

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.15 УДК: 621.3.038.624, 537.531.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЕ С ЦИКЛОТРОННЫМ РЕЗОНАНСОМ

Г.М. Казарян, В.Л. Саввин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр.2, физический факультет

Статья поступила в редакцию 20 марта 2025 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается конфигурация и технические характеристики мишени ускорителя для генерации тормозного рентгеновского излучения. В качестве ускорителя электронов предлагается использовать электровакуумный источник с циклотронным резонансом компактный, предложенный, авторами этой статьи, способный генерировать рентгеновское излучение с такой же интенсивностью, как и традиционные источники. Проведенное численное моделирование процессов генерации тормозного излучения позволяют произвести оптимизацию конфигурации мишени эффективности источника тормозного С целью повышения излучения. На основе полученных результатов моделирования рассчитана диаграмма направленности тормозного излучения, проведена визуализация распределения и послойного поглощения тормозного излучения.

Ключевые слова: тормозное излучение, ускоритель электронов, мишень.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автор для переписки: Казарян Гоар Мартиросовна, kazaryan@physics.msu.ru

Введение

В последнее десятилетие все больше ускорителей применяется в обработки промышленности для И стерилизации продукции. Особое место занимают ускорители для обработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания [1-2]. Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства в России на 2017-2025 годы предусмотрено внедрение конкурентоспособных отечественных технологий создание и переработки сельскохозяйственной продукции. К таким технологиям относится радиационная обработка продуктов питания. Она не изменяет биохимический состав пищи, является менее энергозатратной по сравнению методами тепловой стерилизации и консервирования, а также значительно продлевает сроки хранения пищевой продукции. Ежегодно в мире с помощью радиационных технологий обрабатывается около 1,3 млн т сельскохозяйственной и пищевой продукции.

Заметим, что всемирная организация здравоохранения, продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций, международное агентство по атомной энергии одобрили обработку пищевой продукции ускоренными электронами. Больше шестидесяти стран приняли стандарты по радиационной обработке продуктов питания. В России действует ГОСТ ISO 14470-2014 (Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.)

Перспективы развития таких технологий напрямую зависят от внедрения в производство мощных и современных радиационных установок с использованием тормозного рентгеновского и электронно-лучевого излучения. Однако наряду с развитием централизованных радиационных комплексов с энергией до 10 МэВ растущий интерес вызывают мобильные радиационные комплексы с энергией 250-300 КэВ, заметно упрощающие логистику обрабатываемой продукции. Применение сильноточных ускорителей с циклотронным резонансом весьма перспективно для таких комплексов.

Изучение процессов генерации тормозного излучения и оптимизация мишени являются важными вопросами для разработки ускорителя с циклотронным резонансом.

1. Ускоритель электронов с циклотронным резонансом

В традиционных источниках рентгеновского излучения, таких как рентгеновские трубки с энергией от 50 до 150 КэВ, электроны ускоряются стационарным электрическим полем до столкновения с термостойкой мишенью. Однако рентгеновские трубки требуют высоковольтных источников питания. Для снижения напряжения питания часто используется высокочастотный метод ускорения электронов. В промышленных ускорителях электронов, применяемых для радиационной обработки материалов, ускорение электронов происходит помощью резонансных структур с продольным с высокочастотным электрическим полем. При использовании подобных структур возникают ограничения, связанные с нелинейностью сил пространственного заряда, приводящей к проблемам захвата и удержания электронов в ускоряющих фазах продольного электрического поля электромагнитной волны. Это влечет за собой необходимость уменьшения плотности пространственного заряда и, соответственно, тока электронного пучка – до сотых долей ампера.

В устройствах с циклотронным резонансом электронный пучок взаимодействует с поперечным высокочастотным электрическим полем резонатора без формирования сгустков электронов [3-5]. Пучок остается непрерывным, но приобретает спиралевидную форму. Плотность заряда пучка при этом не изменяется и остается постоянной, что позволяет увеличить ток пучка в десятки раз.

Схема ускорителя электронов с циклотронным резонансом [6] содержит два последовательно расположенных резонатора с ламелями, область дрейфа с расширяющимся магнитным полем B(z) и мишень для формирования тормозного излучения (рис. 1). Электронный пучок, формируемый электронной пушкой, проходит между ламелями резонаторов, образующими конденсаторные

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №6, 2025

зазоры с поперечным высокочастотным электрическим поле. Внешняя магнитная система обеспечивает циклотронное вращение электронов с частотой, равной частоте высокочастотного поля в резонаторах. В этих условиях энергия источника СВЧ, возбуждающего резонаторы, преобразуется в кинетическую энергию вращательного движения электронного пучка.



Рис. 1. Схема ускорителя с двумя резонаторами.

Для поддержания режима резонанса циклотронного движения электронов с СВЧ полем вдоль длины резонаторов формируется неоднородное статическое магнитное поле, интенсивность которого возрастает вдоль оси резонаторов. Скорость вращения электронов увеличивается в условиях циклотронного резонанса вплоть до их выхода из резонаторов и попадания в область дрейфа с расширяющимся магнитным полем.

Воздействие на пучок радиальных компонент расширяющегося магнитного поля B(z) в области дрейфа приводит к повороту векторов скорости электронов, и вращение электронов преобразуется в их ускоренное поступательное движение в направление мишени.

В результате столкновения ускоренных электронов с мишенью генерируется тормозное рентгеновское излучение, которое возникает за счет перехода электронов с более высокого энергетического уровня на более низкий при их рассеянии на атомных ядрах мишени. Тем самым, энергия ускоренного движения электронов преобразуется в энергию тормозного рентгеновского излучения, которое выводится через вакуумное окно, расположенное в торце или на боковой поверхности ускорителя.

К достоинствам предложенного ускорителя следует отнести:

1) высокое значение непрерывного тока электронного пучка I_0 (0,25-0,5A);

низковольтность источников питания (уровень потенциала инжекции электронного пучка U₀ – 12-17кВ, совместимый с напряжением источника питания магнетрона);

3) высокая энергоемкость резонаторов, позволяющая ввести в электронный поток мощность СВЧ, в 8-10 раз превышающую начальную мощность инжектированного пучка;

4) спиралевидная конфигурация электронного пучка на выходе области дрейфа и расширение его сечения позволяют снизить тепловые нагрузки на поверхности мишени и облегчить отвод тепла.

Таблица 1. Возможные технические характеристики ускорителя электронов с циклотронным авторезонансом.

Энергия, Мэв	0,25-0,3
Режим работы	Непрерывный
Напряжение инжекции, кВ	17
Ток пучка, А	0,25-0,5
Диаметр кольцевого пятна	Не менее 120
на мишени, мм	
Площадь пятна облучения	2400
на расстоянии 1м, см ²	
СВЧ источник	Магнетрон непрерывного
	действия 75кВт, 915МГц

2. Метод моделирования генерации тормозного излучения

Для моделирования процессов генерации тормозного излучения численными методами применялся комплекс программ Geant4 [7-9].

Комплекс программ Geant4 предоставляет полный набор инструментов для всех областей численного моделирования соударения ускоренных частиц с мишенью: задания конфигурации мишени, расчета траекторий электронов и генерируемого излучения, детектирования излучения, запуска и управления событиями, визуализации и пользовательского интерфейса. Междисциплинарный характер инструментария требует, чтобы он предоставлял обширный набор физических процессов для обработки разнообразных взаимодействий частиц с веществом в широком диапазоне энергий. Для многих физических процессов доступен выбор различных моделей.

Geant4 использует передовые методы разработки программного обеспечения и объектно-ориентированные технологии для достижения прозрачности реализации физики и, следовательно, обеспечивает возможность проверки физических результатов.

Блок – схема моделируемого эксперимента изображена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема моделируемого эксперимента: 1 – корпус медной трубки дрейфа, 2 – пучок электронов, 3 – вольфрамовая мишень, 4 – тормозное излучение, 5 – детектор, 6 – облучаемое тело.

Отметим наиболее важные моменты численного моделирования.

- Ускоренный спиралевидный пучок электронов (2) движется поступательно внутри медной трубки (1), являющейся корпусом ускорителя. Область соударения электронов с мишенью имеет кольцевую форму из-за спиралевидной формы пучка.

- Электроны соударяются с мишенью (3), в результате чего происходит отражение, поглощение и преобразование части энергии электронов в тормозное рентгеновское излучение.

- Получаемые тормозные фотоны (4) вылетают с поверхности мишени и продолжают свое распространение в обозначенную область моделируемого пространства.

 Отцентрированный относительно мишени фиктивный сферический вакуумный объем расположен сразу за мишенью (6), служащий детектором.
При пересечении фотоном этого объема регистрируются координаты и энергия фотона, что необходимо для построения диаграммы направленности излучения.
Данная сфера – детектор не оказывает физического влияния на систему.

- За детектором находится облучаемое тело (фантом) (6), моделируемое как параллелепипед, состоящий из воды. Целью включения облучаемого тела является измерение поглощенных им доз, что необходимо для соблюдения установленных норм при обработке объектов рентгеновским излучением, чтобы предотвратить повреждение их структуры. Выбор материала фантома в виде воды обусловлен близкими физическими свойствами к потенциальным целям будущего радиационного облучения (к примеру, облучение продуктов питания, живых тканей и т.д.).

3. Мишени ускорителя

Интенсивность генерируемого ускорителем тормозного излучения (ТИ) оценивается несколькими факторами: током и энергией пучка электронов, взаимодействующего с мишенью, материалом, структурой и толщиной мишени.

Материал для мишени выбирается как компромисс между доступностью материала, температурой плавления и учетом того, что интенсивность ТИ возрастает квадратично с увеличением заряда ядер вещества. Нужно заметить, что больше 75% энергии электронов при взаимодействии с материалом выделяется в виде тепла и поэтому чаще всего материалами мишени служат теплостойкие материалы вольфрам Z = 74 или тантал Z = 73.

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, elSSN 1684-1719, №6, 2025

Толщину мишени выбирают, учитывая два фактора:

1) вместе с увеличением толщины мишени, увеличивается доля кинетической энергии электронов, которая может преобразоваться в энергию тормозного излучения;

2) увеличение толщины мишени влечет за собой увеличение поглощения ТИ в материале самой мишени. Оптимальная толщина вольфрамовой мишени составляет примерно 1 мм и составляет около 0,3 радиационной длины.

В данной работе рассматриваются две конфигурации торцевой мишени. Первая, более простая, рассматривается как тестовая, на которой отрабатывались все написанные программы, в том числе и для обработки результатов. Вторая мишень отличается более сложной конфигурацией, так как ее конструкция учитывает необходимость отвода тепла системой водяного охлаждения.

4. Двухслойная торцевая мишень

Тестовая торцевая мишень (см. рис. 2) состояла из двух дисков с радиусом 30 мм и толщиной 1 мм каждый, первый – из вольфрама, так как он более тугоплавкий, и второй – из меди. Заданное значение тока пучка – 1А, потенциал пучка – 300 кВ.

Данная схема была воспроизведена в комплексе программ Geant4 для проведения моделирования (рис. 3).



Рис. 3. Смоделированная схема численного эксперимента система в Geant4.

Как и описывалось выше (см. рис. 2), в схеме эксперимента показана трубка дрейфа с ускоренным электронным пучком и детектор – серая полусфера на рис. 3. Красными линиями изображены траектории электронов, образующие кольцевую область соударения с мишенью. Первичные электроны в данной схеме рождаются с энергией 300 кэВ с первоначальным направлением движения вдоль оси z. Желтыми точками слева от мишени показаны электроны, отраженные от мишени.

В качестве облучаемого тела задан параллелепипед, заполненный водой и размерами 100 см на100 см и толщиной 10 см вдоль оси z.

Для данной конфигурации мишени получена диаграмма направленности, изображенная на рисунке 4.



Рис. 4. Диаграмма направленности тормозного рентгеновского излучения в отн. ед..

Видно, что почти вся энергии пучка тормозного излучения приходится на угол примерно от 30 до 150 градусов, с максимумами энергии, приходящимися на угол примерно от 60 до 120 градусов. Что на расстоянии метра от источника излучения дает пучок рентгеновского излучения диаметром в один метр.

Моделирование систем происходило для разного положения облучаемого тела, относительно источника излучения. Ниже приведены результаты для расстояний 70 и 100 см от источника излучения (рис. 5).



Рис. 5. Распределение доз в зависимости от расстояния от источника излучения в Гр. а) 0,7 м, б) 1 м.

Как видно на рис. 5, с увеличением расстояния между облучаемым телом и источником излучения растет площадь пятна засветки. И для расстояния в один метр диаметр пятна засветки действительно составляет порядка одного метра, что согласуется с полученной выше диаграммой направленности.

Рассмотрим подробнее распределение доз по слоям облучаемого тела при расстоянии между облучаемым телом и источником излучения 1м (рис. 6).



Рис. 6. Усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной 1 см (а), усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной по 2мм (б).

Как видно на рисунке 6 а), с увеличением номера слоя средняя доза падает, что говорит об уменьшении количества поглощенной энергии с увеличением глубины слоя. То есть большую часть энергии поглощают первые слои. Рассмотрим также более мелкое разбиение первого сантиметрового слоя. На рисунке бб представлена аналогичная визуализация, но для двух первых сантиметров толщины облучаемого тела.

При разбиении на тонкие слои, толщиной 2мм, энергетические карты уже не столь наглядны. Это связано с ограниченной статистикой, собранной в ходе компьютерного эксперимента, так как в нем обсчитывалось ограниченное число событий. Однако все же количество ярких доменов уменьшается с ростом глубины. То есть большая часть энергии поглощается в первом очень тонком слое.

Как показано на графике для средней дозы по слоям на рис. 6 б, количество поглощенной энергии также падает достаточно быстро Поглощенная доза в слое, толщиной 2 мм, уже на глубине одного сантиметра на 10% меньше, чем в слое толщиной 2 мм у поверхности облучаемого тела. А для слоя на глубине 2 см, поглощенная доза меньше уже на 16%.

Используя полученные значения доз, для данной конфигурации мишени, и стандартизированные нормы обработки продуктов питания мы можем определить временные рамки работы ускорителя, необходимые для облучения.

Так для обработки картофеля, при токе пучка электронов в 1 А и энергии электронов в 300 кэВ, потребуется порядка 200 секунд при расстоянии в 1 м от источника излучения.

Рассмотрим аналогичную конфигурацию эксперимента, но для более близкого расположения облучаемого тела – 70см от источника излучения.

Как следует из результатов моделирования ситуация для такого расположения облучаемого тела аналогична предыдущей. Также с увеличением толщины достаточно быстро падает количество поглощенной энергии. Однако в данной ситуации заметно выросла средняя поглощенная доза (рис. 7).



Рис.7. Усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной 1 см, при расстоянии до облучаемого теля 0,7м.

По сравнению с телом, расположенным на расстоянии одного метра, это значение для первого сантиметрового слоя выросло примерно в два раза. Это связано с тем, что на меньшем расстоянии от мишени, мы имеем меньший эффективный диаметр пучка и тоже количество энергии, что и в первом случае у нас поглощается в меньшем объеме. Для расстояния в 70 см от источника излучения эффективный диаметр составляет примерно 60-70 см. Но, несмотря на это, с увеличением глубины, поглощенная доза по-прежнему падает достаточно быстро и на глубине 10 см доза уже меньше на 50-60%.

Подобная картина распределения дозы облучения по глубине тела наблюдается и для более тонких первых слоев, как видно из рис. 8.



Рис. 8. Усредненные дозы по первым десяти слоям толщиной по 2 мм, при расстоянии до облучаемого теля 0,7м.

Доза в первом слое толщиной 2мм заметно выросла, примерно на 35%. Но все также быстро убывает на 10% для глубины в 1см и на 15% для глубины в 2см, как и для расположения облучаемого тела на расстоянии 1 м.

Так как при уменьшении расстояния поглощаемая доза выросла, то для обработки продуктов питания, с теми же характеристиками пучка электронов потребуется уже около 130 секунд, согласно нормам обработки.

5. Трехслойная торцевая мишень с водяным охлаждением

Рассмотрим конструкцию мишени, учитывающая необходимость охлаждения, поэтому здесь предусмотрено промежуточный слой между двумя медными пластинами, где циркулирует вода (Рис.9).



Рис. 9. Конфигурация второй мишени (а), схема численной модели эксперимента в Geant4 (б).

Конфигурация пучка также задает форму пятна соударения на поверхности мишени в виде кольца. Красными линиями изображена траектория первичных электронов. Электроны в данной схеме, аналогичной схеме на рис. 2, рождаются с энергией 300 кэВ с первоначальным направлением движения вдоль оси z. В качестве облучаемого тела задан параллелепипед, заполненный водой и размерами 100 см на100 см и толщиной 10 см вдоль оси z.

Для данной конфигурации мишени получена диаграмма направленности, изображенная на рис. 10.

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №6, 2025



Рис. 10. Диаграмма направленности тормозного рентгеновского излучения д ля трехслойной мишени, отн. ед..

Видно, что почти вся энергии пучка тормозного излучения приходится на угол примерно от 30° до 150° , с максимумами энергии, приходящимися на угол примерно от 60° до 120° . Это на расстоянии метра от источника дает пучок рентгеновского излучения диаметром в один метр. То есть, внесенные изменения в конструкцию мишени практически не повлияли на распределение энергии тормозного излучения по углам.

Как и для первой конфигурации, моделирование производилось для разных расстояний облучаемого тела от источника излучения. На рис. 11 представлены энергетические карты для расстояний 0,7 и 1м. Как и в первом случае, видно, как меняется эффективный диаметр пучка и как это сказывается на максимальной поглощенной дозе одним доменом.



Рис.11. Распределение доз в зависимости от расстояния 0,7 м и 1 м от источника излучения в Гр.

Рассмотрим подробнее распределение доз по слоям при расстоянии 1 м (рис. 12 а, б).



Рис. 12. Усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной по 1 см (а), усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной по 2 мм (б).

Все наблюдения для первой конфигурации справедливы и для данной системы. Поглощенная доза также падает с ростом глубины слоя на 50% в 10 слое (рис. 12 а), по сравнению с первым моделью. Из отличий можно выделить чуть меньшие значения средней дозы для слоев. Так для первого слоя значение дозы меньше примерно на 10%, по сравнению с первой конфигурацией. Это связано с тем, что в данной системе существуют дополнительные медные проставки, которые необходимы для циркуляции воды и теплоотвода. Кроме того, в самом моделировании учтен слой воды, который также поглощает часть энергии.

Для данной конфигурации так же сохраняются закономерности (рис. 10 б), выделенные для первой схемы и в более тонких слоях. Речь идет о тех же относительных падениях поглощенной дозы – около 10% для глубины в 1 см и около 15-20% на глубине 2 см, с учетом погрешности численного эксперимента и ограниченной статистики.

Рассчитаем примерное время облучения и для данной конфигурации. При том же токе пучка электронов в 1 А и той же энергии электронов в 300 кэВ, необходимое время облучения составит чуть больше 200 секунд.

6. Распределение доз по слоям при расстоянии 70 см.

При приближении облучаемого тела к мишени, закономерности изменения величин с ростом глубины также сохраняются (рис. 13 а, б).



Рис.13. Усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной по 1 см (а), усредненные дозы по первым десяти слоям, толщиной по 2 мм (б) на расстоянии 0,7 м.

На основе полученных диаграмм направленности и энергетических карт для модельного облучаемого тела выявлены оптимальные режимы работы циклотронного ускорителя электронов: для пучка электронов током 1А и энергией 300кэВ при расстоянии 0,7 м облучаемого тела от источника, время облучения составляет 145 секунд при норме облучения 50 Гр.

Заключение

Проведенное численное моделирование процессов генерации тормозного излучения позволяют произвести оптимизацию конфигурации мишени с целью повышения эффективности источника тормозного излучения. На основе полученных результатов моделирования рассчитана диаграмма направленности тормозного излучения, проведена визуализация распределения и послойного поглощения тормозного излучения.

Принцип взаимодействия высокочастотного поля с электронами в условиях циклотронного резонанса дает возможность ускорять весь электронный пучок в целом без образования электронных сгустков. Пучок остается непрерывным,

но приобретает спиралевидную форму. Плотность заряда пучка при этом не изменяется и остается постоянной, что позволяет увеличить ток пучка в десятки раз.

Спиралевидная конфигурация электронного пучка дает возможность расширить результирующую диаграмму направленности тормозного излучения и избежать, тем самым, трудностей сканирования ускоренного пучка по поверхности объекта при использовании линейных ускорителей.

Полученные результаты позволяют оценить параметры и режимы работы циклотронного ускорителя электронов для технологических применений: для пучка электронов с током 1 А и энергией 300 кэВ при расстоянии 0,7 м облучаемого тела от источника излучения при норме облучения 50 Грей необходимое время облучения составит 145 секунд.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

- Robert Baumann, Kirby Kruckmeyer Radiation Handbook for Electronics.- 2019. p.118
- 2. А.П. Черняев. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина/ Москва: Издательство Московского Университета.-2019.-р.231.
- В.А.Ванке, А. А. Зайцев, В. М Лопухин., В.Л. Саввин. К анализу физических процессов в переходной области циклотронного преобразователя энергии// Радиотехника и электроника, 1978, том 23, № 6, с. 1217.
- 4. В.А.Ванке, А.В.Коннов, В.Л Саввин. ЛБВ с циркулярно поляризованным полем// Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 1987, № 4(398), с. 20.
- 5. В.Л.Саввин, Г.М.Казарян, А.В.Коннов, Д.А.Михеев, А.В.Пеклевский Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе // Журнал радиоэлектроники, 2011, №11, с.1.
- 6. В.Л.Саввин, А.В.Коннов, Г.М.Казарян. Источник рентгеновского излучения с циклотронным авторезонансом. Описание патента RU2760284C1.- 2021.

- 7. http://geant4.web.cern.ch официальный сайт разработчиков GEANT.
- J. Allison et al. Recent developments in geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 835:186–225, nov 2016.
- 9. J. Apostolakis. Geometry and physics of the geant4 toolkit for high and medium energy applications. Radiation Physics and Chemistry, 78(10):859–873, oct 2009.

Для цитирования:

Казарян Г.М., Саввин В.Л. Энергетические и угловые характеристики тормозного излучения в ускорителе с циклотронным резонансом. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 6. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.15