

Оценка краевых эффектов в промышленной радиационной обработке на ускорителях электронов

Wednesday 2 July 2025 14:50 (20 minutes)

Радиационная обработка — это технология, использующая ионизирующее излучение (электроны, тормозные фотоны или гамма-излучение радиоактивных источников) для направленного воздействия на различные материалы и продукты. Она применяется в медицине (стерилизация инструментов и оборудования), пищевой промышленности (обеззараживание и продление срока годности продуктов), а также в материаловедении (модификация свойств полимеров и композитов).

Сегодня технология активно развивается в России, из-за чего растет интерес к ней со стороны промышленности, и вместе с ним ширится спектр облучаемых объектов. В связи с этим появляется запрос на точное планирование радиационной обработки: помимо доставки продукту определенной дозы необходимо также обеспечить ее правильное распределение по объему продукции. Недостаточная доза не позволяет достичь желаемого эффекта, тогда как чрезмерная доза может повредить объект, ухудшить его качество или нарушить функциональные свойства. Для медицинских изделий допустима неравномерность дозы в пределах 60% в диапазоне 15-25 кГр. Для пищевых продуктов, обрабатываемых в диапазоне доз 2-2.5 кГр, требуется равномерность не менее 80%. Для простых объектов (аппроксимируемых кубической формой) оценку равномерности можно проводить по глубинному дозовому распределению вдоль центральной оси. Однако для объектов со сложной геометрией (начиная со сферической или цилиндрической) такие оценки могут давать погрешность до 15%.

Альтернативой, обеспечивающей более высокую точность, является компьютерное моделирование, которое, однако, требует точного знания энергетического спектра излучения. Прямое измерение энергетического спектра представляет значительные технические и экономические трудности, что делает актуальной задачу восстановления энергетического спектра пучка по глубинному дозовому распределению.

В данной работе предложен трехэтапный метод реконструкции энергетического спектра ускорителя на основе распределений глубинных доз:

1. На первом этапе учитывается влияние тормозного излучения, генерируемого при взаимодействии электронов с конструктивными элементами радиационной установки.
2. На втором этапе по глубинному дозовому распределению в области спада происходит восстановление сингулярной компоненты энергетического спектра у поверхности облучаемого объекта в виде свертки энергетического спектра электронов, покидающих ускоритель, и распределения Ландау.
3. На третьем этапе происходит восстановление низкоэнергетической компоненты спектра по остаточному дозовому распределению $D_{res} = D_{exp} - D_{brem} - D_{sing}$, где D_{exp} - экспериментально измеренное дозовое распределение, D_{brem} - доза «фотонного загрязнения», D_{sing} - дозовое распределение от сингулярной компоненты спектра.

Метод был протестирован на промышленных электронных ускорителях с энергиями до 10 МэВ и медицинских ускорителях с энергиями до 20 МэВ. Распределения глубинных доз, рассчитанные с использованием восстановленных спектров, отклонялись от экспериментально измеренных данных не более чем на 1%. Устойчивость метода подтверждена введением искусственного шума до 25% во входные данные, что не привело к значительному ухудшению точности восстановления спектра.

Таким образом, предложенный метод демонстрирует высокую точность и устойчивость при реконструкции энергетических спектров электронных ускорителей. Его применение позволяет улучшить контроль равномерности доз при радиационной обработке объектов сложной формы, что позволит повысить качество и безопасность пищевых продуктов и медицинских изделий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-63-00075).

Primary authors: ЗОЛОТОВ, Сергей (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова); БЛИЗНЮК, Ульяна (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

Co-authors: СТУДЕНИКИН, Феликс (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова); НИКИТЧЕНКО, Александр (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова); ЧЕРНЯЕВ, Александр (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова); ЛОГИНОВА, Анна (НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева); АНТИПИНА, Наталья (НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко)

Presenter: ЗОЛОТОВ, Сергей (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

Session Classification: 3. Modern methods and technologies of nuclear physics

Track Classification: Section 3. Modern methods and technologies of nuclear physics.