



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

Студеникин Феликс Рикардович
м.н.с. лаборатории пучковых технологий и медицинской физики НИИЯФ МГУ

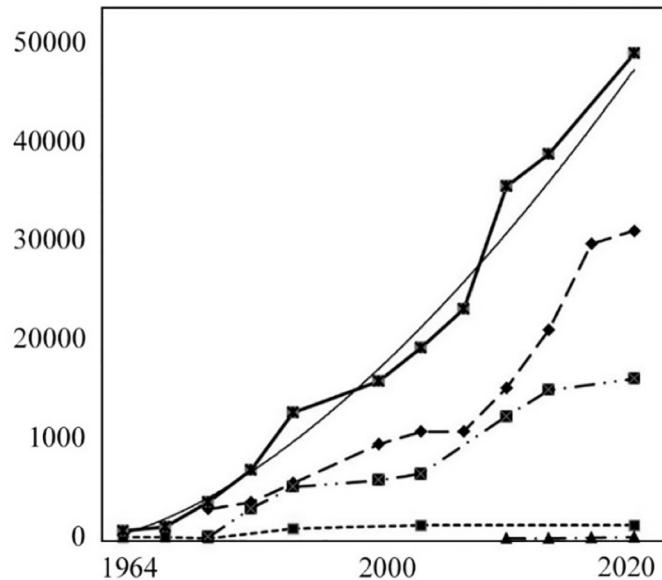
МОДИФИКАЦИЯ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор А.П. Черняев

Ускорители электронов в мире



Динамика роста количества ускорителей в мире:

- суммарное количество;
- промышленность;
- ... медицина;
- - фундаментальные исследования;
- сельское хозяйство.

Всего ~ 43 000 (в мире) /
~ 400 (в России)

Медицина
~ 14 500 (в мире) /
~ 200 (в России)

Наука
~ 1 500 (в мире) /
~ 80 (в России)

Промышленность
~ 27 000 (в мире) /
~ 120 (в России)

Развитие радиационной обработки

Открытие
Вильгельмом
Конрадом Рентгеном
рентгеновского
излучения

Дж. Аплеби и
А. Бэнкс
зарегистрировали в
Великобритании
первый патент на
радиационную
обработку
материалов и
пищевых продуктов

Национальная
комиссия по атомной
энергии США
разворачивает
исследования по
использованию ИИ
для обработки
материалов и
пищевых продуктов

Национальные
исследовательские
программы в СССР,
Канаде,
Великобритании,
Германии, Бельгии,
Франции, Польше,
Нидерландах

Введение
ГОСТ-ов в
РФ и
открытие
первого
промышленного центра



Самуэль Прескотт
впервые описал
бактерицидные
эффекты
ионизирующего
излучения

После вспышек
сальмонеллеза армия
США начала
использовать
радиационную
обработку пайков,
отправляемых в район
боевых действий в
Тихом океане

Впервые в мире
Минздрав СССР
разрешил облучение
картофеля

Было разрешено
облучение ряда
продуктов питания,
материалов и
медицинских
изделий (ISO, ASTM,
МАГАТЭ)

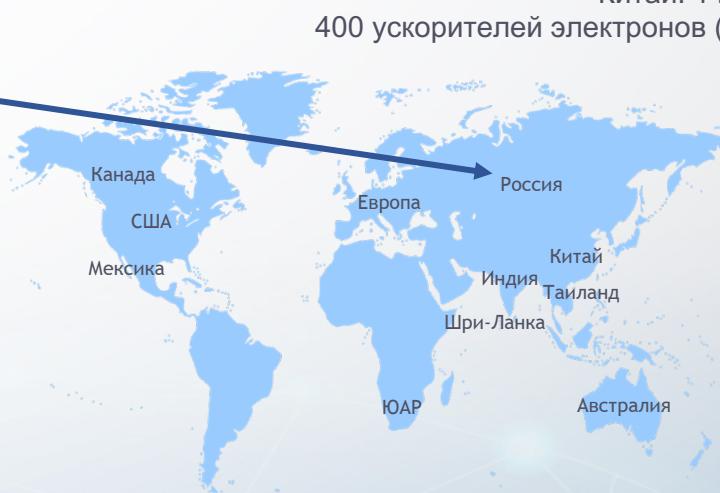
Промышленные центры радиационной обработки

Первый в России промышленный центр антимикробной обработки продуктов питания ускоренными электронами запущен в 2017 году



Потребность РФ - 250 тыс. тонн продукции в год, для этого необходимо построить примерно 20 центров

Страны-лидеры по числу центров антимикробной и фитосанитарной обработки ионизирующим излучением (по данным МАГАТЭ, 2018)



Китай: 140 гамма установок,
400 ускорителей электронов (72 центра -10 МэВ)

США: ~39

Индия: ~9

Германия: ~5

Франция: ~5

ЮАР: ~4

Бразилия: ~3

Индонезия: ~3

Украина: ~3

Мексика: ~2

Чили: ~2

Испания: ~2

Бельгия: ~2

Бангладеш: ~2

Тайланд: ~2

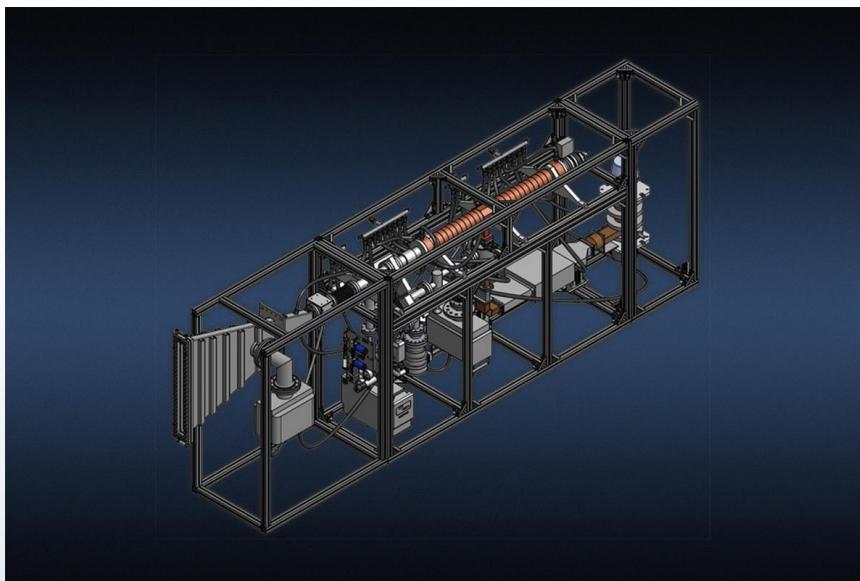
Вьетнам: ~2,

Россия: 6, а также центры в Англии, Японии, Канаде, Аргентине, Уругвае, Малайзии, Корее, Австрии, Австралии, Чехии, Франции, Нидерландах, Польше и др.)

Ускоритель электронов для промышленных центров радиационной обработки РФ

Плотность облучаемых объектов варьируется от 0.3 г/см³ до 1.6 г/см³, атомный номер элементов преимущественно от 1 до 53.

Как правило объекты обрабатываются в коробках или контейнерах, размеры которых меняются от 10 см × 20 см × 30 см до 40 см × 40 см × 80 см.



УЭЛР-10-15-С – ускорители электронов для комплексов стерилизации

Ускорители разработаны, изготовлены и введены в действие сотрудниками ООО «ЛЭУ МГУ», НИИЯФ МГУ и физического факультета МГУ совместно с АО «НПП «Торий».

Основные технические характеристики:

№	Наименование параметра	Значение
1	Энергия электронов, регулируемая, МэВ	от 4 до 10
2	Средняя мощность пучка, кВт	от 1 до 15
3	Полоса сканирования, см	от 40 до 60
4	Неравномерность сканирования, %, не более	5

Радиационная обработка продуктов питания и медицинских изделий

Для радиационной обработки продуктов питания (ISO 14470) и медицинских изделий применяют (ISO 11137):

- Электронное излучение с энергией не более 10 МэВ;
- Тормозное излучение, генерируемое ускорителями с энергией не более 5 МэВ;
- Гамма-излучение ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.27$ года, $E = 1.25$ МэВ) и ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ года, $E = 0.66$ МэВ).

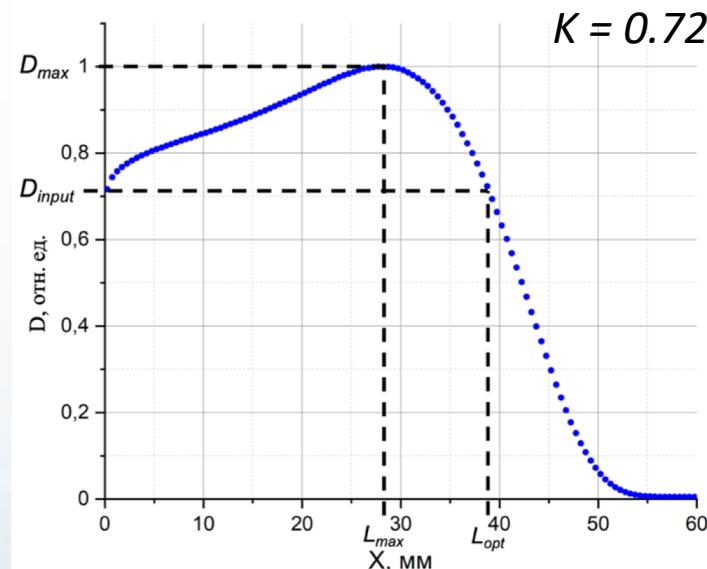
Цели обработки	Доза (кГр)	Объекты обработки
Задержка прорастания	0.05-0.15	Картофель, лук, корнеплоды и тд.
Дезинсекция (уничтожение насекомых)	0.15-0.5	Зерновые, сушёные овощи и фрукты
Замедление процессов созревания	0.5-3.0	Свежие овощи и фрукты
Удлинение сроков хранения	1.0-3.0	Ягоды, фрукты, овощи
Подавление развития патогенных микроорганизмов	1.0-7.0	Свежее сырье, мясо, птица, рыба и полуфабрикаты
Деконтаминация добавок и ингредиентов	10-30	Специи, ферментные препараты и тд.
Радиационная стерилизация	15-30	Медицинские изделия

An Economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food, Rossanna Mentzer Morrison, 1989

С 2015 года научным коллективом кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ проводятся экспериментальные исследования в области обработки продуктов питания и стерилизации медицинских изделий ускоренными электронами и тормозными фотонами различных энергий.

Причины неоднородности распределения дозы по объему облучаемого электронами объекта

- 1) нелинейное распределение дозы по глубине объекта;
- 2) неоднородность плотности и химического состава вещества объекта;
- 3) сложная геометрия объектов облучения;
- 4) неоднородное распределение объектов в упаковке.

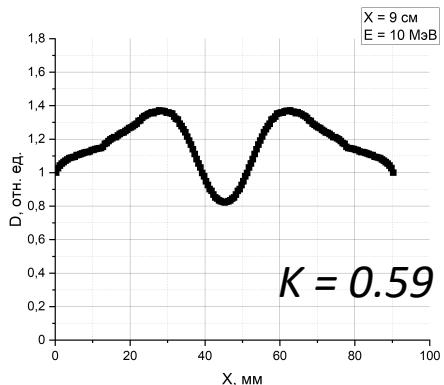
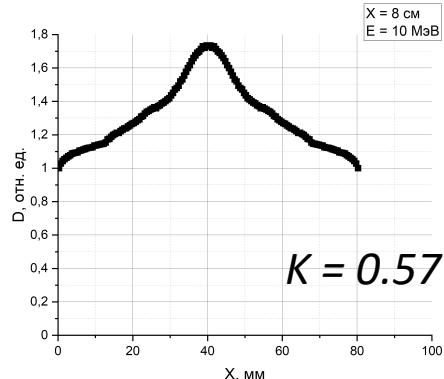


$$K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$$

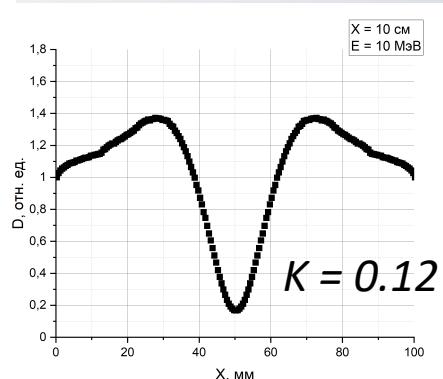
Зависимость поглощенной дозы D от глубины X проникновения электронов с энергией 10 МэВ в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда.

Методы повышения эффективности радиационной обработки в мире

- 1) облучение с двух сторон для возможности облучения объектов большей толщины;
- 2) применение полимерных гранул для увеличения однородности облучения;
- 3) изменение энергии ускоренных электронов при нескольких сеансах облучения для увеличения однородности облучения;
- 4) облучение тормозным излучением для возможности облучения объектов большей толщины.



Зависимость поглощенной дозы D от глубины X проникновения электронов с энергией 10 МэВ в слоях объектов из воды в форме параллелепипеда толщинами 8 см, 9 см и 10 см при облучении с двух сторон.



Цель и задачи

Цель работы:

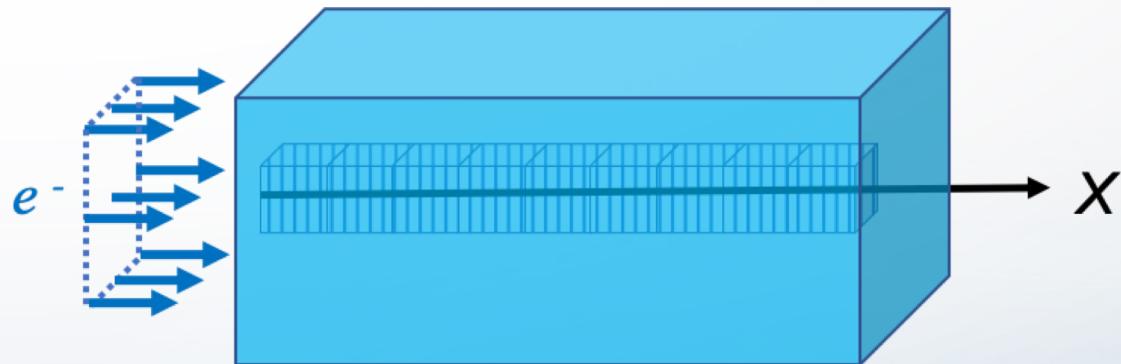
Разработка метода модификации спектра пучка электронов для увеличения однородности распределения дозы по объему облучаемого объекта при радиационной обработке.

Задачи:

1. Провести компьютерное моделирование и исследовать зависимости параметров K , L_{max} и L_{opt} в объектах в форме параллелепипеда от их линейных размеров, плотности и энергии пучков электронов.
2. Разработать методику применения алюминиевых пластин-модификаторов для увеличения однородности дозовых распределений по объему облучаемого электронами объекта.
3. Провести исследование влияния алюминиевых пластин-модификаторов на энергетический спектр пучков электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.
4. Провести экспериментальную проверку возможности использования алюминиевых пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта при обработке ускоренными электронами.

Численный эксперимент

Моделирование обработки объектов пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ

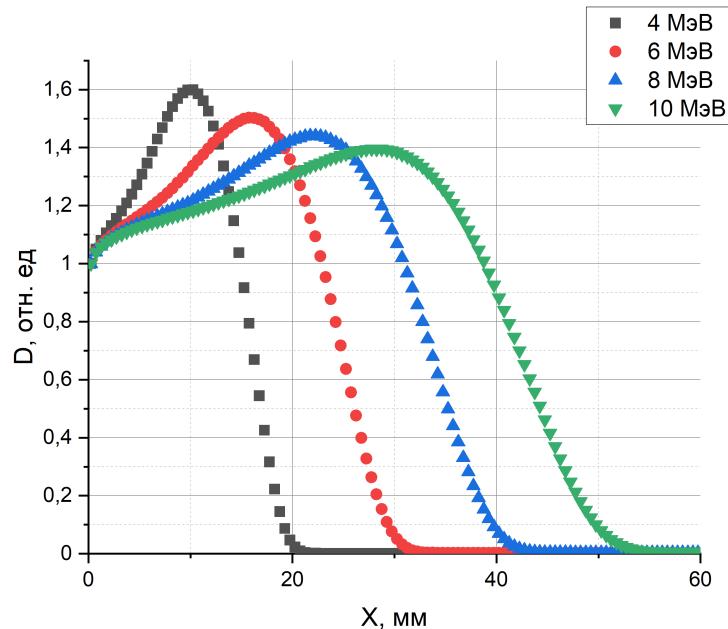


Параметры моделирования:

- размер параллелепипеда составлял $40 \text{ см} \times 40 \text{ см} \times 80 \text{ см}$, плотность вещества варьировалась от $0.3 \text{ г}/\text{см}^3$ до $1.6 \text{ г}/\text{см}^3$ с шагом $0.1 \text{ г}/\text{см}^3$;
- пучок электронов размером $20 \text{ см} \times 20 \text{ см}$, энергия варьировалась от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ;
- для расчетов распределений поглощенной дозы по глубине вдоль оси X параллелепипед разбивался на ячейки с размерами $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 0.5 \text{ мм}$, в которых фиксировалась поглощенная энергия.

Результаты моделирования

Глубинные дозовые распределения при облучении объектов



Зависимость поглощенной дозы D в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда размером 40 мм × 40 мм × 80 мм от глубины X при обработке электронами с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ.

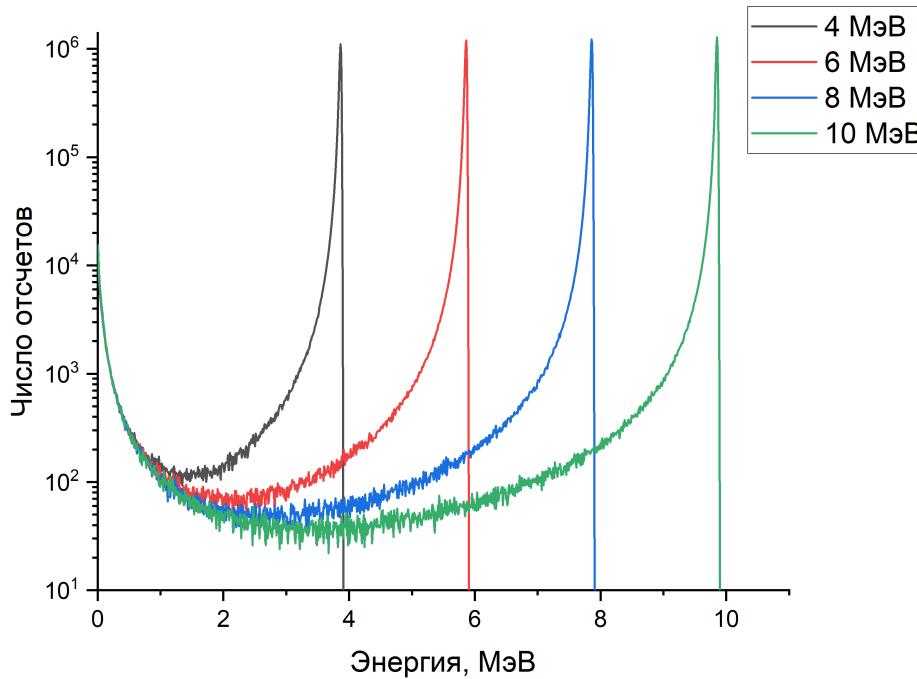
Поверхностная доза слабо зависит от энергии электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ, в то время как максимум дозового распределения смещается вглубь с ростом энергии электронов, одновременно уменьшаясь по величине, что приводит к увеличению коэффициента K .

При увеличении энергии электронов от 4 МэВ до 10 МэВ значения L_{max} возрастают от 10.25 мм до 27.5 мм, а значения L_{opt} увеличиваются с 15 мм до 38.75 мм.

Таким образом, для объекта заданной плотности, варьируя энергию пучка, можно изменять значение коэффициента K .

Результаты моделирования

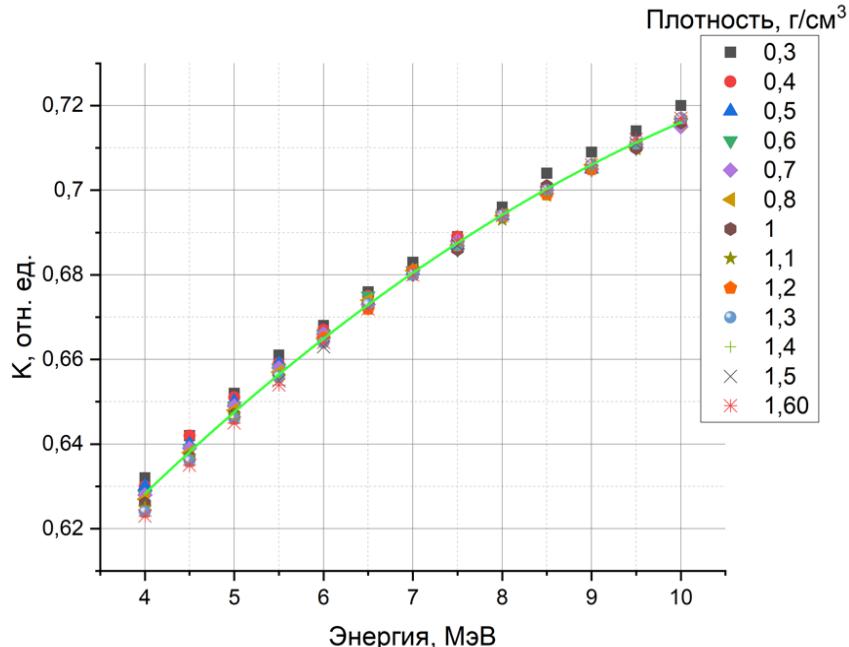
Спектры пучков электронов при облучении объектов



Спектры энергии электронов в пучках с начальной энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ после прохождения через воздух.

Результаты моделирования

Зависимость значения К от начальной энергии пучков электронов



Зависимость значений коэффициента K от энергии E ускоренных электронов для объекта в форме параллелепипеда с плотностью от 0,3 г/см³ до 1,6 г/см³.

Значение коэффициента однородности облучения K в диапазоне энергий от 4 МэВ до 10 МэВ варьируется от 0,62 до 0,72 и практически не зависит от плотности облучаемого объекта в форме параллелепипеда в диапазоне плотностей от 0,3 г/см³ до 1,6 г/см³.

Зависимость коэффициента K от энергии можно интерполировать функцией вида

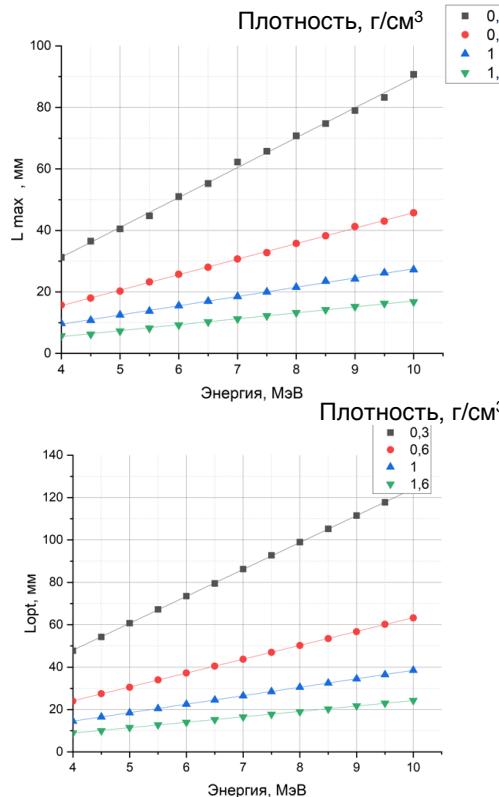
$$y = a + b x - c x^2$$

с максимальной погрешностью интерполяции не более 1%.

За пределами рассматриваемого диапазона плотностей характер зависимости может сильно отличаться.

Результаты моделирования

Зависимость значений L_{max} и L_{opt} от начальной энергии пучков электронов



Зависимость значений L_{max} и L_{opt} от энергии ускоренных электронов для объекта в форме параллелепипеда с плотностью 0.3 г/см³, 0.6 г/см³, 1 г/см³, 1.6 г/см³

Чем выше энергия ускоренных электронов, тем больше значения L_{max} и L_{opt} , т.е. при больших энергиях можно обеспечить однородность облучения для обрабатываемого объекта большей толщины.

При этом, чем ниже плотность облучаемого объекта, тем большая скорость роста величин L_{max} и L_{opt} .

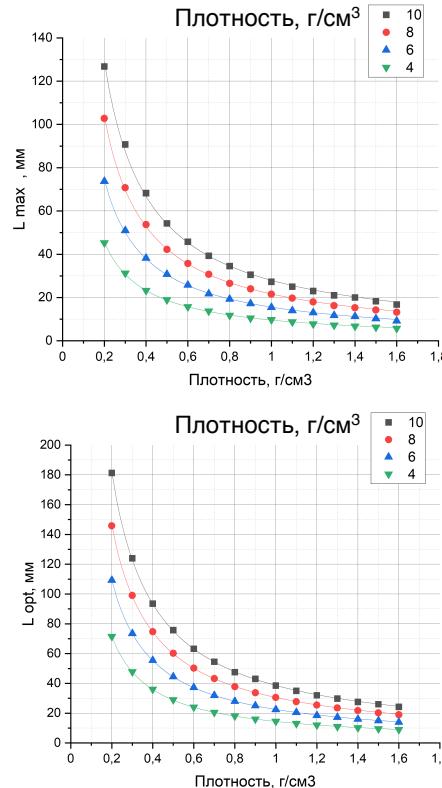
Зависимости L_{max} и L_{opt} можно интерполировать линейной функцией вида

$$y = a + b x$$

с максимальной погрешностью интерполяции не более 1%.

Результаты моделирования

Зависимость значений L_{max} и L_{opt} от плотности облучаемого объекта



Зависимость значений L_{max} и L_{opt} от плотности параллелепипеда при облучении ускоренными электронами с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ

При увеличении плотности параллелепипеда снижаются значения L_{max} и L_{opt} , что объясняется уменьшением пробега электронов в параллелепипеде.

Зависимости можно интерполировать функцией вида

$$y = c \times d^x$$

с максимальной погрешностью интерполяции не более 2 %.

Результаты моделирования

Аналитические выражения для оценки однородности облучения

При облучении объектов в форме параллелепипеда с плотностью в диапазоне от 0.3 г/см³ до 0.6 г/см³ пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ для численных оценок параметров K , L_{max} и L_{opt} можно использовать следующие выражения с максимальной погрешностью интерполяции не более 2%:

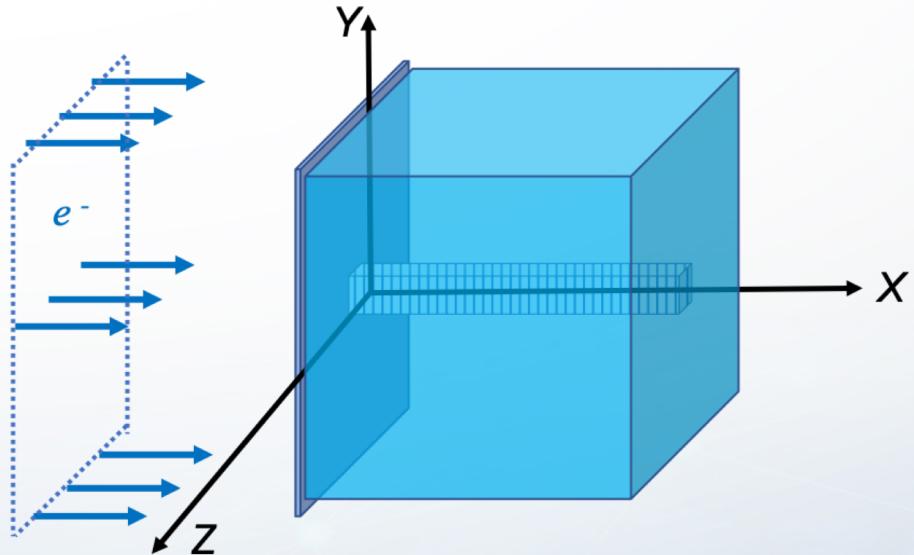
$$L_{max} = 3.04 \times \rho^{-0.97} \times E - 2.89 \times \rho^{-0.81}$$

$$L_{opt} = 4 \times \rho^{-0.96} \times E - 1.59 \times \rho^{-0.46}$$

$$K = 0.533 + 0,027 E - 0.001 E^2$$

Численный эксперимент

Предлагаемый метод увеличения равномерности радиационной обработки

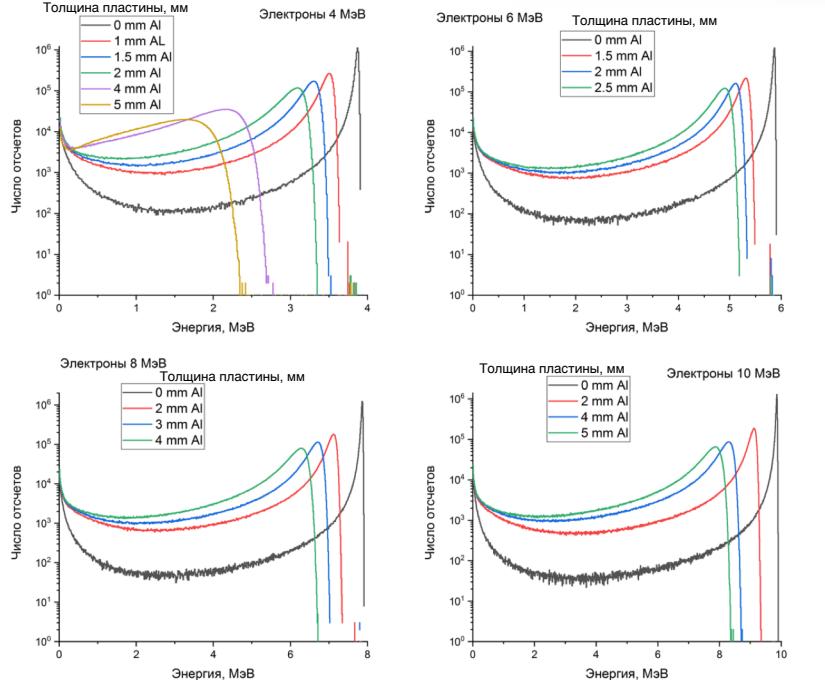


Параметры моделирования:

- размер куба составлял $30 \text{ см} \times 30 \text{ см} \times 30 \text{ см}$, плотность 1 г / см^3 ;
- пучок электронов размером $30.1 \text{ см} \times 30.1 \text{ см}$, энергия варьировалась от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ ;
- пластины-модификаторы из алюминия толщиной от 0.5 мм до 5.5 мм ;
- для расчета распределений поглощенной дозы по глубине вдоль оси X куб разбивался на ячейки с размерами $40 \text{ мм} \times 40 \text{ мм} \times 0.5 \text{ мм}$, в которых фиксировалась поглощенная энергия. По срезу куба в плоскости YZ поглощенная энергия распределялась равномерно.

Результаты моделирования

Спектры пучков электронов при облучении объектов с добавлением пластин-модификаторов



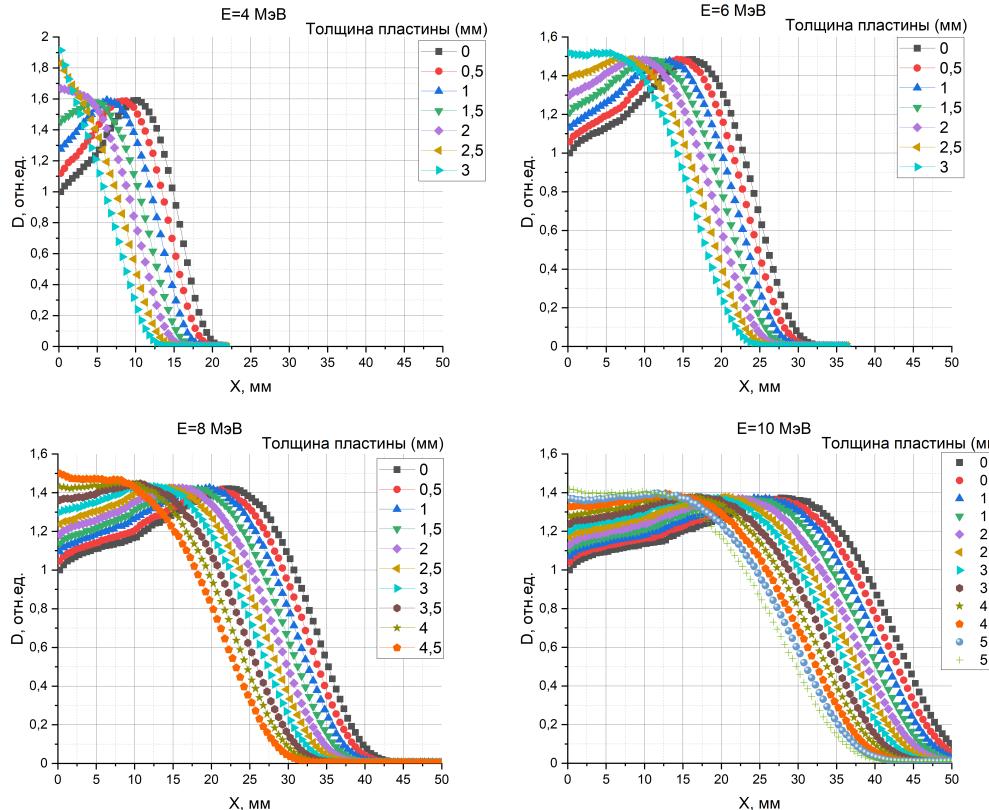
Спектры энергии электронов в пучках с начальной энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ после прохождения через воздух и через алюминиевые пластины-модификаторы.

Начальная энергия пучка электронов, МэВ	Толщина алюминиевой пластины, мм	Средняя энергия пучка электронов, МэВ	Полная энергия электронов в диапазоне от 0 МэВ до 2.5 МэВ, отн. ед.
4	0.0	3.76	1.00
	1.0	3.21	8.37
	1.5	2.94	15.99
	2.0	2.66	31.04
	0.0	5.71	1.00
6	1.5	4.84	8.11
	2.0	4.57	10.49
	2.5	4.30	13.42
	0.0	7.67	1.00
	2.0	6.43	8.77
8	3.0	5.90	11.71
	4.0	5.36	15.39
	0.0	9.62	1.00
	2.0	8.28	8.21
	4.0	7.18	12.31
10	5.0	6.65	14.62

Результаты моделирования

Глубинные дозовые распределения
с добавлением пластин-модификаторов

при облучении объектов

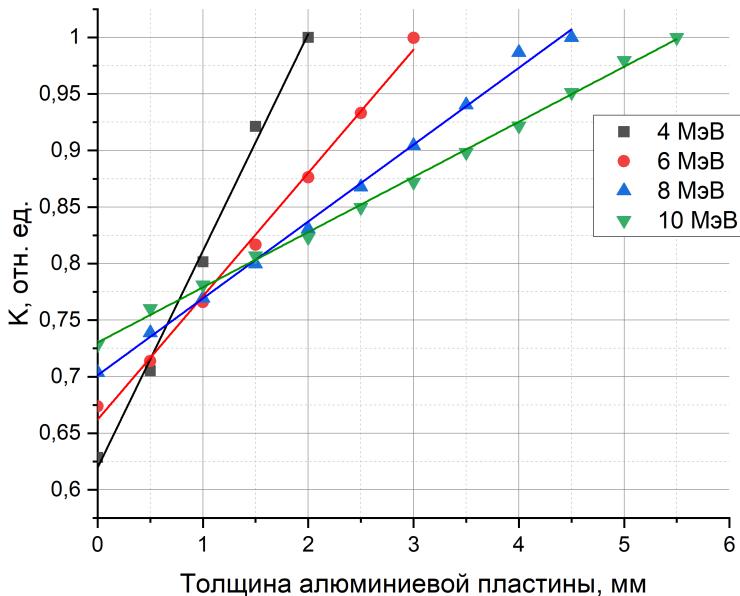


Добавление пластин-модификаторов из алюминия существенно изменяет дозовое распределение по глубине облучаемого объекта – рост дозы по глубине становится более плавным, при этом уменьшается максимальный пробег электронов по оси X

Зависимость значений поглощенной дозы D в слоях куба, состоящего из воды, размером $30 \text{ см} \times 30 \text{ см} \times 30 \text{ см}$ от глубины X при обработке моноэнергетическими пучками электронов с энергией $4 \text{ МэВ}, 6 \text{ МэВ}, 8 \text{ МэВ}, 10 \text{ МэВ}$ без размещения пластин-модификаторов и с добавлением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 0.5 мм до 5.5 мм .

Результаты моделирования

Зависимость значения К от толщины пластины-модификатора



Зависимость значений коэффициента от толщины алюминиевой пластины-модификатора при облучении куба monoэнергетическими пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ.

Начальная энергия пучка электронов 4 МэВ		
Толщина алюминиевой пластины, мм	K , отн. ед.	L_{opt} , мм
0	0,63	15,25
0,5	0,71	12,75
1	0,80	10,75
1,5	0,92	7,25
2	1,00	0,25

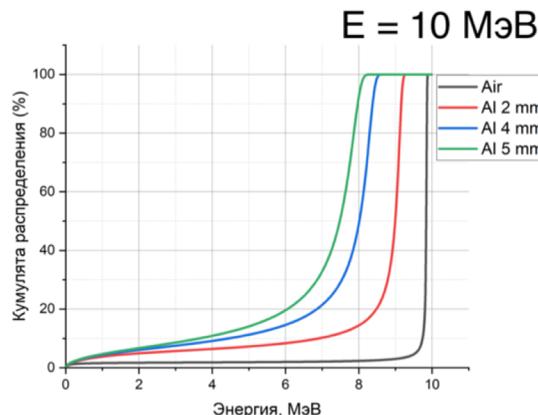
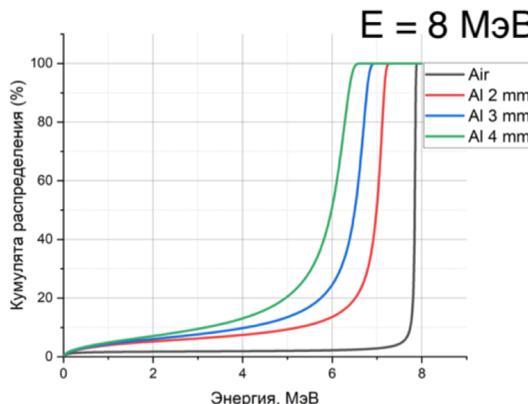
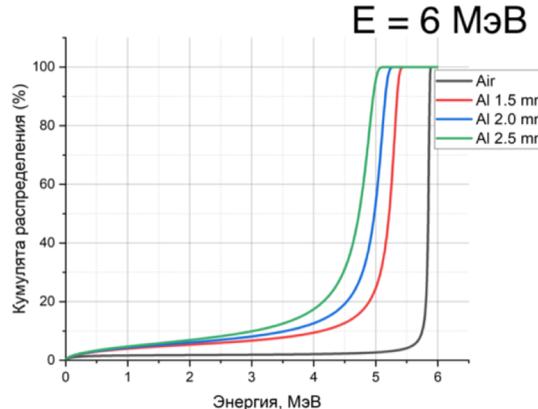
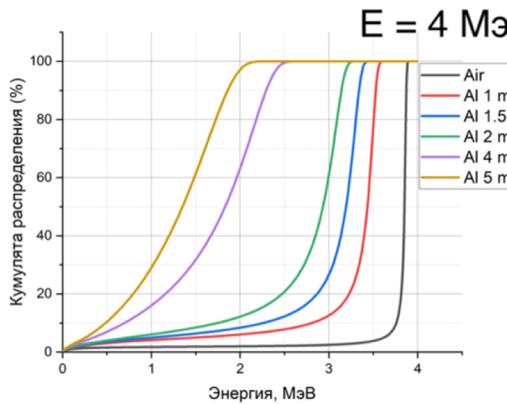
Начальная энергия пучка электронов 6 МэВ		
Толщина алюминиевой пластины, мм	K , отн. ед.	L_{opt} , мм
0	0,67	22,75
1	0,77	19,25
2	0,88	14,25
3	1,00	0,25

Начальная энергия пучка электронов 8 МэВ		
Толщина алюминиевой пластины, мм	K , отн. ед.	L_{opt} , мм
0	0,70	30,75
1	0,77	26,75
2	0,83	22,75
3	0,90	18,25
4	0,99	11,25
4,5	1,00	0,25

Начальная энергия пучка электронов 10 МэВ		
Толщина алюминиевой пластины, мм	K , отн. ед.	L_{opt} , мм
0	0,73	38,75
2	0,82	31,25
4	0,92	22,25
5	0,98	15,75
5,5	1,00	0,25

Результаты моделирования

Функции распределения по энергии электронов



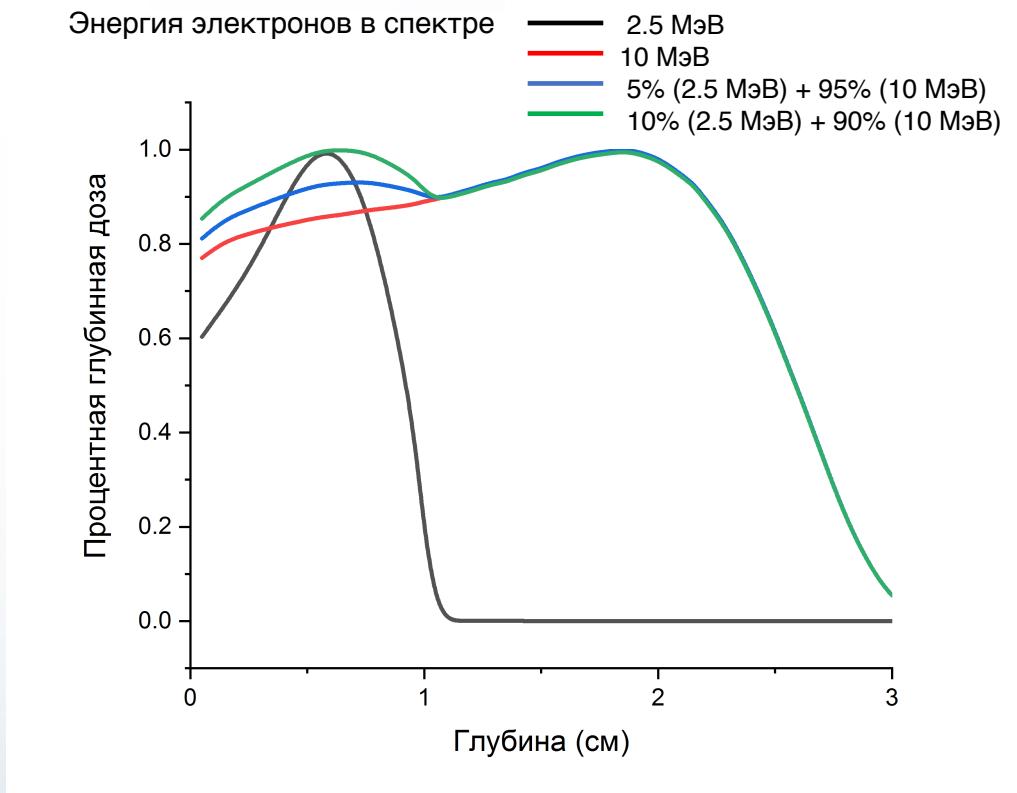
При облучении пучком электронов без пластины большая часть энергии электронов лежит в диапазоне до 97-98% от начальной энергии пучка.

Добавление алюминиевой пластины-модификатора приводит к увеличению разброса по энергии электронов в спектре, их энергия лежит в диапазоне от 10 % до 98% от начальной энергии электронов.

Доля электронов с энергией от 0 МэВ до 2.5 МэВ увеличивается примерно в 10 раз, в зависимости от толщины алюминиевой пластины-модификатора.

Функции распределения по энергии электронов в пучках с начальной энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ после прохождения через воздух и через алюминиевые пластины -модификаторы толщиной от 1 мм до 5 мм.

Принцип увеличения однородности облучения



Зависимость поглощенной дозы D в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда от глубины X при обработке электронами с энергией 2.5 МэВ и 10 МэВ

Экспериментальная проверка метода увеличения равномерности радиационной обработки

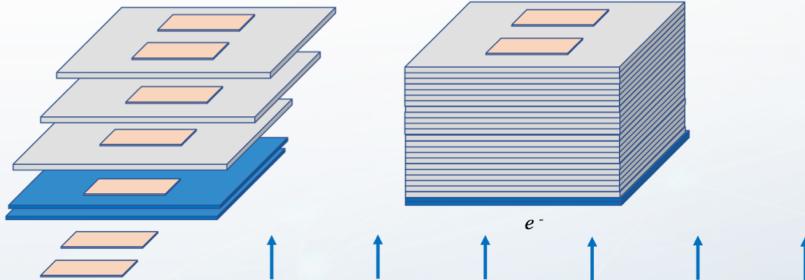
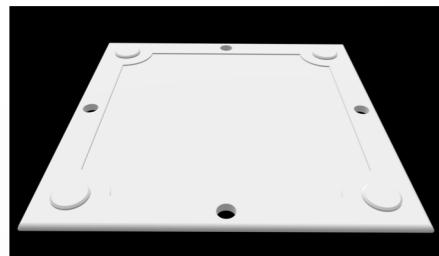
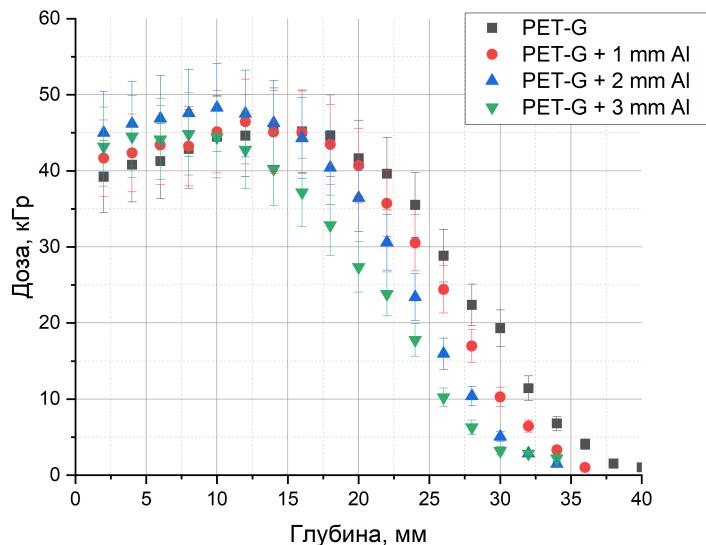


Схема облучения сборного фантома из 23 пластин из PETG-пластика толщиной 2,5 мм и 2 пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1 мм пучком ускоренных электронов с эффективной энергией обработки 9,5 МэВ.

Материалы и методы исследования:

- ускоритель УЭЛР-10-15-С в центре «Теклеор», энергия пучка 9.5 МэВ;
- пластины из пластика PETG (полиэтилентерефталат гликоль, плотность материала 1,4 г/см³) изготовленные при помощи станка с ЧПУ (по технологии 3D-печати).
- дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10 и СО ПД(Ф)Э-5/50 (сополимер с феназиновым красителем), погрешность определения поглощенной дозы 12%;
- спектрофотометр ПЭ-5400ВИ.

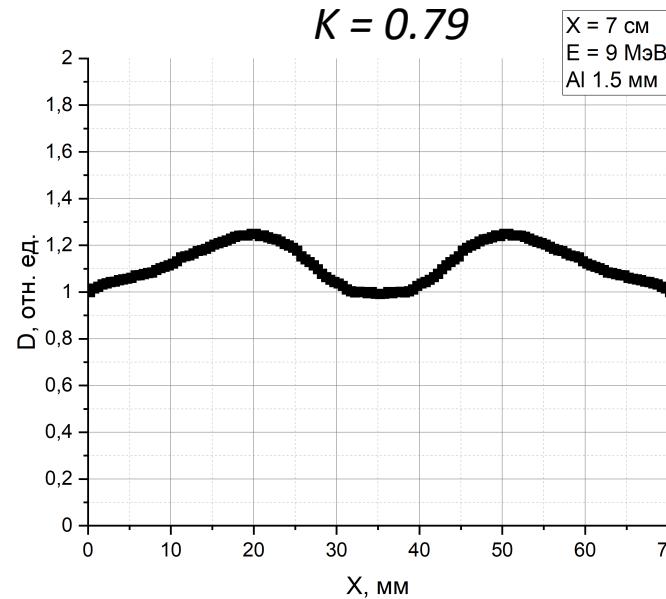
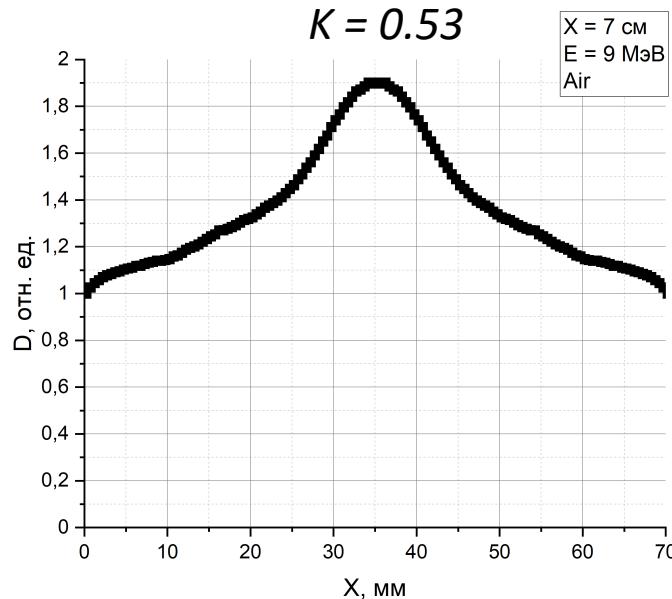
Результаты экспериментальной проверки



Зависимость значений поглощенной дозы D (Гр) от глубины (мм) в слоях кубоидов из пластика PET-G при обработке пучком электронов с энергией 9,5 МэВ и размещением пластин-модификаторов толщинами 1 мм, 2 мм, 3 мм и без них.

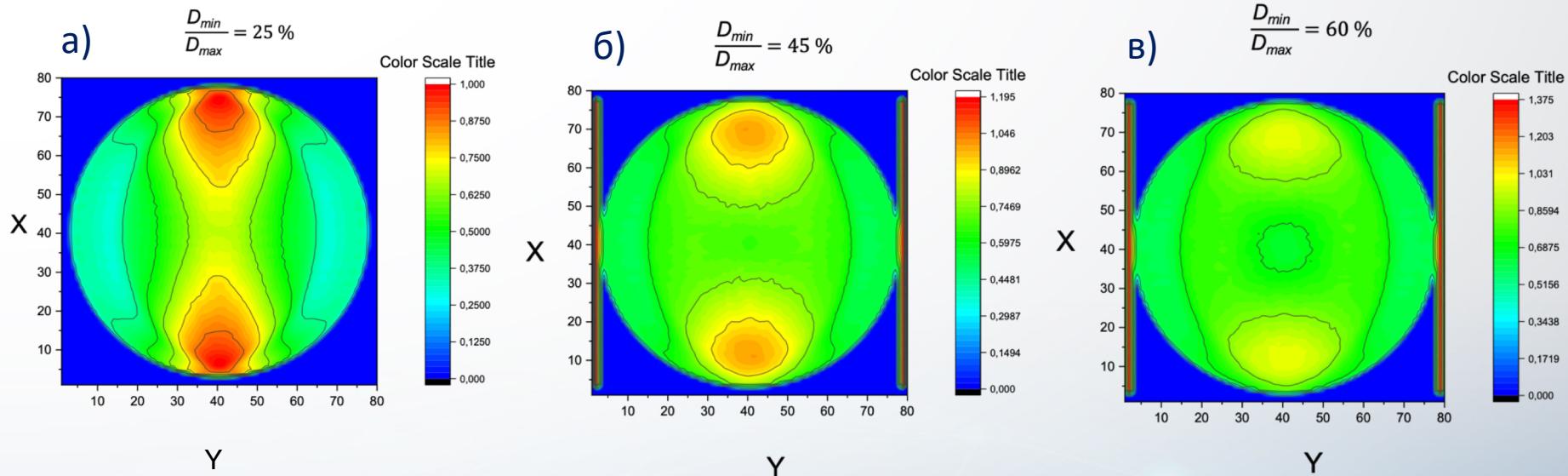
K , отн.ед.	L_{max} , мм	L_{opt} , мм
Облучение куба из PETG без пластины-модификатора		
0,86	14 ± 2	22 ± 2
Облучение куба из PETG с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной 1 мм		
0,90	12 ± 2	20 ± 2
Облучение куба из PETG с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной 2 мм		
0,93	10 ± 2	16 ± 2
Облучение куба из PETG с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной 3 мм		
0,96	8 ± 2	12 ± 2

Моделирование радиационной обработки для «Теклеор»: параллелепипед



Распределение дозы, нормированной на ее максимальное значение, по глубине коробки с сахаром, толщиной 7 см, плотностью 1 г/см³ при облучении электронами с энергией 9 МэВ с двух сторон с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1.5 мм

Моделирование радиационной обработки для «Теклеор»: цилиндр



Распределение дозы, нормированной на ее максимальное значение, по срезу колбасного изделия с радиусом 3.5 см при облучении электронами с энергией 9.5 МэВ с двух сторон без пластин (а) и с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1.5 мм и 2 мм (б).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 20 научных работ, в том числе 15 – в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Основные итоги работы опубликованы в следующих статьях:

1. Using low-energy electrons for the radiation treatment of chilled trout / Chernyaev A.P., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu, Nikitina Z.K., Gordonova I.K., Studenikin F.R., Ipatova V.S.// Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 611–614. SJR 2020 0,288
2. Computer simulation to determine food irradiation dose levels / Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu, Chernyaev A.P., Avdukhina V.M., Ipatova V.S., Leontiev V.A., Studenikin F.R. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 365. — P. 012002. SJR 0,175
3. Treatment of refrigerated trout with 1 mev electron beam to control its microbiological parameters / Chernyaev A.P., Bliznyuk U.A., Borschegovskaya P.Yu, Ipatova V.S., Nikitina Z.K., Gordonova I.K., Studenikin F.R., Yurov D.S. // Physics of Atomic Nuclei. — 2018. — Vol. 81, no. 11. — P. 1656–1659. IF:0.376
4. Инновационные подходы к развитию радиационных технологий обработки биообъектов / Близнюк У.А., Авдюхина В.М., Борщеговская П.Ю., Розанов В.В., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П., Юров Д.С. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2018. — Т. 82, № 6. — С. 824–828. RINC: 0.628
5. Исследование воздействия рентгеновского излучения на концентрацию восстанавливающих сахаров в картофеле и на его прорастание / Авдюхина В.М., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Бусленко А.В., Илюшин А.С., Кондратьева Е.Г., Крусанов Г.А., Левин И.С., Синицын А.П., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2018. — № 3. — С. 99–103. RINC:0,972
6. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / Алимов А.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Варзарь С.М., Еланский С.Н., Ишханов Б.С., Литвинов Ю.Ю., Матвейчук И.В., Николаева А.А., Розанов В.В., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П., Шведунов В.И., Юров Д.С.. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 6. — С. 819–823. RINC: 0.628

Доклады на конференциях

Основные научные результаты диссертации докладывались на 20 научных конференциях. Основные итоги работы:

1. Метод повышения однородности распределения дозы по объёму объекта при облучении ускоренными электронами / Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П., Ханкин В.В. // «Ломоносовские чтения - 2021». Секция «Физика».
2. Dose adjustment to ensure uniformity of cylindrical foodstuff irradiation / Studenikin F., Bliznyuk U., Krusanov G., Chernyaev A., Khankin V., Borschegovskaya P., Ipatova V., Bliznyuk A.// RAP CONFERENCE PROCEEDINGS. — Vol. 5 of Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia, 2020. — P. 68–71.
3. Method of dose modification in foodstuffs during irradiation / Chernyaev A., Avdyukhina V., Bliznyuk U., Borchegovskaya P., Belousov A., Studenikin F., Ipatova V. // BOOK OF ABSTRACTS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION APPLICATIONS (RAP 2020). — Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia Oblačića Rada 24/29, 18105 Niš, Serbia, 2020. — P. 4.
4. Dose computer simulation for food irradiation / Bliznyuk U.A., Borschegovskaya P.Y., Ipatova V.S., Chernyaev A.P., Studenikin F.R., Leontiev V.A. // INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL TECHNOLOGY, ENGINEERING, AND ENVIRONMENTAL SCIENCES (ICATES 2019) Challenges and Opportunities Towards Industry 4.0. — Banda Aceh-Indonesia, 2019. — P. 95–95.
5. Estimation of the absorbed dose in food during electron irradiation / Avduhina V.M., Bliznuk U.A., Borschegovskaya P.Yu, Chernyaev A.P., Ipatova V.S., Leontiev V.A., Semenova M.N., Studenikin F.R. // LXIX International Conference Nucleus-2019 on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure “Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies”, Dubna, Russia, 1-5 2019. Book of Abstracts. — Joint Institute for Nuclear Research Dubna, Russia, 2019. — P. 369–369.
6. Новые направления в радиационной обработке продукции и материалов / Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Леонтьев В.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П.// Труды XX Межвузовской научной школы молодых специалистов Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине / Под ред. проф. Б.С. Ишханова, проф. Л.С. Новикова, А.А. Кузнецова, Э.И. Кэбина / Под ред. Б. С. Ишханов, А. А. Кузнецов, Э. И. Кэбин, Л. С. Новиков. — КДУ, Университетская книга, Москва, 2019. — С. 207–211.

Грантовая поддержка проведенных исследований

Экспериментальные исследования по теме диссертации поддержаны личными грантами:

- Аспиранты РФФИ «Разработка метода и инструментов модификации энергетического спектра пучка ускоренных электронов для увеличения равномерности радиационной обработки продовольственных продуктов»
- УМНИК 2020 «Разработка контейнера с коллиматорной подложкой для обеспечения однородности дозы в продовольственных товарах при радиационной обработке»
- Конкурс «Научная стажировка» фонда поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова, место прохождения стажировки центр «Теклеор», тема НИР «Разработка метода и инструментов модификации энергетического спектра пучка ускоренных электронов для увеличения равномерности радиационной обработки продовольственных продуктов»

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный метод модификации спектра пучка электронов при радиационной обработке позволяет обеспечить однородность дозовых распределений по объему облучаемого объекта за счет увеличения доли электронов с энергиями, меньшими, чем максимальная энергия первичного пучка.
2. Увеличение однородности дозовых распределений по объему облучаемого объекта достигается при применении алюминиевых пластин-модификаторов с толщиной в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм и начальной энергии электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ.
3. Разработанный метод модификации спектра пучка электронов позволяет увеличить коэффициент однородности облучения для объектов в форме параллелепипеда с 60 % до 95 %, а для объектов в форме цилиндра с 25 % до 60 %.

Результаты и выводы

- 1) на основе выполненных в настоящей работе расчетов и экспериментальных исследований даны рекомендации по применению пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы в объектах облучаемых пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ;
- 2) на основе полученных в настоящей работе результатов, зная размеры и плотность облучаемого объекта, можно подобрать режим облучения ускоренными электронами и толщину пластины-модификатора, обеспечивающие достижение максимально возможной равномерности радиационной обработки;
- 3) разработанный алгоритм может быть использован для быстрой оценки дозовых распределений в объектах различной плотности, геометрии и состава при облучении пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ;
- 4) получены аналитические выражения, которые позволяют без проведения компьютерного моделирования оценить однородность облучения и определить целесообразность облучения объектов в форме параллелепипеда с линейными размерами 40 см × 40 см × 80 см и плотностью от 0.3 г/см³ до 1.6 г/см³ пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ;
- 5) изготовлен фантом из пластмассы (PETG-пластик), который может быть использован для измерения дозовых характеристик в объектах в форме параллелепипеда в промышленных центрах радиационной обработки.

Благодарность

- Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность научному руководителю профессору **Черняеву А.П.** и научному консультанту **Близнюк У.А.** за критические замечания, советы и поддержку на всех этапах выполнения работы, а также сотрудникам кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета профессору **Терещенко С.А.**, профессору **Розанову В.В.**, доценту **Борщеговской П.Ю.** за помочь в освоении современных методов исследования воздействия ионизирующего излучения на органические и неорганические объекты.
- Автор также искренне признателен профессору **Шведунову В.И.** и научным сотрудникам отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ **Ханкину В.В.**, **Юрову Д.С.**, сотрудникам лаборатории пучковых технологий и медицинской физики НИИЯФ МГУ **Ипатовой В.С.**, **Золотову С.А.** за содействие в ходе проведения совместных экспериментальных исследований и обсуждении результатов, а также старшему научному сотруднику отдела ядерных реакций НИИЯФ МГУ **Галаниной Л.И.** за поддержку и конструктивные замечания в ходе выполнения данной работы.



НИИЯФ
МГУ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Студеникин Ф.Р.
м.н.с. НИИЯФ МГУ

f.studenikin@gmail.com