «узкой» области глубин.

Для сравнения на рисунках пунктирными кривыми показаны первая и вторая производные дозы, рассчитанные на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели. Как видно из рисунков 5.8 и 5.9, производные, рассчитанные на основе метода полиномиальной аппроксимации результатов измерения дозы в «широкой» области глубин, удовлетворительно согласуются с производными, рассчитанными в полуэмпирической модели.

При использовании полиномиальной аппроксимации результатов измерения дозы в «узкой» области глубин производные дозы могут сильно отличаться от производных дозы, рассчитанных в полуэмпирической модели. Как следует из рисунка 5.10 и 5.11, может наблюдаться даже качественное различие в зависимостях производных. Однако, значения производных в точке «перегиба» (вертикальная пунктирная прямая) глубинного распределения дозы близки и, следовательно, величины R_p , рассчитанные с использованием этих методов будут совпадать с хорошей точностью.

5.4. Выводы раздела 5

Предложена и реализована система подготовки, хранения и динамической выборки эталонных данных, которые могут использоваться для статистических оценок неопределенностей различных вычислительных методов обработки результатов измерений.

Проведено сравнение различных вычислительных методов определения практического пробега электронов на основе обработки результатов измерений глубинных распределений дозы электронного излучения. Для этого набор тестовых примеров глубинных распределений дозы был рассчитан методом Монте-Карло в детальной физической модели. Точность вычислительного метода определялась как среднеквадратичная ошибка результатов обработки набора тестовых примеров. Сравнивались точности вычислительных методов обработки результатов измерений, которые отличаются размерами области обрабатываемых данных и видами функций, используемых для аппроксимации этих данных. Результаты сравнения позволяют научно обосновать рекомендацию метода

двухпараметрической подгонки полуэмпирической модели (PFSEM метод) для компьютерной дозиметрии электронного излучения в радиационных технологиях.

На основе сравнения результатов, полученных методом параметрической подгонки полуэмпирической модели и аппроксимации полиномом 4-й степени, в широкой области глубин показано, что эти методы численного дифференцирования распределения дозы устойчивы к величине случайной составляющей погрешности обрабатываемых данных. Этот вывод подтвержден в наборе экспериментальных данных, полученных в радиационно-технологическом центре и подтверждены рекомендации по выбору методов обработки результатов измерений для определения характеристик энергии электронов, сформулированы в работе [47] на основе численных исследований.

Методы полиномиальной аппроксимации результатов измерений в узкой области глубин, где наблюдается линейное спадание глубинного распределения дозы, являются не устойчивыми к случайной составляющей погрешности обрабатываемых данных, что показано на численных примерах. Это означает, что формальное использование полиномиальной аппроксимации результатов измерений для решения класса практических задач численного дифференцирования распределения дозы может приводить к большой неопределенности и погрешности результатов вычислений. В частности, этот вывод относится к предложенному в работе [15] методу определения практического пробега электронов на основе аппроксимации полиномом 4-й степени результатов измерений дозы электронного излучения в области глубин, где наблюдается линейное спадание глубинного распределения дозы. Результаты, полученные в пятом разделе, представлены в работах [49, 50, 55].

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача повышения информативности и точности вычислительных методов дозиметрии электронного излучения за счет использования полуэмпирических моделей процесса формирования распределений дозы электронного излучения.

К числу основных научных результатов относятся следующие:

1. Анализ процесса дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения в радиационных технологиях показал, что погрешности определения характеристик энергии электронного излучения, в основном, зависят от погрешности вычислительного метода аппроксимации результатов измерений распределений дозы и погрешностей эмпирических формул, связывающих характеристики распределений дозы с энергией электронов.
2. Проведена серия компьютерных экспериментов с использованием полуэмпирической модели распределений дозы и получены эмпирические формулы, связывающие стандартные характеристики энергии электронов со стандартными характеристиками распределений дозы.
3. Апробация PFSEM метода дозиметрии, с использованием полученных эмпирических формул, на результатах измерений, выполненных на радиационно-технологических линиях стерилизационного центра, показала, что полуэмпирическая модель позволяет определять значение практического пробега электронов R_p и глубины половинного уменьшения дозы R_{50} с малой относительной погрешностью (<2%).
4. Предложен показатель погрешности эмпирических формул, связывающих характеристики энергии электронов с пространственными характеристиками глубинных распределений доз, и установлены причины различий результатов, полученных с использованием различных формул, приведенных в международных стандартах по дозиметрии электронного излучения.
5. Формализована процедура определения характеристик энергии электронов и установлено, что стандартная процедура определения практического пробега электронов эквивалентна процедуре определения минимального значения

этой величины, что позволяет объяснить систематическое завышение значений практического пробега, полученных с использованием линейной аппроксимации результатов измерений.

6. На базе компьютерных экспериментов с использованием полуэмпирической модели распределений дозы и детальной физической модели прохождения электронов сквозь вещество установлено, что использование полуэмпирической модели позволяет с удовлетворительной точностью аппроксимировать первую производную глубинных распределений дозы электронного излучения.
7. Проведена формализация эмпирических закономерностей формирования глубинных распределений дозы для разных энергий электронов и получены аналитические соотношения, которые позволили разработать метод численного дифференцирования распределений дозы по энергии электронов. На основе этого метода проведены оценки допустимых изменений энергии электронов в процессе облучения.
8. Разработано программное обеспечение хранения и статистической обработки результатов моделирования тестовых примеров измерений, и получен набор измерений, которые проводятся с использованием стандартного дозиметрического оборудования.
9. На наборе тестовых примеров измерений и экспериментальных данных проведено сравнение точности вычислительных методов определения практического пробега электронов, и сформулированы рекомендации по использованию этих методов в дозиметрии электронного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ISO/ASTM Standard 51649, Practice for dosimetry in an e-beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV / Annual Book of ASTM Standards. – Vol. 12. 2005.
2. ICRU REPORT 35. Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 50 MeV. – United State: 1984. – 160 p.
3. ASTM Standard E 1649 – 94, Practice for dosimetry in an e-beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV. / Annual Book of ASTM Standards. – Vol. 12. 1994.
4. ASTM Standard E2322-02 - Standard Guide for Selection and Use of Mathematical Methods for Calculating Absorbed Dose in Radiation Processing Applications, / Annual Book of ASTM Standards 12.2002.
5. ISO 11137-3:2006, Sterilization of health care products – Radiation – Part 3: Guidance on dosimetric aspects. ISO, Case postal 56, CH-1211, Geneva, Switzerland, 2006.
6. “Nuclear Energy Agency, Data Base” The abstracts of the computer programs. <http://www.nea.fr/html/dbprog>.
7. Lazurik V.M. A Database for Electron-Material Interactions / Lazurik V.M., Tabata T., Lazurik V.T. //Radiation Physics and Chemistry. – 2001. – Vol.60. – P. 161-162.
8. Lazurik V.T. Modeling of processes of an irradiation for industrial technologies / Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. //Bulletin of the Kharkiv National University, Series "Mathematical modeling. Information technologies. Automatic control systems". N605, Issue 2, P.72-89, 2003.
9. Lazurik, V.T. Software tools for optimization of industrial EB and X ray processing, / Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. // Proceedings of the 7-th Intern. Conf. on Electron Beam Technologies EBT'03, Varna, Bulgaria (2003) 616-622.

10. Lazurik, V.T. Integration of simulation methods in control system for EB processing / Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. // Proceedings of the PhysCon '03 Conference, Saint Petersburg, Russia, (2003), p. 1003-1008.
11. Lazurik V.T. RT-Office for Optimization of Industrial EB and X-Ray Processing. / Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. // Problems of atomic science and technology. 2004.-N 1. Series: Nuclear Physics Investigation (43), p. 186-189.
12. Lazurik V.T. Simulation methods for quality control of radiation technologies / V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Y.V. Rogov // Proceed of the Coordination Meeting of the TC RER/8/10 project. "Status and prospects of radiation processing in Europe". Warsaw, Poland. IAEA. Vienna 2005, p. 141-156.
13. Lazurik V.T. Integration of computation methods in dosimetry of radiation processing / V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Y.V. Rogov // Problems of atomic science and technol. 2008.- Series: Nuclear Physics Investigation N3(49), p. 201-205.
14. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G., Rogov Yu., Zimek Z. Book «Information System and Software for Quality Control of Radiation Processing» // IAEA: Collaborating Center for Radiation Processing and Industrial Dosimetry, Warsaw, Poland. 2011. 232 P.
15. Lisanti T.F. Calculating electron range values mathematically // Radiation Physics and Chemistry. – 2004. – Vol. 71. – P. 581 –584.
16. Lazurik V.T. Dosimetry of electrons on the base of computer modeling the depth-dose distribution of irradiation / Lazurik V.T., Pochynok A.V. // Journal of Kharkiv University. Mathematical modeling. Information technologies series. – 2010. – No.925. – P.114 – 122.
17. Починок А.В. Моделирование характеристик неопределенности энергии электронного пучка, полученной методом дозиметрического клина /А.В. Починок, Лазурик В.М., Баев А.Ю. // Вестник ХНТУ. – 2010. - №3(39). – С. 386 – 390.

18. Pochynok A.V. The parametric method of the determination of electron energy on the data obtained by the method of a dosimetric wedge / Pochynok A.V., Lazurik V.T., Sarukhanyan G.E.//Bulletin Kherson National Technical University. – 2012. – Vol. 2(45). – P.298-302.
19. Lazurik V.T. Determination of electron beam parameters on radiation-technological facility for simulation of radiation processing /Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G., Zimek, Z //East European Journal of Physics. Vol.1.– 2014.– No.3. – P. 76-81.
20. Lazurik V.M. Energy characteristics in two-parametric model of electron beam / V.M. Lazurik, V.T. Lazurik, G. Popov, Z. Zimek // Bulletin of Kherson National Technical University. – 2015 –Vol. 3(54).– P.397-402.
21. Lazurik V.M. Two-parametric model of electron beam computational dosimetry for radiation processing / V.M. Lazurik, V.T. Lazurik, G. Popov, Z. Zimek // 13th Tihany Symposium on Radiation Chemistry. Balatonalmadi, Hungary. Abstract book. N053. 29.08.-03.09.2015.
22. Lazurik V.M. Two-parametric model of electron beam in computational dosimetry for radiation processing / V.M. Lazurik, V.T. Lazurik, G. Popov, Z. Zimek // Radiation Physics and Chemistry. – 2016. – Vol.124. – P. 230-234.
23. Баев А.Ю. Статистический подход к сравнению методов обработки экспериментальных данных /А.Ю. Баев, В.Т. Лазурик, А.В. Починок //Вестник ХНТУ. – 2010. – вып.3(39). – С. 53–57.
24. Баев А. Ю. Выбор сетки дискретизации распределения поглощенного заряда в задаче восстановления спектра электронов / А.Ю. Баев, В.Т. Лазурик // Вестник ХНТУ. – 2011. – вип. 3 (42). – С. 62–66.
25. Баев А. Ю. Обучение нейронной сети для параметрического восстановления спектра пучка электронов / Баев А. Ю. // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2011. – вип. 13(977). – С. 14–24.

26. Baiev O. Advantages of neural networks for deriving an electrons spectrum from depth-charge curve / Baiev O., Lazurik V. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2011. – вип. 11(165). – С. 228–237.
27. Baiev O. Neural network for reconstruction of the electrons spectrum by measurement of the depth-charge curve / Baiev O., Lazurik V.: // Матеріали конференції «ІКТ в освіті, дослідженнях та індустріальних додатках: інтеграція, гармонізація та трансфер знань». – Херсон, 2011 – С. 28–29.
28. Баев А. Ю. Оптимизация дозиметра для нейросетевого восстановления спектра электронов / А. Ю. Баев, В. Т. Лазурик, А. М. Лях // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики, и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях». – Харьков, 2011. – С.218
29. Baiev O. Advantages of neural networks for deriving an electrons spectrum from depth-charge curve / Baiev O., Lazurik V. // Conference Publications of «IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference». – Valencia, 2011 – P. 1395–1397.
30. Baiev O. Use of Neural Networks for Monitoring Beam Spectrum of Industrial Electron Accelerators / Baiev O., Didenko I., Lazurik V. // Proceedings of ICTERI-2013. CEUR-WS. - vol.1000. – Kherson, 2013. - P. 118-129.
31. Аккерман А.Ф. Решение методом Монте Карло задач переноса быстрых электронов в веществе / Аккерман А.Ф., Никитушев Ю. Н., Ботвин В. А. //Алма-Ата : Наука. -1972.-164с.
32. Аккерман А.Ф. Вторичное электронное излучение из твердых тел под действием гамма-квантов / Аккерман А.Ф., Грудский М.Я., Смирнов В.В. //М.: Энергоатомиздат – 1986 - 168с.
33. Иванов В, И. Дозиметрия ионизирующих излучений / В.И. Иванов // М.: Атомиздат. - 1964,-260с.
34. Кольчужкин А.М. Введение в теорию прохождения частиц через вещество /Кольчужкин А.М. ,Учайкин В.В. // М.: Атомиздат. - 1978. - 203с.

35. Dikiy, N.P. Use of accelerators in geology, medicine, isotopes production and atomic power energetics /Dikiy N.P., Dovbnya, A.N., Skakun, N.A., Uvarov V.L. // Problems of atomic science and technology, Kharkov, 1(37) (2001) P. 26-35.
36. Berger M.I. Monte Carlo calculation of the penetration and diffusion of fast charged particles / Berger M.I. //In. Methods in computational phys. N. Y. -Lond: Acad. Press. – 1963. – P. 135-215.
37. Hableib J.A. ITS Version 3.0, the integrated TIGER series of coupled electron/photon Monte-Carlo transport codes / Hableib J.A., Kensek R.P., Mehlhorn T.A., Valdez G., Seltzer S.M., Berger M.I.// SAND (1992) 91-1634.
38. Mehta Kishor. Radiation Processing Dosimetry / Mehta Kishor. // GEX Corporation. USA – 2006 – 87 p.
39. Miller A. Uncertainty of dose measurement in radiation processing / Miller A. //Radiation Physics and Chemistry., -1996- Vol.47, P. 1243-1246.
40. Mittendorfer J. Monte Carlo methods for process development and control in electron beam technology / Mittendorfer J., Colon M., Gratzl F. // IAEA-TECDOC-1386. Emerging applications of radiation processing (2004) - P. 94-98.
41. Saylor M.C. Application of mathematical modeling technologies to industrial radiation processing / Saylor M.C., Jordan T.M. // Radiation Physics and Chemistry. - 2000 - Vol.57. - P. 697-700.
42. Tabata T. An algorithm for the energy deposition by fast electrons / Tabata T., Ito R. // Nucl. Sci.and Eng. -1974. -V. 53. -N2. - P. 226-239.
43. Weiss D.E. Electron beam process validation for sterilization of complex geometries / Weiss D.E., Cleghorn D.A., Nablo S.V. // Radiation Physics and Chemistry. - 2002 - Vol. 63. – P. 581–586.
44. Lazurik V.T. Determination of the standard characteristics of depth-dose distributions on the base of semiempirical model of electrons energy deposition /V.T. Lazurik, G.F. Popov, Z. Zimek, R.V. Lazurik, Sawan Salah Ibrahim // East European Journal of Physics. – 2015. – Vol.2. – No.4. – P. 45-51.

45. Lazurik V.T. Evaluation of accuracy of the methods for obtaining spatial characteristics of electron radiation depth-dose distribution / V.T. Lazurik, G.F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University, – 2015. – Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems», Issue 28. – P. 126-139.
46. Лазурик В.М. Подготовка эталонных наборов данных для оценки неопределенности методов компьютерной дозиметрии электронного излучения / В.М. Лазурик, Саван Салах, Р.В. Лазурик, А.В. Починок // Системы обработки информации. – 2016. – № 2(139). – С. 35-39.
47. Lazurik V.T. Comparison of the methods of processing the results of depth dose distribution measurements initiated by electron beam / V.T. Lazurik, G.F. Popov, Z. Zimek, R.V. Lazurik, Sawan Salah // Information Processing Systems. – 2016. – № 3(140). – С. 82-87.
48. Lazurik V.T. Methods of calculating the partial derivatives of the electron radiation dose which is measured with dosimetric wedge / V.T. Lazurik, G.F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University, – 2016. – Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems», Issue 30. – P. 59-68.
49. Lazurik V.T. Approbation methods of numerical differentiation the depth dose distribution measured with application dosimetry wedge method / V.T. Lazurik, G.F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // VISNYK of Kherson National Technical University – 2016. – 3(58). – P. 357-360.
50. Лазурик В.М. Программная реализация определения энергии электронов по экспериментальным данным, полученным методом дозиметрического клина / В.М. Лазурик, Ю.А. Шаптала, Салах Саван // ВЕСТНИК Херсонского национального технического университета – 2016. – № 3(58). – С. 245-248.
51. Popov G.F. Dependences between parameters of various models of electron beams / Popov G.F., Salah Sawan, Lazurik R.V // Тези І Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (17–18 трав.2015р.). – Житомир:ЖДТУ,2015 – С. 23-24.

52. Popov G.F. Verification of two-parametric fitting method for determination of electron beam characteristics / Popov G.F., Salah Sawan, Lazurik R.V // *Матеріали та програма науково-технічної конференції «Інформатика, Математика, Автоматика ІМА::2015» (20–25 квітня 2015 р.). – Суми : СДУ, 2015 – С. 203.*
53. Popov G.F. Uncertainty of the methods of numerical differentiation of depth dose distributions of electron radiation / Popov G.F., Sawan S.I., Shaptala Ju.A., Lazurik R.V. // *Тези VIII Міжнародної наук.-техн. конф. «Інформаційно-комп'ютерні технології» (22–23 квітня 2016 р.). – Житомир : ЖДТУ, 2016 – С. 89-90.*
54. Popov G.F. The Use of Semiempirical Models into Computational Dosimetry of Electron Beams / Popov G.F., Sawan S.I., Lazurik R.V., Pochynok A.V.// *Тези Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (11 травня 2016 р.). – Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2016 – С. 65-66.*
55. Lazurik V.T. Estimation of the allowable energy spread of electrons beam in radiation sterilization / Lazurik V.T., Popov G.F., Sawan Salah, Zimek Z. // *Труды международной науч.-техн. конференции «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях». (26–31 травня 2016 р.) — Харьков: ХНУ им. В.Н.Каразина, 2016 — С. 202-205.*
56. Popov G.F. Selection of calculation methods for the analysis of absorbed depth-dose distributions of electron beams / G.F. Popov, S.I. Sawan, R.V. Lazurik, A.V. Pochynok. // *Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні системи і технології» (25–27 травня 2016 р.). – Суми : СДУ, 2016 – С. 19-20.*
57. Machi.S. Role of radiation processing for sustainable development / Machi.S. // *International Atomic Energy Agency, AEA-TECDOC-1386. 2004, P.5-13.*
58. *Radiation processing: Environmental applications, //IAEA-RPEA, Vienna. 2007.*

59. Wood R.J., Pikaev A.K., Applied radiation chemistry: radiation processing /Wood R.J., Pikaev A.K. // A.Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc. New York 1994 535 P.
60. Chmielewski A.G. Industrial Applications of Electron Beam Flue Gas Treatment / Chmielewski A.G., Pawelec A., Tyminski B., Zimek Z., Licki J. // Emerging applications of radiation processing. IAEA-TECDOC-1368. 2004. P.153-161.
61. Scharf W. Particles accelerators – applications in technology and research /Scharf W. // Research Studies Press Ltd., New York. 1989. P.663.
62. Galloway R.A. A new 5 MeV-300 kW Dynamitron for radiation processing /Galloway, R. A., Lisanti, T. F. and Cleland, M. R. // Radiation Physics and Chemistry, Vol. 71, Issues 1-2 (2004) P. 551-553.
63. Ion Beam Application Company. Producer of the Rhodotron EB and X-ray facility. <http://www.iba.com>.
64. Cleland M.R. Industrial Applications of Electron Accelerators / Cleland M.R. //CERN Accelerator School. Zeegse, Netherlands, 24 May to 2 June, 2005, P. 383-416. <http://cds.cern.ch/record/1005393/files/p383.pdf>
65. Marcovic V.M. A new approach to ⁶⁰Co plant design for introduction of radiation sterilization in developing countries. / Marcovic V.M., Eymery, R., Yuan, H.C. // Radiat. Phys. Chem. V.9, 1977, P.625-631.
66. Пикаев А.К. Современная Радиационная Химия. Твердое Тело и Полимеры. Прикладные Аспекты / Пикаев А.К. // М.: Наука, 1987. 448 С.
67. Zyball A. Production and crosslinking of multi-layer tubes (Pe & Metal) by E-Beam / Zyball Alfred. //Radiation Physics and Chemistry, 57, (2000) P.543-547.
68. Chmielewski A. G., Operational Experience of the Industrial Plant for Electron Beam Flue Gas Treatment / Chmielewski, A. G., Licki, J., Pawelec, B., Zimek, Z. // Radiat.Phys. Chem., 71, (2004), P. 441–444.
69. Chmielewski A.G. Practical Applications of Radiation Chemistry. /Chmielewski A.G // Журнал Физической Химии. 2007, Т.81, С. 1672–1676.
70. Radiation synthesis and modification of polymers for biomedical applications. //IAEA-TECDOC-1324. Vienna, Austria, 2002.

71. Zyball A. Radiation processing of polymers. / Zyball A. //Emerging applications of radiation processing. IAEA-TECDOC-1386. (2004) P.117-125.
72. Radiation synthesis of stimuli-responsive membranes, hydrogels and adsorbents for separation purposes. // IAEA-TECDOC-1465, Vienna, Austria, 2005.
73. Popov G.F. Radiation Processing in Ukraine / Popov G.F. // IAEA. Status and prospects of radiation processing in Europe. Proceedings of the Coordination Meeting of the RER/8/010 project, INCT, Warsaw, Poland, 2005, P.157-163.
74. Status and Prospects on Radiation Processing in Europe, // TC-Report, IAEA, 2005, Vienna, Austria. 168 P.
75. Chmielewski A.G. IAEA program in the field of radiation technology /Chmielewski A.G., Haji-Saeid M., Shamshad A. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B, 236, 2005, P.38-43.
76. Haji-Saeid M. The Role of IAEA in Coordinating Research and Transferring Technology in Radiation Chemistry and Processing of Polymers / Haji-Saeid M., Sampa M.H., Ramamoorthy N., Guven O., Chmielewski A.G // Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. B, 265, 2007, P.51–57.
77. Gueven O. An overview of current developments in applied radiation chemistry of polymers / Gueven O. // IAEA-TECDOC-1420 (2004), P.33-39.
78. Industrial radiation processing with electron beams and X-rays. //IAEA, Vienna, Austria, 2011, 105 P.
79. Trends in radiation sterilization of health care products // IAEA, Vienna, Austria, 2008, 267 P.
80. Radiation synthesis of stimuli-responsive membranes, hydrogels and adsorbents for separation purposes. //IAEA-TECDOC-1465. Vienna, Austria, 2005.
81. Chmielewski A.G. Progress in radiation processing of polymers. /Chmielewski A.G., Haji-Saeid M. and Ahmed S. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B in publication (2005).
82. Berejka, A.J. Materials used in medical devices. Trends in radiation sterilization of health care products / Berejka A.J., and Kaluska I. // International Atomic Energy Agency, Vienna (2008) 159-174.

83. Popov G. The Use of Electron and X-ray Beams for the Production of Wood-Plastic Composites / Popov G., Deryuga V., Lazurik V., Rudychev V., Zalyubovsky I. // Proceedings: "Technical, Economic and Environmental Advantages of Radiation Processing of Cellulose" IAEA, Consultants Meeting, 17-19 October, 2001, Antalya, Turkey, P.1-23.
84. Carenza M. The use of Radiation Polymerization and Grafting for Biomedical Applications / Carenza M. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry, 39, Issue 6 (1992), P. 485-493.
85. Rosiak J. M. Radiation formation of hydrogels for biomedical applications. /Rosiak J. M. // IAEA-TEC DOC 1324 (2002).
86. Berejka A.J. Electron Beam grafting of polymers. Advances in radiation chemistry of polymers / Berejka A.J. // IAEA-TECDOC-1420 (2004) P. 85-89.
87. Bubley A.B. Launching of four-sided irradiation system of wires, cables and tubing in "RP PodolskCable" / Bubley A.B., Veis, M.E., Kuksanov, N.K. //Voprosy Atomnoy Nauki i Techniki", serias "Technicheskaya physika I avtomatization", vol.58, 2004, P.106-111 (in Russian).
88. Aksamirsky P.V. 4-sided irradiation systems for electron treatment of cable and pipe-like product/Aksamirsky P.V., Kuksanov N.K., Malinin A.B., Nemytov P.I., Salimov, P.A. // Vacuum (N 2-3), 2001, P.257-263.
89. Molin, A.A. Present state of the radiation technologies in the Russian Federation /Molin A.A., Ponomarev V.N., Shinkarev S.M., Kalashnikov V.V. // Short review. Status and prospects of radiation processing in Europe. IAEA, Vienna, 2005, P. 106-115.
90. Cleland M.R. Electron Beam Crosslinking of Wire and Cable Insulation /Cleland M. R. and Galloway R. A. // Technical Information Series TIS 01812. IBA Industrial, Inc., Edgewood, New York, USA. 2009.
91. Salimov R.A. D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications / Salimov R.A., Cherepkov V.G., Golubenko J.I. //Radiation Physics and Chemistry, vol.57, 2000, P. 661-665.

92. Kovacs A. Present Status and Expected Progress in Radiation Processing /Kovacs A., Miller A. // IAEA-TECDOC-1386. 2004. P.85-93. 2005.
93. Пикаев А.К. Современное состояние радиационных технологий. /А.К. Пикаев. // Успехи химии. 64 (6). 1995, с. 609.
94. Seguchi T. New material synthesis by radiation processing at high temperature – polymer modification with improved irradiation technology / Seguchi T., Yagi T., Ishikawa S., Sano Y. // Rad. Phys. Chem., vol.63, 2002, P.35-40.
95. Алимов А.С. Практическое применение электронных ускорителей /Алимов А.С. // Препринт НИИЯФ МГУ №13/877, 2011. 41 С.
96. Scharf, W. Particles accelerators. Applications in Technology and Research /Scharf, W. // Research Studies Press Ltd. New York, 1989, 663 P.
97. Ауслендер В.Л. Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационно-технологических процессах / Ауслендер В. Л., Безуглов В. В., Брызгин А.А. // Вопросы Атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. 2004. Вып. 58. С. 78–85.
98. Забаев В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности. /Забаев В.Н. // Томск: Изд-во ТПУ, 2008. С.195.
99. IAEA. Trends in radiation sterilization of health care products. // Vienna, Austria, 2008. P.267.
100. Zimek Z. EB Industrial Facility for Radiation Sterilization of Medical Devices /Zimek Z., Walis L., Chmielewski A.G. // Radiation Physics and Chemistry. 1993. Vol. 42. – P.571-572.
101. Chmielewski A.G. Electron accelerators for radiation sterilization /Chmielewski A. G., Sadat T. and Zimek Z. // Trends in radiation sterilization of health care products. IAEA, Vienna, 2008. P. 40-41.
102. Sadat T. A new e-beam application in the pharmaceutical industry / Sadat T. and Malcolm F. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 240, 2005, P.100-104.
103. Dosimetry for radiation processing.//IAEA-TECDOC-1156. 2000, P.132.
104. Kuntz F. Quality assurance in radiation processing. Dosimetry and control

- methods for radiation processing /Kuntz F. // Emerging applications of radiation processing. IAEA-TECDOC-1368. 2004, P.99-104.
105. Miller A. Polystyrene calorimeter for electron beam dose measurements /Miller A. // Radiation Physics and Chemistry. 1995. Vol.46., P.1243–1246.
 106. Miller A. Development of polystyrene calorimeter for application at electron energies down to 1.5 MeV / Miller A., Kovacs A., Kuntz F. // Rad. Phys. Chem., Vol.63, 2002, P.739.
 107. Sharpe P.G. Acidic aqueous dichromate solutions as reference dosimeters in the 10-40 kGy range / Sharpe P.G., Barrett J.J., Berkley A.M. // Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, 36, 1985, P.647.
 108. Kovacs A. Evaluation of irradiated ethanol-monochlorobenzene dosimeters by conductivity method. /Kovacs A., Stenger V., Legeza L. // Proc. Symp, High-Dose Dosimetry. Vienna, 1985, P.135.
 109. Kovacs, A. Oscillometric and conductometric analysis of aqueous and organic dosimeter solutions / Kovacs A., Slezsak V., Mclaughlin W.L., Miller A. //Radiat. Phys. Chem. 46. 1995, P. 1211.
 110. Al-Sheikhly. Radiochromic blue tetrazolium film dosimeter. Techniques for high-dose dosimetry in industry, agriculture and medicine / Al-Sheikhly, Mclaughlin W.L., Kovacs A., // IAEA-Tecdoc-1070, IAEA, Vienna, 1999, 59.
 111. Kovacs A. Application of the Sunna dosimeter film in gamma and electron beam radiation processing / Kovacs A., Mclaughlin W.L., Miller A., Fuochi P.G. //Radiat. Phys. Chem. 57. 2000, P. 691.
 112. Berejka A. J. Polyethylene: a Dosimeter for use with Ionizing Radiation / Berejka A. J., Driscoll M. and Montoney D. // Society of Plastics Engineers International Polyolefins Conference, Houston (February 2009).
 113. ASTM International Standard. Guide for Selection and Calibration of Dosimetry Systems for Radiation Processing, ASTM, ISO/ASTM 51261:2002, Conshohocken, PA (2002).
 114. Burns D.T. High-Dose Calorimetric Standard for Electron Beams / Burns D.T., Morris W.T. // NPL Report RS (EXT) 101, National Physical Laboratory,

- Teddington, UK (1988).
115. Humphreys J.C. Calorimetry of electron beams and the calibration of dosimeters at high doses / Humphreys J.C., Mclaughlin W.L. // *Radiat. Phys. Chem.* 35, 1990. P.744–749.
 116. Cleland M. R. Energy dependence of electron beam penetration, area throughput rates and electron energy utilization in the low-energy region / Cleland M. R., Galloway R.A. and Berejka A.J. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 261 (2007), P.94-97.
 117. Fuochi P. G.. Electron energy device for process control / P. G. Fuochi, M. Lavallo, A. Martelli, U. Corda, A. Kovacs, P. Hargittai, K. Mehta // *Radiation Physics and Chemistry.* – 2003. – Volume 67, Issues 3. – P. 593–598
 118. Fuochi P.G. Energy device for monitoring 4-10 MeV industrial electron accelerators / P.G. Fuochi, M. Lavallo, A. Mastelli, U. Corda, A. Kovacs, P. Hargittai, K. Mehta // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* – 2005. – 546. – P. 385-390
 119. Lavallo M. Energy Monitoring Device for Electron Beam Facilities / M. Lavallo, P.G. Fuochi, A. Martelli, U. Corda, A. Kovacs, K. Mehta, F. Kuntz, S. Plumeri // *International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators.* – Vienna, 2009.
 120. Ванжа С. А. Разработка метода «радиационной тени» для мониторинга режима стерилизации продукции / С. А. Ванжа, В. И. Никифоров, Р. И. Помацалюк, А. Э. Тенишев, В. Л. Уваров, В. А. Шевченко, И. Н. Шляхов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования.* – 2010. – №2(53). С.150-153

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Сравнение методов численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения

Проведена серия компьютерных экспериментов с использованием программного обеспечения RT-Office для оценки возможностей методов численного дифференцирования глубинных распределений дозы электронного излучения. Получены наборы дискретных данных о распределениях дозы, рассчитанные методом Монте-Карло, в детальной физической модели и с использованием полуэмпирической модели поглощения энергии электронов в веществе. Проведены расчеты распределений дозы электронного излучения в мишенях из алюминия, углерода, полистирена и воды при облучении электронами с энергиями 2, 5 и 10 МэВ. Результаты моделирования распределений дозы методом Монте-Карло выполнены с относительной статистической неопределенностью не более 10^{-4} . Результаты компьютерных экспериментов были аппроксимированы методом наименьших квадратов с использованием линейной функции и полиномов 3-й и 4-й степени. Выражения для первой и второй производных от аппроксимирующих функций получены в аналитическом виде.

Результаты расчетов распределения дозы, первой и второй производной распределения дозы электронного излучения, выполненные различными вычислительными методами, показаны на рисунках П1.1 – П1.18.

Маркерами отмечены результаты расчета, полученные на основе моделирования распределений дозы методом Монте-Карло, кружки – значения дозы, ромбы и треугольники – значения первой и второй производной распределения дозы электронного излучения соответственно. Вертикальная пунктирная прямая отмечает точку максимального спада глубинного распределения доз x_p , которая определяется из уравнения $D''(x_p) = 0$. На рисунках приведены полиномы, аппроксимирующие данные, которые были получены методом Монте-Карло.

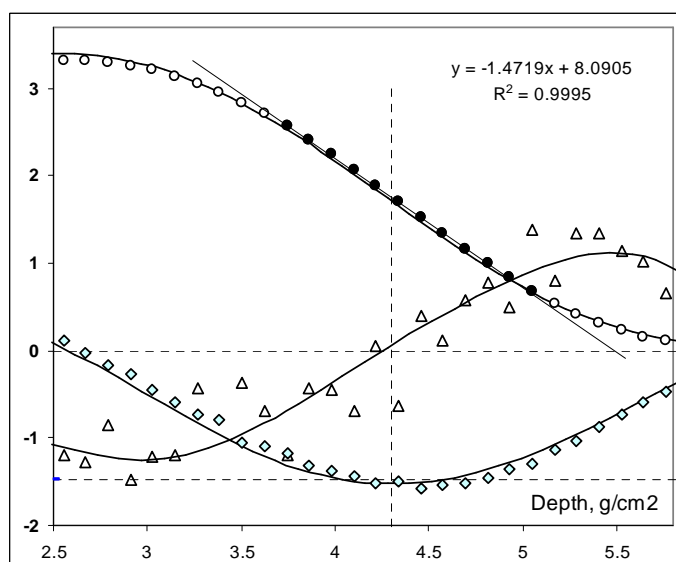


Рис. П1.1. Распределения доз, первая и вторая производная глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

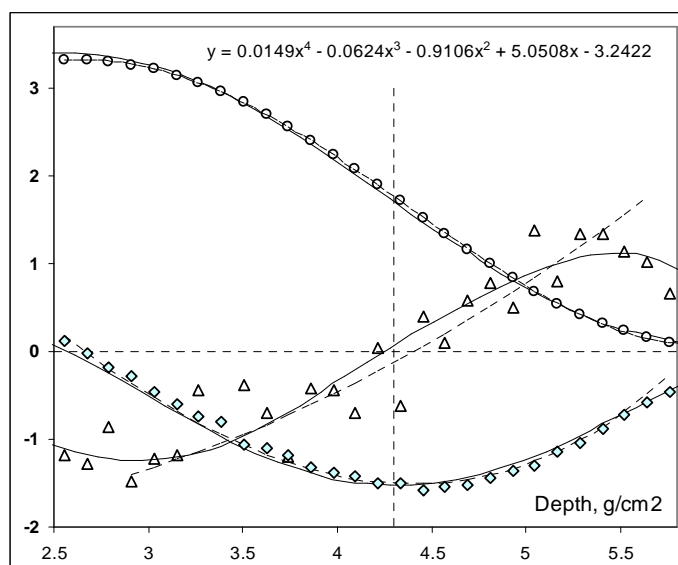


Рис. П1.2. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

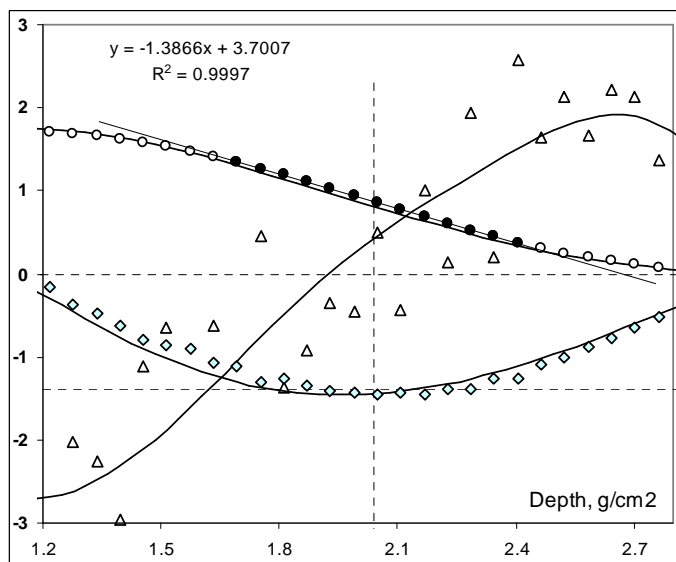


Рис. П1.3. Распределения доз, первая и вторая производная глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

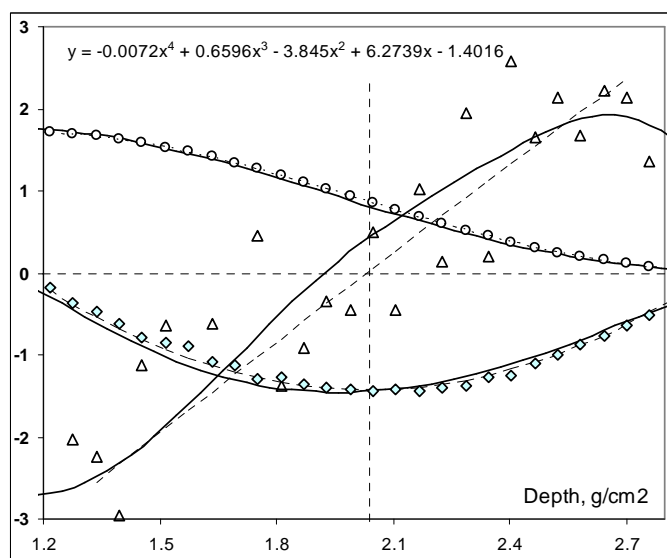


Рис. П1.4. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

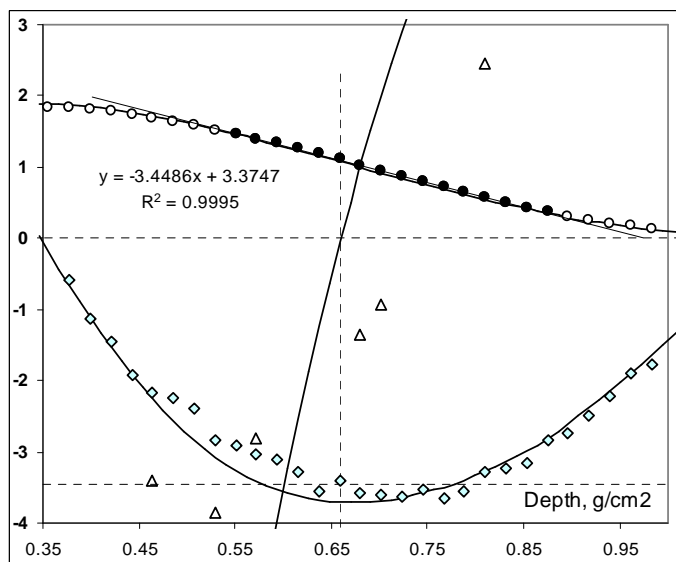


Рис. П1.5. Распределения доз, первая и вторая производная глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 2 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

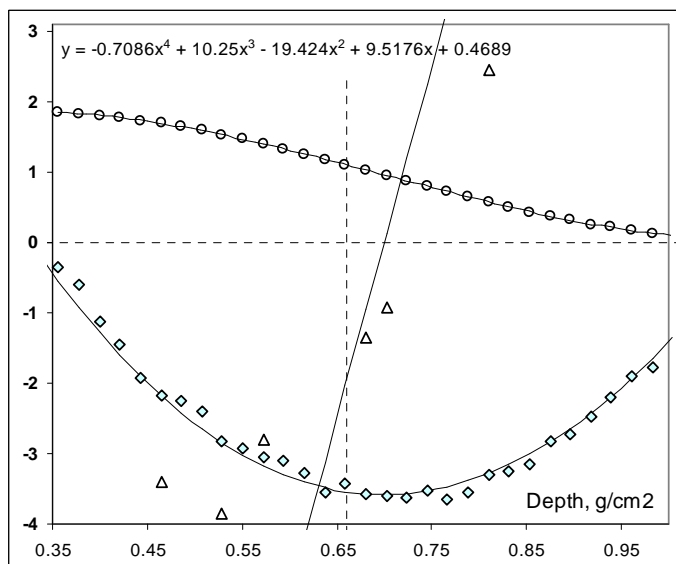


Рис. П1.6. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 2 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

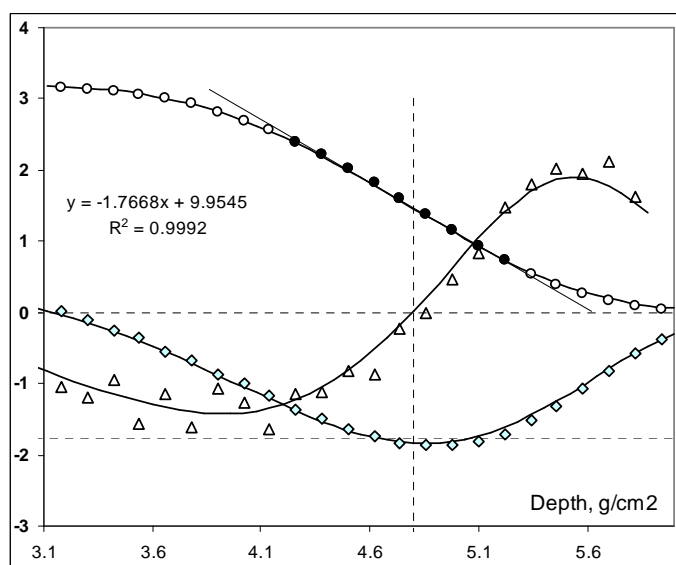


Рис. П1.7. Распределения доз, первая и вторая производная глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

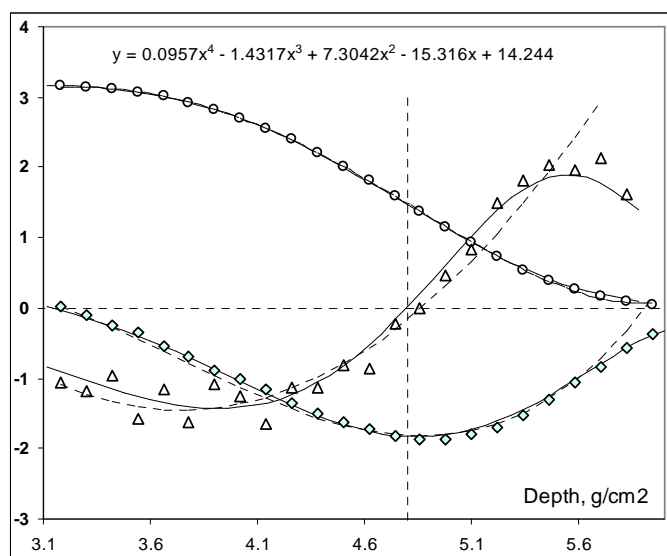


Рис. П1.8. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 4-й степени.

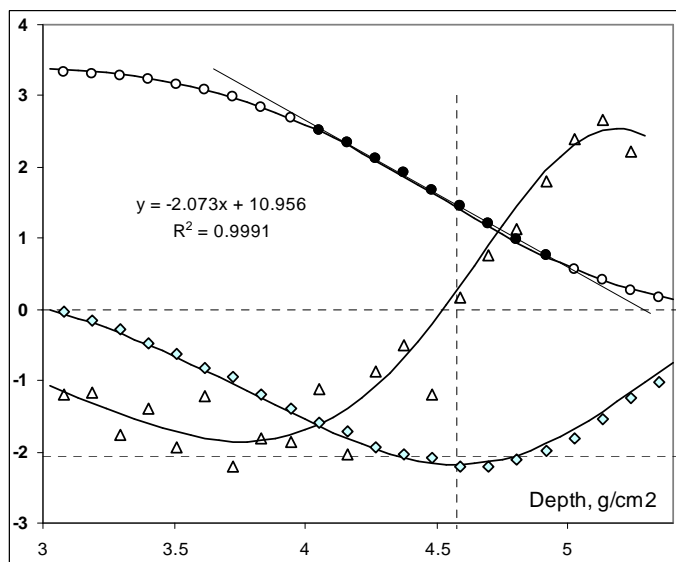


Рис. П1.9. Распределения доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

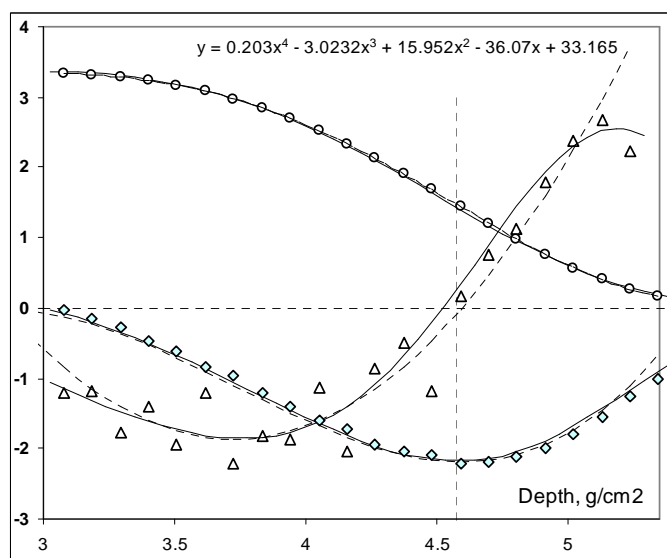


Рис. П1.10. Распределение доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 4-й степени.

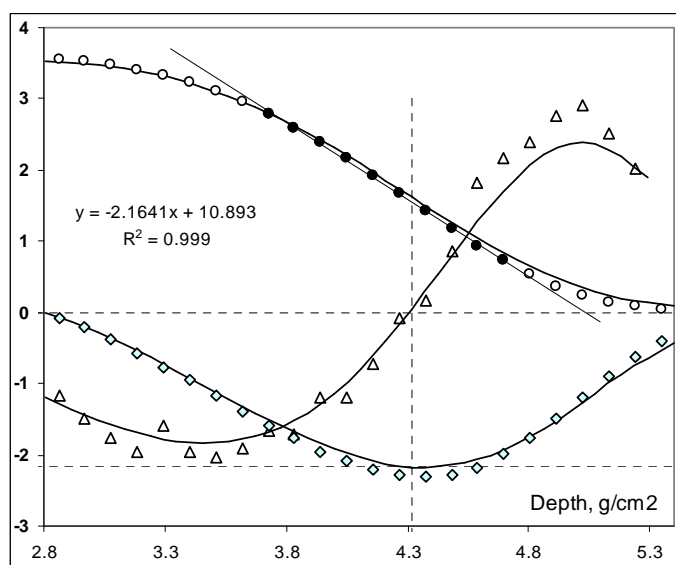


Рис. П1.11. Распределения доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в водяной мишени, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет по полуэмпирической модели распределения дозы, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

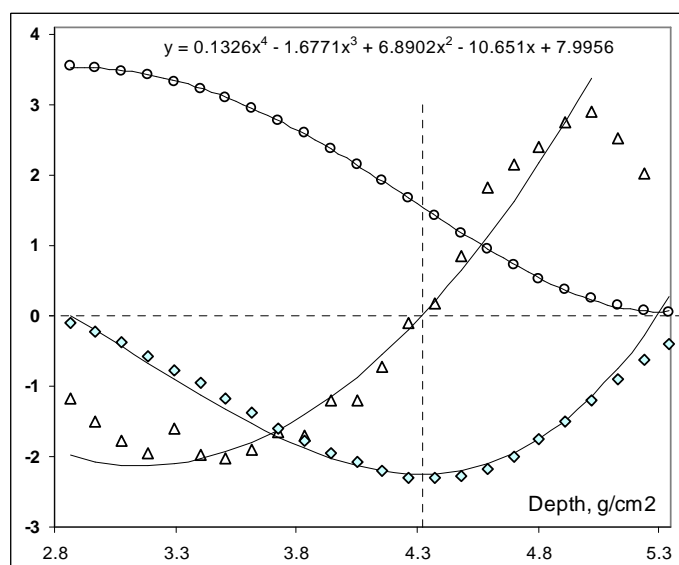


Рис. П1.12. Распределение доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в водяной мишени, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 4-й степени.

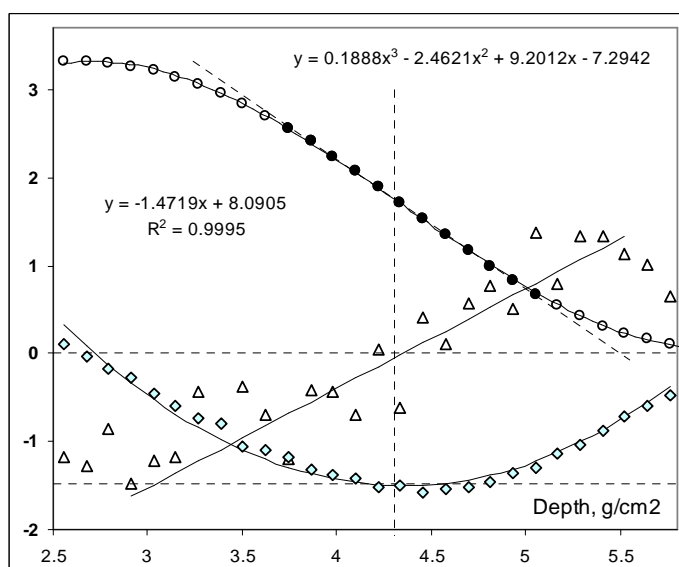


Рис. П1.13. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

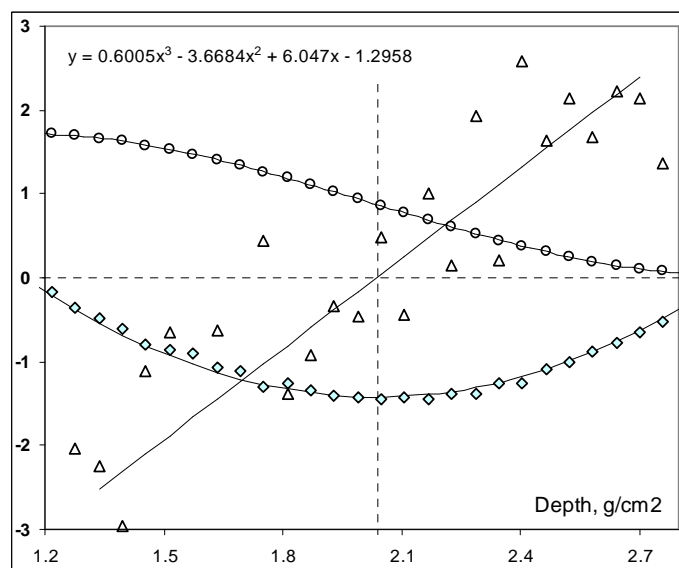


Рис. П1.14. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени.

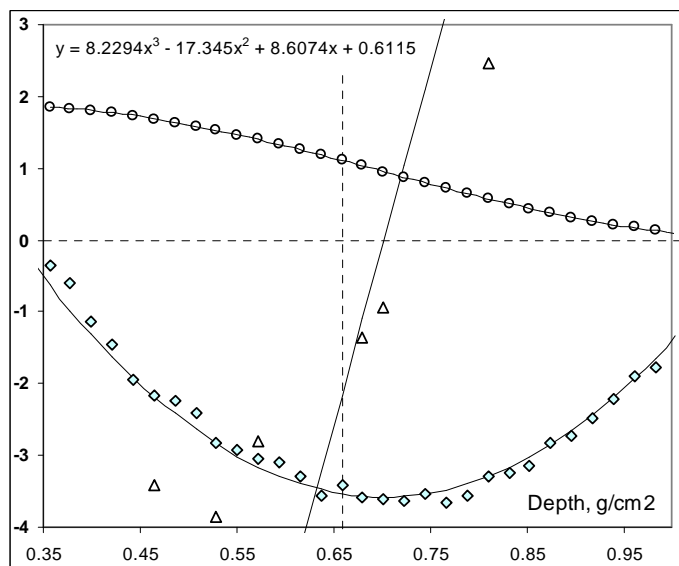


Рис. П1.15. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 2 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени.

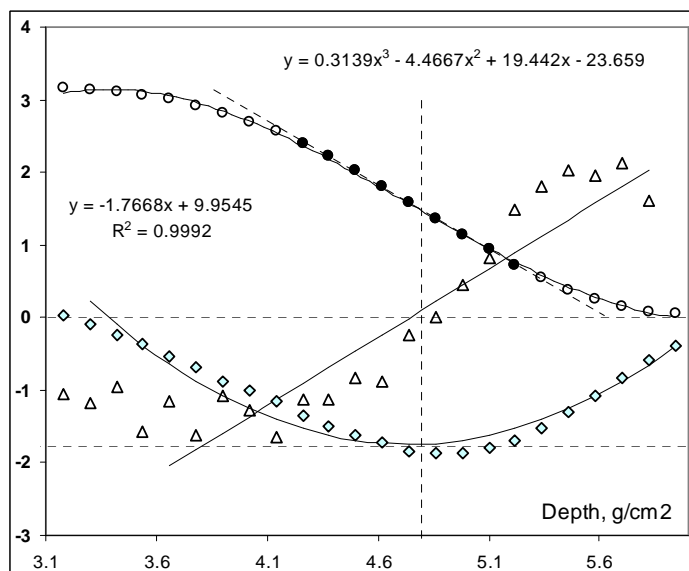


Рис. П1.16. Результаты расчетов распределения доз, первой и второй производной глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномами 3-й степени, пунктирные кривые – расчет на основе линейной аппроксимации данных.

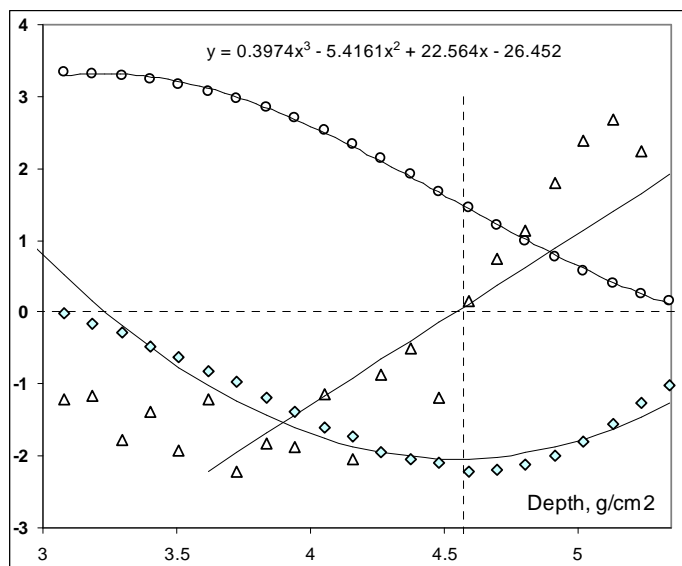


Рис. П1.17. Распределение доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени.

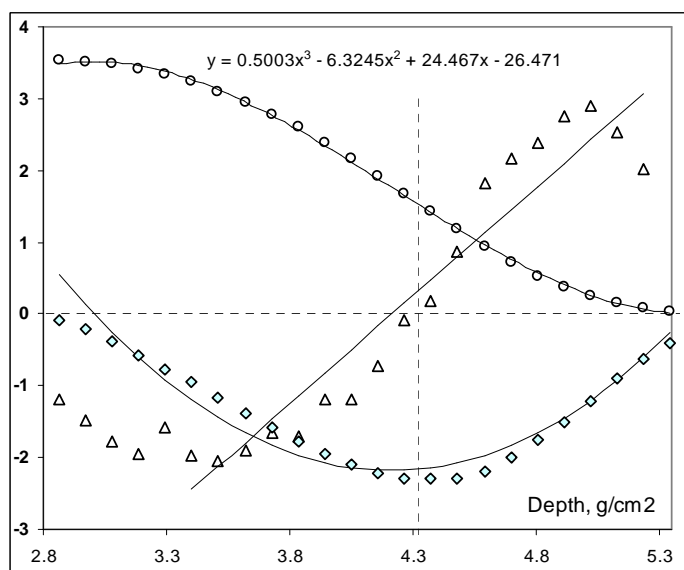


Рис. П1.18. Распределение доз, первая и вторая производные глубинного распределения доз электронного излучения в водяной мишени, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ. Непрерывные кривые – расчет на основе аппроксимации данных полиномом 3-й степени.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Погрешности вычислительных методов определения практического пробега электронов

Для изучения зависимости отклонения величины практического пробега R_p электронов от величины ошибки определения точки перегиба x_p на глубинном распределении дозы $D(x)$, рассмотрена функция $R(x)$

$$R(x) = x - \frac{D(x) - D_{rad}}{D'(x)} \quad (\text{П2.1})$$

где

$D'(x)$ – производная глубинного распределения дозы электронного излучения,

D_{rad} – экстраполированное значение дозы тормозного излучения.

Результаты расчетов зависимостей $R(x)$ с использованием различных вычислительных методов для различных материалов приведены на рисунках П2.1. – П2.6. При проведении расчетов полагали экстраполированное значение дозы тормозного излучения равным нулю. Маркерами отмечены результаты, полученные на основе данных моделирования глубинного распределения доз электронного излучения методом Монте-Карло. Сплошные кривые – расчет с использованием полуэмпирической модели глубинного распределения доз электронного излучения, прерывистые кривые – расчеты на основе аппроксимации полиномом 3-й степени и 4-й степени (пунктирные кривые) данных, полученных методом Монте-Карло. Пунктирные прямые – линейная аппроксимация данных, полученных методом Монте-Карло, в области уменьшения дозы от 0.2 до 0.8 максимума дозы в мишени. Вертикальные пунктирные прямые отмечают точку x_p , определенную с использованием полуэмпирической модели распределения дозы электронного излучения.

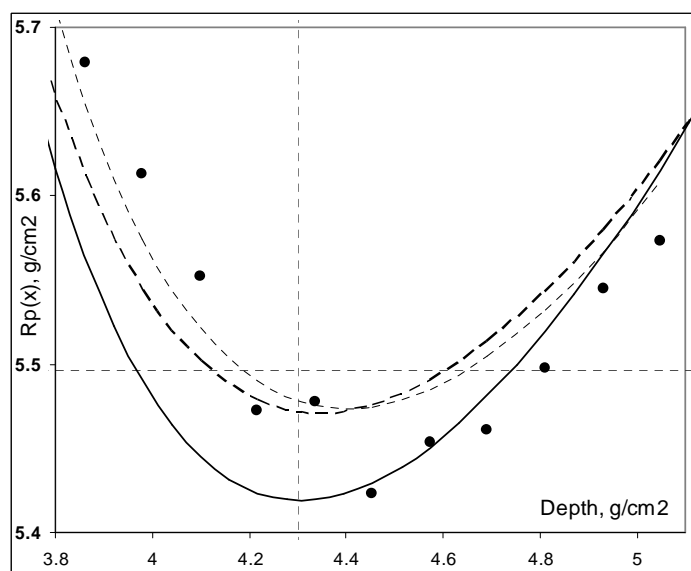


Рис. П2.1. Зависимость $R(x)$ в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

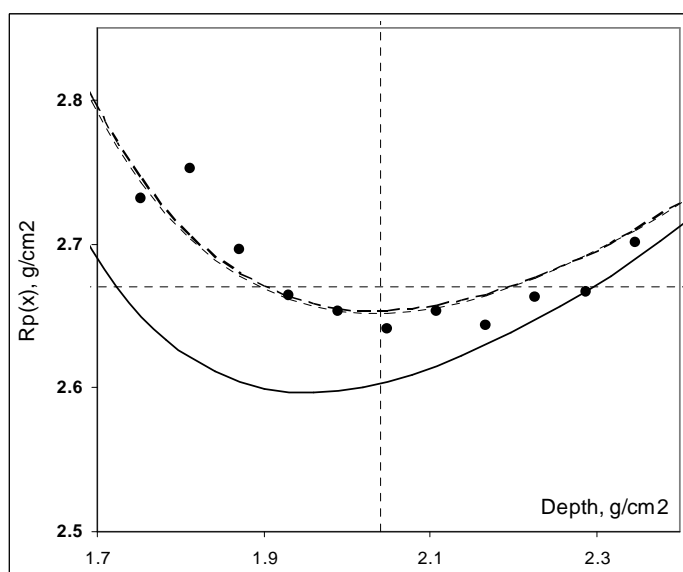


Рис. П2.2. Зависимость $R(x)$ в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 5 МэВ.

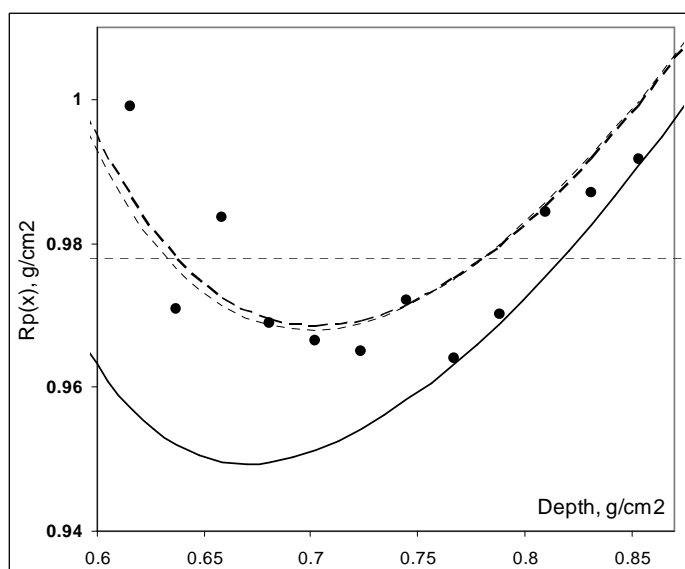


Рис. П2.3. Зависимость $R(x)$ в мишени из алюминия, облучаемой электронами с энергией 2 МэВ.

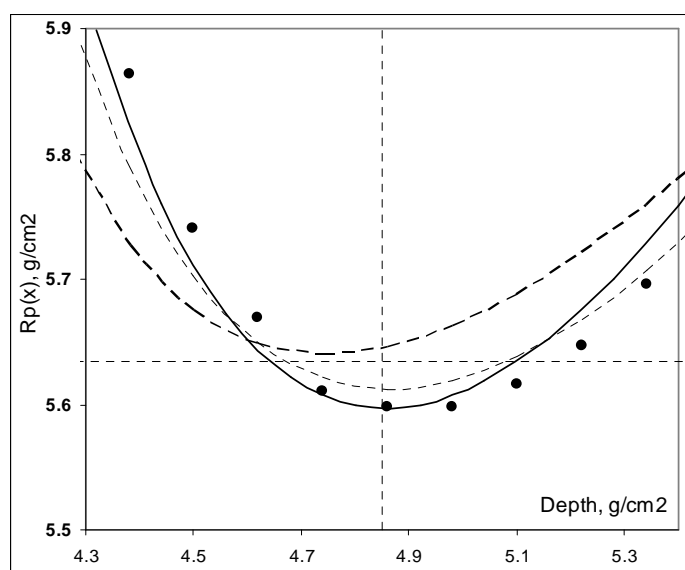


Рис. П2.4. Зависимость $R(x)$ в мишени из углерода, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

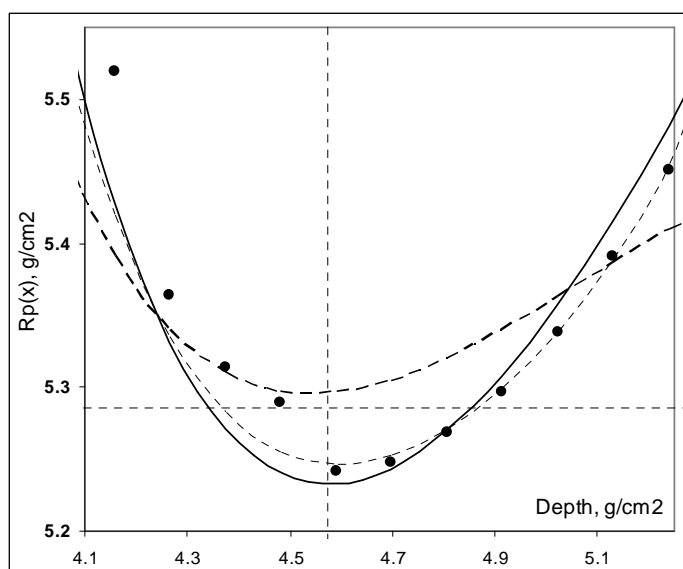


Рис. П2.5. Зависимость $R(x)$ в мишени из полистирена, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.

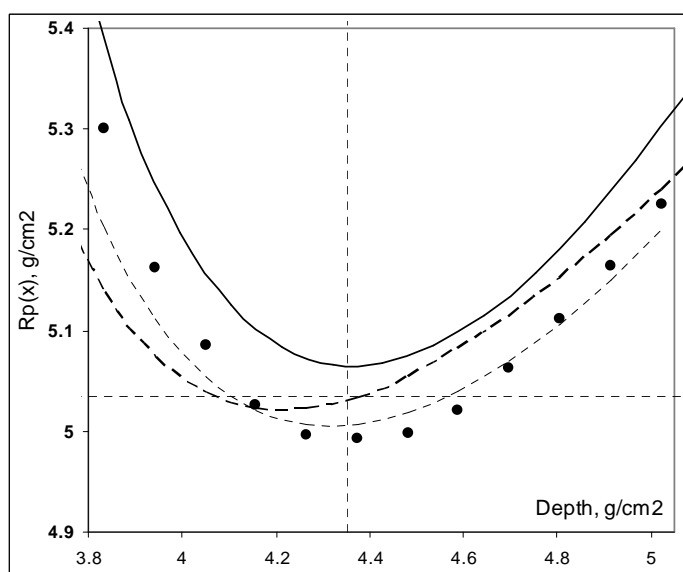


Рис. П2.6. Зависимость $R(x)$ в мишени из воды, облучаемой электронами с энергией 10 МэВ.