

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ АСТРА-М В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ
ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Методические указания к лабораторным работам

Томск - 2019

Цель работы:

Изучение физических основ генерации тормозного рентгеновского излучения при торможении пучка ускоренных электронов на базе импульсного сильноточного электронного ускорителя АСТРА-М; исследование пространственного распределения тормозного излучения за конвертором.

1. Введение

Для решения задач радиационных технологий в настоящее время широко используются как ускорители заряженных частиц, так и γ -источники на основе изотопов ^{60}Co и ^{137}Cs [1]. Технические, технологические и экономические аспекты применения этих источников ионизирующих излучений достаточно хорошо изучены. Однако во многих случаях возникает потребность постоянной радиационной обработки широкого ассортимента объектов при сравнительно незначительных объемах обработки. В этих случаях экспедиционно-транспортные расходы по доставке объектов к высокопроизводительным источникам ионизирующих излучений, чаще всего специализированным, могут стать препятствием для осуществления радиационной обработки. Создание же и эксплуатация маломощных источников ионизирующих излучений, как известно, повышает удельные затраты радиационной обработки. Этот вывод справедлив как для ускорителей электронов, так и для изотопных γ -установок [2].

Задачу экономически оправданной обработки небольших массопотоков разнообразных объектов позволяют решить установки, генерирующие тормозное рентгеновское излучение в диапазоне энергий 250...400 кэВ. Этот энергетический диапазон излучения характеризуется достаточной для большинства случаев проникающей способностью (слой половинного ослабления в воде 5...25 см), с одной стороны, и простотой создания мощных электронных пучков для генерации излучения – с другой. В этом энергетическом диапазоне достаточно просто осуществляется вывод излучения в зону облучения объектов.

Работа электронных ускорителей в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения основана на том, что при прохождении ускоренного электрона через вещество часть энергии испускается в виде потока квантов электромагнитных колебаний, лежащих в диапазоне рентгеновского излучения. Общие потери энергии ускоренного электрона при прохождении через вещество складываются из *ионизационных* и *радиационных потерь*. При этом, соотношение потерь на ионизацию вещества (большей частью нагрев мишени) и излучение (поток тормозного излучения) зависит от начальной кинетической энергии ускоренного электрона и свойств вещества, в котором электрон тормозится.

Для электрона с энергией

$$E = m_e c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

удельные ионизационные потери энергии электронов при прохождении через вещество определяются соотношением:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион.}} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln \left(\frac{m_e c^2 T_e}{\bar{I}^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right], \quad (1)$$

Удельные радиационные потери энергии электронов при прохождении через вещество определяются соотношением:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} &= -\frac{16}{3} n_e \frac{Z^2 r_0^2}{137} & E \ll m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}, \\ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} &= -n_e \frac{Z^2 r_0^2}{137} \left(4 \ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right) & 1 \ll E/m_e c^2 \ll 137/Z^{1/3}, \\ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} &= -n_e \frac{Z^2 r_0^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right) & E/m_e c^2 \gg 137/Z^{1/3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_e - масса электрона ($m_e c^2 = 511$ кэВ - энергия покоя электрона); $T_e = E$ - кинетическая энергия электрона; c - скорость света; $\beta = v/c$; v - скорость частицы; n_e - плотность электронов вещества; $\bar{I}$ - средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица: $\bar{I} = 13.5Z$ эВ, где Z - заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона; $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона.

Отношение удельных радиационных и ионизационных потерь определяются зависимостью:

$$(dE/dx)_{\text{рад}} / (dE/dx)_{\text{иониз}} = 1.25 \cdot 10^{-3} Z E \quad (3)$$

где Z – заряд ядер вещества среды, E – кинетическая энергия электронов в МэВ

На рисунке 1 представлены зависимости ионизационных и радиационных потерь от начальной энергии электрона, тормозящегося в воздухе и свинце, в диапазоне энергий от 0,01 МэВ до 1000 МэВ.

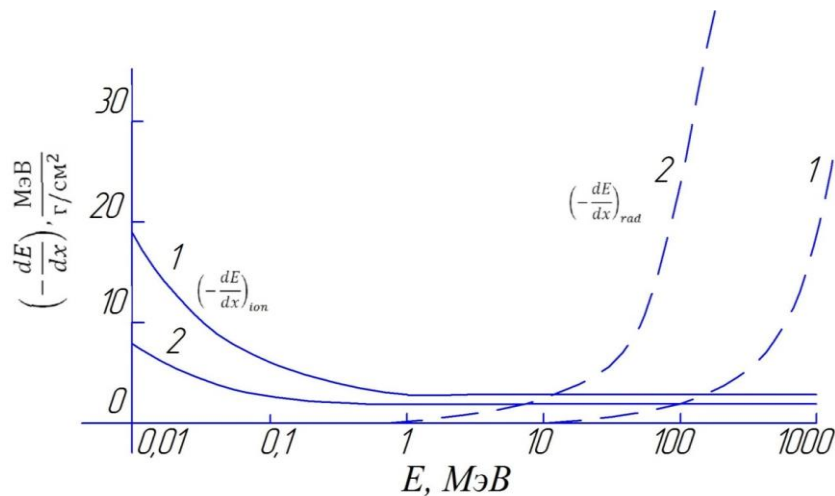


Рис.1. Ионизационные и радиационные потери электронов на $1/\text{см}^2$ в воздухе (1) и свинце (2)

Исходя из представленных соотношений видно, что выход тормозного излучения при начальной кинетической энергии электрона меньше 10 МэВ невелик по сравнению с затратами энергии на ионизационные потери.

Величина энергии электрона, при которой удельные радиационные и ионизационные потери при прохождении через данное вещество равны, называется *критической энергией*. В зависимости от материала мишени, критическая энергия принимает следующие значения:

Вещество	Критическая энергия $E_{\text{крит}}$, МэВ
H	340
C	103
Воздух	83
Al	47
Fe	24
Cu	21.5
Pb	6.9

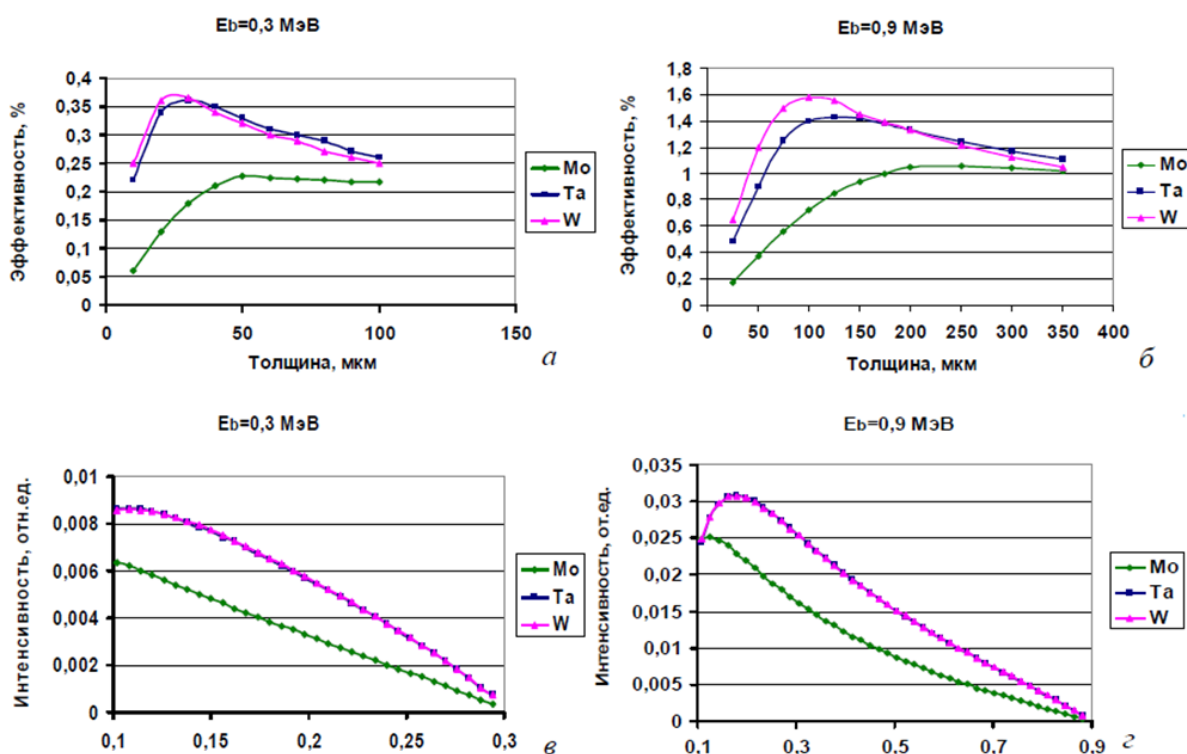


Рисунок 2. Зависимость эффективности преобразования энергии РЭП в энергию ТРИ от толщины мишени и спектры тормозного излучения.

При работе электронного ускорителя в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения, необходимо выбрать оптимальную толщину мишени, чтобы, во-первых, иметь максимально эффективную генерацию излучения, во – вторых, минимизировать поглощение квантов рентгеновского излучения в толщине мишени.

На рис. 2 показана зависимость эффективности генерации тормозного рентгеновского излучения при энергии моноэнергетичного электронного пучка 0,3 МэВ и 0,9 МэВ в зависимости от толщины различных материалов [2].

Таким образом, при работе линейного электронного ускорителя с ускоряющим напряжением до 500 кэВ в режим генерации тормозного рентгеновского излучения, необходимо учитывать тепловую нагрузку на мишень и относительную величину выхода квантов тормозного излучения для выбранного материала мишени. В качестве мишени в радиационной физике используют вещества с высоким зарядом атомов Z и большой плотностью, что позволяет повысить, с одной стороны, эффективность выхода тормозного рентгеновского излучения, с другой стороны, позволяет обеспечить подходящий тепловой режим для мишени при достаточной механической прочности. Традиционно в качестве материала мишени применяют молибден ($Z=42$, $A=96$), тантал ($Z=73$, $A=181$), вольфрам ($Z=74$, $A=184$).

В работе [2], к примеру, исследуются мишени из указанных материалов для получения тормозного рентгеновского излучения импульсными сильноточными электронными ускорителями, генерирующие электронный пучок с высокой плотностью тока на мишени (1: ток пучка 2-3 кА, энергия электронов 300-500 кэВ, длительность импульса 5 нс, 2: ток пучка 4-7 кА, энергия электронов 750-900 кэВ, длительность импульса 20 нс). Проведенные эксперименты показали, что при выборе мишени для генерации тормозного излучения немаловажную роль играет тепловой режим работы, поскольку при торможении сильноточного электронного пучка в мишени происходит локальный перегрев твердого тела. На рис. 3 представлены фотографии мишеней из разных материалов после облучения [2].



Рисунок 3. Состояние мишеней после облучения сильноточным РЭП (микросекундный ствол): а – мишень из W ($d=200$ мкм, 2 выстрела), б – мишень из Ta ($d=50$ мкм, 3 выстрела); в – мишень из Mo ($d=500$ мкм, 15 выстрелов).

2. Понятие дозы излучения

Экспозиционная доза (X). В качестве количественной меры рентгеновского и γ -излучения принято использовать во внесистемных единицах экспозиционную дозу,

определяемую зарядом вторичных частиц (dQ), образующихся в массе вещества (dm) при полном торможении всех заряженных частиц :

$$X = dQ/dm$$

Единица **экспозиционной дозы** - Рентген (P). Рентген - это экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучения, создающая в 1куб.см воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт.ст. суммарный заряд ионов одного знака в одну электростатическую единицу количества электричества. Экспозиционной дозе 1 Р соответствует $2.08 \cdot 10^9$ пар ионов ($2.08 \cdot 10^9 = 1/(4.8 \cdot 10^{-10})$).

Поглощенная доза (D) - основная дозиметрическая величина. Она равна отношению средней энергии dE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = dE/dm$$

Единица поглощенной дозы - Грей (Gp). Внесистемная единица Рад. 1 Гр для фотонов всех энергий и электронов составляет 100 Рад.

Эквивалентная доза (H). Для оценки влияния на человека и обеспечения безопасных условий труда в области радиационной безопасности введено понятие эквивалентной дозы H , равной произведению поглощенной дозы D_r , созданной облучением - r и усредненной по анализируемому органу или по всему организму, на весовой множитель w_r (называемый еще - коэффициент качества излучения) (таблица 1).

$$H = \sum_r w_r D_r$$

Единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм. Она имеет специальное наименование Зиверт ($Зв$).

Таблица 1.

Весовые множители излучения	
Вид излучения и диапазон энергий	Весовой множитель
Фотоны всех энергий	1
Электроны и мюоны всех энергий	1
Нейтроны с энергией < 10 КэВ	5
Нейтроны от 10 до 100 КэВ	10
Нейтроны от 100 КэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны > 20 МэВ	5
Протоны с энергий > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
α -частицы, осколки деления и другие тяжелые ядра	20

Влияние облучения носит неравномерный характер. Для оценки воздействия за счет различного характера влияния облучения на разные органы (в условиях равномерного облучения всего тела) введено понятие эффективной эквивалентной дозы $E_{эфф}$, применяемое при оценке возможных стохастических

Эффективная доза равна сумме взвешенных эквивалентных доз во всех органах и тканях:

$$E_{эфф} = \sum_t w_t H_t$$

где w_t - тканевый весовой множитель (таблица 12), а H_t -эквивалентная доза, поглощенная в ткани - t . Единица эффективной эквивалентной дозы - *Зиверт*.

Таблица 2.

Значения тканевых весовых множителей w_t для различных органов и тканей.			
Ткань или орган	w_t	Ткань или орган	w_t
Половые железы	0.20	Печень	0.05
Красный костный мозг	0.12	Пищевод	0.05
Толстый кишечник	0.12	Щитовидная железа	0.05
Легкие	0.12	Кожа	0.01
Желудок	0.12	Поверхность костей	0.01
Мочевой пузырь	0.05	Остальные органы	0.05
Молочные железы	0.05		

Согласно нормам радиационной безопасности (НРБ 99/2009), максимально допустимые дозы облучения персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения, составляют:

Таблица 3

Помещение, территория	Т	n	ПД	P_g
	отн. ед.	отн. ед.	мЗв/год	мкЗв/ч
Помещения постоянного пребывания персонала группы А (все помещения, входящие в состав отделений, кабинетов лучевой терапии, комната управления (пультовая)).	1	1	20	6,0
Помещения временного пребывания персонала группы А.	0,5	1	20	12,0
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя в которых имеются постоянные рабочие места персонала группы Б.	1	1,2	5	1,2
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя, без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, уборная, кладовая и др.).	0,25	1,2	5	5,0
Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и т.п.).	0,06	1,2	5	20
Помещения, в которых имеются постоянные рабочие места лиц, не отнесенных к персоналу.	1	1,2	1	0,25
Территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя.	0,12	2	1	1,2

Соблюдение необходимых требований Радиационной безопасности обеспечит полную безопасность при работе с источника ионизирующего излучения.

3. Описание лабораторного стенда на базе высокопоточного импульсного электронного ускорителя АСТРА-М.

Лабораторный стенд состоит из высокопоточного импульсного электронного ускорителя АСТРА-М, конвертера тормозного рентгеновского излучения, диагностического оборудования контроля параметров работы ускорителя.

3.1 Высокопоточный импульсный электронный ускоритель АСТРА-М.

Импульсный электронный ускоритель АСТРА-М (рис.4) предназначен для проведения научно-исследовательских работ по изучению взаимодействия электронного пучка с газо-фазными, жидкими и твердыми веществами.

Технические параметры ускорителя:

- Плотность тока на мишени $10 - 30 \text{ А/см}^2$
- Длительность импульса выведенного тока 120 нс (по основанию)
- Частота импульсов 1-50 имп/сек
- Импульсное напряжение 250-500 кВ
- Ток пучка электронов в импульсе до 1,5 кА
- Полная энергия электронов в импульсе до 15 Дж

На рисунке 5 представлена электрическая принципиальная схема ускорителя АСТРА - М.

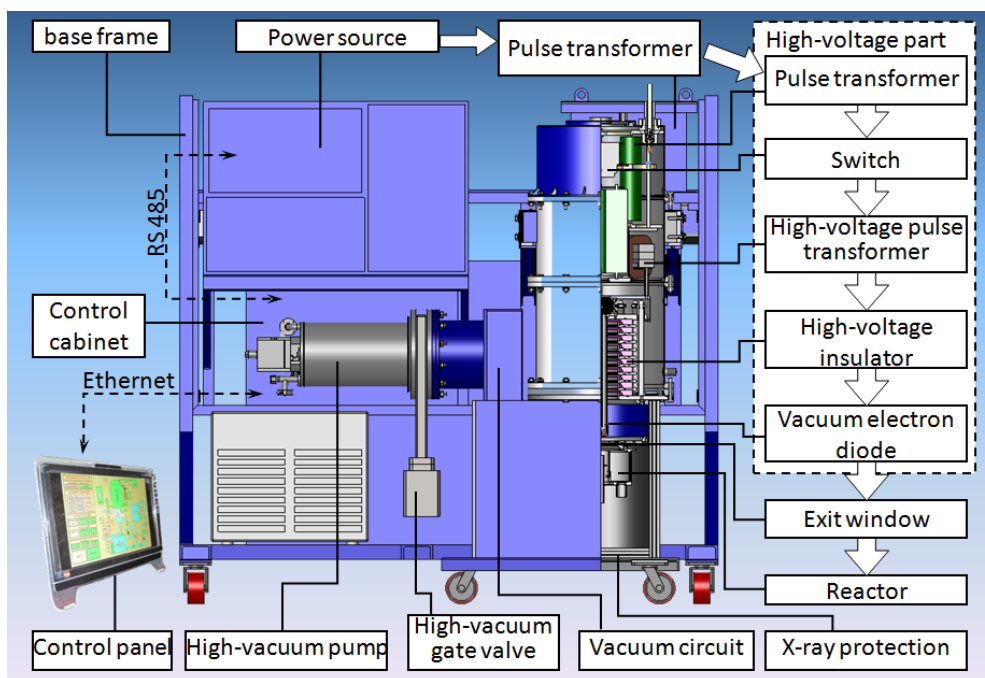


Рисунок 4. Конструкция электронного ускорителя АСТРА-М

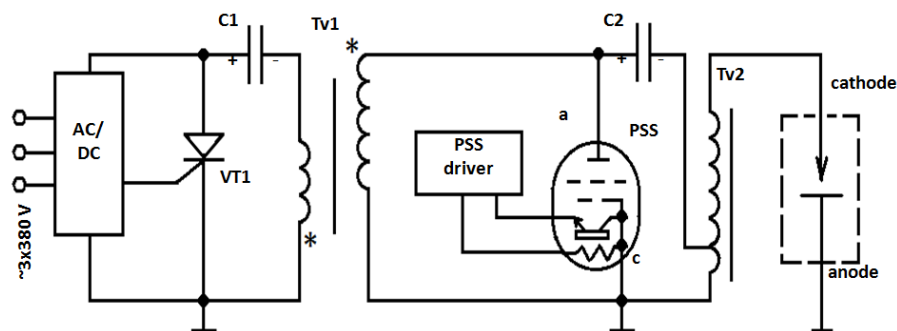


Рисунок 5. Принципиальная схема электронного ускорителя АСТРА-М

Величина импульсной мощности инжектированного электронного пучка в течение длительности импульса представлено на рис. 4(б). На рис. 4(в) представлен график поглощенной дозы электронного пучка от времени в тонком слое вещества.

Силовая часть ускорителя включает в себя: источник питания (AC/DC), заряжающий первую батарею конденсаторов (C1) емкостью 20 мкФ до напряжения 2 кВ, твердотельный коммутатор (VT1) – тиристор, импульсный трансформатор (Tv1) с коэффициентом трансформации 1:20, вторую батарею конденсаторов (C2), высоковольтный разрядник псевдоспарк (PSS), импульсный автотрансформатор (TV2) и электронный диод. Генератор высоковольтных импульсов, напряжение которого прикладывается к электронному диоду ускорителя, включает в себя высоковольтный импульсный трансформатор (1:10), батарею емкостных накопителей 100 нФ и псевдоискровой разрядник PSS. Источником электронов является взрывоэмиссионный планарный катод. Катод-анодный зазор регулируется в интервале от 15 до 30 мм.

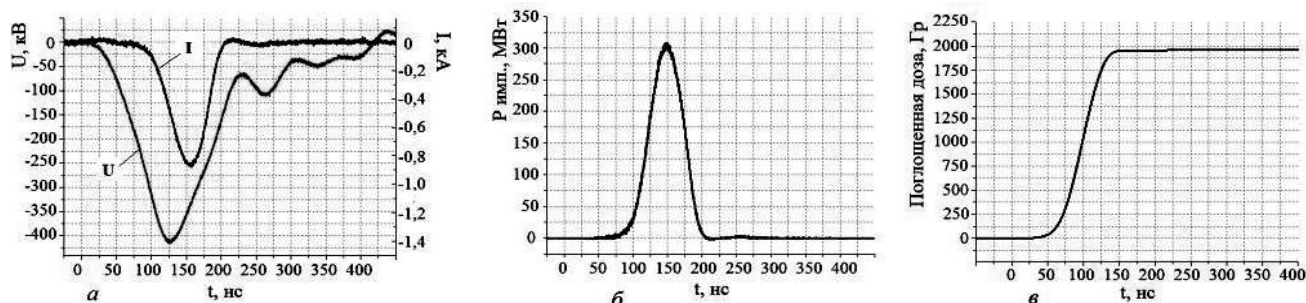


Рисунок 6. Ускоряющее напряжение диода электронного ускорителя и выведенный ток пучка - а, б – зависимость импульсной мощности выведенного электронного пучка от времени, в – зависимость поглощенной дозы для нефти от времени.

Управление ускорителем осуществляется дистанционно с персонального компьютера, расположенного в комнате оператора.

Отличительной особенностью ускорителя АСТРА-М является отсутствие в конструкции формирующих линий (ОФЛ, ДФЛ, полосковая линия и т.п.), что обеспечивает его компактность, упрощение обслуживания, а также минимизирует затраты при изготовлении комплекса.

На рисунке 6(а) приведены характерные осциллограммы ускоряющего импульсного напряжения и выведенного в зону обработки тока электронного пучка, измеренного цилиндром Фарадея. Особенность импульсного воздействия заключается в существенно более высокой величине импульсной мощности поглощенной дозы по

сравнению с непрерывными электронными пучками. При энергии в импульсе 10-15 Дж и длительности импульса тока порядка 110 нс, импульсная мощность достигает значений $P_{имп} = 90-140$ МВт.

Мощность излучения определяет концентрацию первичных электронов, обеспечивающих ионизацию и возбуждение молекул обрабатываемого вещества и образование вторичных электронов с концентрацией пропорциональной мощности излучения. При импульсном излучении достижимы величины мощности дозы, при которых перекрытие треков будет происходить уже на поверхности обрабатываемого вещества.

На рис. 7 представлена конструкция конвертера тормозного рентгеновского излучения ускорителя АСТРА-М, материал конвертера нержавеющая сталь толщиной 1,5 мм. Для исследования распределения ТРИ используются дозиметры ионизационные ИД-1.

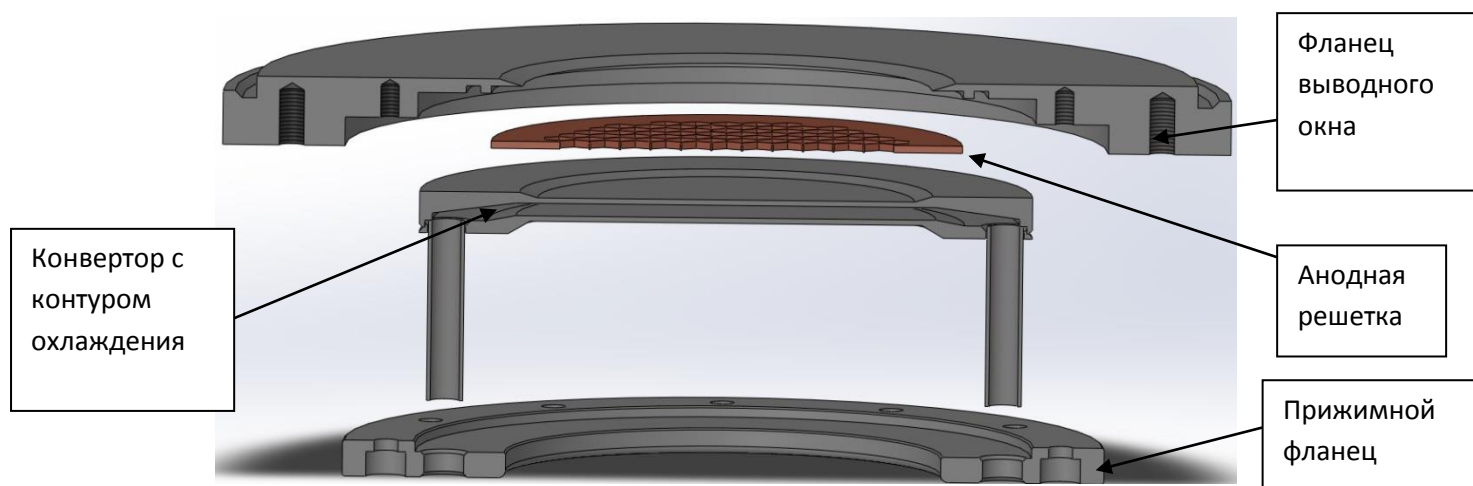


Рисунок 7. Конструкция конвертера тормозного рентгеновского излучения импульсного сильноточного электронного ускорителя АСТРА-М

3.2 Дозиметр ИД-1



Рисунок 8. Дозиметры ИД-1

Комплект дозиметров ИД-1 предназначен для измерения поглощенных доз гамма - нейтронного излучения в интервале температур - 50 до +50 С при относительной влажности воздуха до 98%.

Зарядное устройство предназначено для заряда конденсатора дозиметра.

Дозиметр обеспечивает измерение поглощенных доз гамма - нейтронного излучения в диапазоне от 20 до 500 рад (1 рад. + 1,05 р) с мощностью дозы от 10 до 3660000 рад/ч. Отсчет измеряемых доз производится по шкале, расположенной внутри дозиметра и отградуированной в радах. Стабильность показаний дозиметров в течение 6 мес. эксплуатации обеспечивает измерение доз в пределах основной погрешности измерений. Зарядка дозиметров производится от зарядного устройства, имеющего возможность плавного измерения выходного напряжения в пределах от 180 до 250 В.

Комплект вибропрочен, ударопрочен, прочен при падении, может транспортироваться любым видом транспорта. Нарботка комплекта составляет не менее 5000 ч., технический ресурс - не менее 10000 час.

Размеры комплекта в футляре, дозиметра и зарядного устройства:

- комплект в футляре - 184 x 102 x 142 мм;
- дозиметр с держателем - 19 x 128,5 мм;
- зарядное устройство - 105 x 37 x 122 мм.

Масса комплекта в футляре, дозиметра и зарядного устройства:

- комплект в футляре - 1500 гр.;
- дозиметра - 40 гр.;
- зарядного устройства - 500 гр.

Устройство и работа комплекта и его составных частей

Для удобства пользования дозиметр конструктивно выполнен в форме авторучки и состоит из микроскопа, ионизационной камеры, электроскопа, конденсатора, корпуса и контактной группы.

Индивидуальные дозиметры позволяют с достаточной точностью определить поглощенную дозу гамма- рентгеновского и нейтронного излучения.

Принцип работы дозиметра основан на следующем: при воздействии ионизирующего излучения на заряженный дозиметр в объеме ионизационной камеры возникает ионизационный ток, уменьшающий потенциал конденсатора и ионизационной камеры. Уменьшение потенциала пропорционально дозе облучения. Измеряя изменение потенциала, можно судить о полученной дозе. Измерение потенциала производится с помощью малогабаритного электроскопа, помещенного внутри ионизационной камеры. Отклонение подвижной системы электроскопа - платинированной нити - измеряется с помощью отсчетного микроскопа, со шкалой дозиметра зарядный потенциал ионизационной камеры выбран в пределах от 180 до 250 В.

Принцип работы зарядного устройства основан на следующем: при вращении ручки по часовой стрелке рычажный механизм создает давление на пьезоэлементы, которые деформируясь, создают на торцах разность потенциалов, приложенную таким образом, чтобы по центральному стержню подавался “плюс” на центральный электрод ионизационной камеры дозиметра, а по корпусу - “минус” на внешний электрод ионизационной камеры. Для ограничения выходного напряжения зарядного устройства параллельно пьезоэлементам подключен разрядник.

При эксплуатации для предупреждения механических повреждений комплекта необходимо:

- оберегать комплект от ударов, толчков, падений;
- при перевозке (переноске) приборы должны находиться в футляре;

- при транспортировании комплектов располагать их по возможности в передней части кузова;
- при работе защищать комплект от загрязнений и вредных климатических воздействий (дождя, снега, прямых солнечных лучей и т.п.).

После работы с комплектом необходимо его техническое обслуживание. При приведении дозиметра в рабочее состояние его следует зарядить. Порядок зарядки дозиметра:

- поверните ручку зарядного устройства против часовой стрелки до упора;
- вставьте дозиметр в зарядно - контактное гнездо зарядного устройства;
- направьте зарядное устройство зеркалом на внешний источник света;
- добейтесь максимального освещения шкалы поворотом зеркала;
- нажмите на дозиметр и, наблюдая в окуляр, поворачивайте ручку зарядного устройства по часовой стрелке до тех пор, пока изображение нити на шкале дозиметра не установится на 0, после этого выньте дозиметр из зарядно - контрольного гнезда;
- проверьте положение нити на свет - при вертикальном положении нити ее изображение должно быть на 0.

3.3. Дозиметр ДКС.



Рисунок 8. Дозиметры ДКС

Дозиметр предназначен для: измерения дозы и мощности амбиентного эквивалента дозы непрерывного, кратковременного и импульсного рентгеновского и гамма-излучения; поиск и обнаружение источников рентгеновского, гамма- и жесткого (с максимальной энергией спектра более 500 кэВ) бета-излучения.

Дозиметр позволяет: измерять мощности дозы и длительности воздействия во время кратковременного излучения от 0,03 с; измерять среднюю мощность дозы импульсного излучения при длительности импульсов от 10 нс (АТ1123); проводить дистанционные измерения с помощью выносного пульта; стационарно управлять исполнительными устройствами с использованием внешней звуковой и световой сигнализации с “сухими” контактами; организовать систему непрерывного контроля с функцией документирования данных прямо в ПК.

4. Правила техники безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения закрытого типа.

К самостоятельной работе допускаются лица не моложе 18 лет, в составе не менее 2-х человек, прошедшие ежегодное медицинское обследование, прошедшие специальный курс обучения работе на установке, имеющие (один из них) квалификационную группу по электробезопасности не ниже IV и успешно прошедшие

аттестацию по правилам радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения. Право допуска персонала к работе на ускорителе имеет руководитель лаборатории и руководитель работ.

Руководитель работ, дающий разрешение на работу лицам, впервые приступающим к работе на ускорителе, обязан лично показать ему рабочее место и ознакомить с расположением кнопок аварийного выключения ускорителя и с содержанием Инструкции по охране труда и радиационной безопасности при работе на лабораторном стенде установки АСТРА-М.

Разрешается после выключения ускорителя проводить в зале в сопровождении руководителя работ экскурсантов без спец. одежды. В соответствии с НРБ-99 ремонтники, операторы, а также сотрудники, проводящие исследования на установке, как лица, работающие с техногенными источниками, относятся к персоналу группы А.

Допуск к работе на источнике электронов лиц из сторонних организаций, командированных, студентов осуществляется так же, как и основного персонала.

Работающие на установке обязаны знать следующие основополагающие документы по радиационной безопасности:

- 1) ОСПОРБ-99/2010;
- 2) НРБ-99/2009;
- 3) МУ 2.6.1.2117-06 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100МэВ»;
- 4) Закон РФ «О радиационной безопасности населения».

5. Порядок работы на стенде

Собрать и установить конвертор в качестве выводного окна. Измерения в дальнейших пунктах нужно проводить параллельно.

5.1. Получение экспериментальных осциллограмм тока и напряжения

На данном этапе работы необходимо, применяя навыки по работе со скоростным цифровым осциллографом, получить экспериментальные осциллограммы тока и напряжения с основных узлов стенда. Следует выполнить:

1. Закрыть двери в высоковольтном зале и в пультовой комнате.
2. Зарядить емкости в генераторе импульсного напряжения ускорителя.
3. Запустить ускоритель электронов, сделать требуемое количество импульсов.
4. Получить экспериментальные осциллограммы тока электронного пучка и напряжения с диагностического оборудования ускорителя, в режиме усреднения по максимальному количеству импульсов.
5. Записать осциллограммы на USB.
6. По осциллограммам тока и напряжения рассчитать полную энергию электронного пучка, формируемого ускорителем. Коэффициент деления емкостного делителя составляет $k_{e.d.}=1200$, калибровочный коэффициент показания пояса Роговского составляет $k_{R.c.}=350 \text{ A/B}$

5.2. Исследование распределения тормозного рентгеновского излучения за конвертором ускорителя АСТРА-М.

1. Ознакомиться с принципом работы дозиметров ИД-1.

2. Произвести зарядку дозиметров ИД-1: используя зарядное устройство, установить показание платиновой нити на шкале дозиметра в положение «0».
3. Разместить 7 дозиметров на плоской пластине на расстоянии: 5 см от выводного фланца ускорителя (конвертера), на расстоянии 3,5 см между дозиметрами.
4. Произвести запуск ускорителя АСТРА-М. Произвести облучение дозиметров ускорителя в количестве 300 импульсов (частота 2 имп/сек).
5. Снять показания с дозиметров ИД-1, подвергнутых воздействию тормозного рентгеновского излучения.
6. Обнулить показания дозиметров по вышеуказанной методике.
7. Повторить измерения дозы рентгеновского излучения на указанном расстоянии дважды для набора статистики.
8. Получить среднее значение в точках измерения дозы. Данные занести в таблицу.
9. Переместить пластину в положения 10 см и, затем, 15 см от выводного фланца конвертера.
10. В каждой точке произвести замеры дозы рентгеновского излучения по пунктам 1-9 данного раздела.
11. Занести полученные данные в таблицу.
12. Построить диаграмму распределения тормозного рентгеновского излучения.

Расстояние от конвертера, см	Измеренная доза, Рад													
	Дозиметр 1		Дозиметр 2		Дозиметр 3		Дозиметр 4		Дозиметр 5		Дозиметр 6		Дозиметр 7	
5	1.1	Среднее значение	2.1	Среднее значение	3.1	Среднее значение	4.1	Среднее значение	5.1	Среднее значение	6.1	Среднее значение	7.1	Среднее значение
	1.2		2.2		3.2		4.2		5.2		6.2		7.2	
	1.3		2.3		3.3		4.3		5.3		6.3		7.3	
10	1.1	Среднее значение	2.1	Среднее значение	3.1	Среднее значение	4.1	Среднее значение	5.1	Среднее значение	6.1	Среднее значение	7.1	Среднее значение
	1.2		2.2		3.2		4.2		5.2		6.2		7.2	
	1.3		2.3		3.3		4.3		5.3		6.3		7.3	
15	1.1	Среднее значение	2.1	Среднее значение	3.1	Среднее значение	4.1	Среднее значение	5.1	Среднее значение	6.1	Среднее значение	7.1	Среднее значение
	1.2		2.2		3.2		4.2		5.2		6.2		7.2	
	1.3		2.3		3.3		4.3		5.3		6.3		7.3	

5.3. Исследование распределения тормозного рентгеновского излучения в помещении ускорителя АСТРА-М.

1. Ознакомиться с принципом работы дозиметров ДКС.
2. Измерить фоновую мощность дозы в точках, отмеченных на рисунке 9.
3. Измерить интегральную дозу, полученную от тормозного рентгеновского излучения в точках, отмеченных на рисунке 9.
4. Рассчитать фоновую дозу за 1 год.
4. Рассчитать для каждой точки дозу тормозного рентгеновского излучения за 1 импульс.
5. Рассчитать для каждой точки, при какой частоте ускорителя может работать персонал группы А и персонал, не имеющий допуск к работам на ускорителе, круглый

год.(рабочая смена ускорителя 8 часов, максимальная частота ускорителя 150имп./сек.)

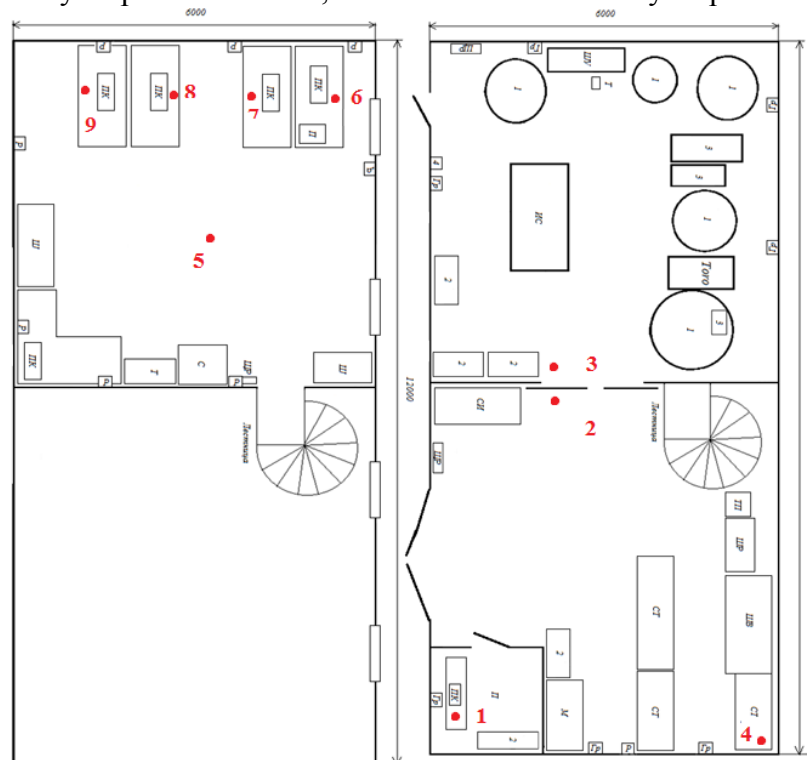


Рисунок 9 План схема 06 аудитории 11г. Красным отмечены места для измерения дозы ДКС на расстоянии 1 м от пола.

6. Оформление отчета по работе.

Отчет должен быть выполнен на компьютере и представлен в напечатанном виде и в формате Word. Он должен содержать следующие разделы.

- Список выполнивших работу.
- Описание схемы эксперимента, параметры диагностического оборудования.
- Экспериментальные осциллограммы тока и напряжения.
- Заполненную таблицу значений доз и диаграмму распределения излучения.
- Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.
- Оформить отчет. Оформленный отчет высылать на электронную почту преподавателя: Полосков А.В. – poloskow@tpu.ru

Контрольные вопросы

1. Какие виды потерь энергии ускоренного электрона обуславливают его торможение в веществе?
2. От чего зависят удельные потери энергии электронов при прохождении через вещество?
3. Во сколько раз глубина проникновения тормозного рентгеновского излучения больше пробега электронов в воде при энергии 500 кэВ?
4. Как называется энергия ускоренного электрона, при которой радиационные потери энергии сравнимы с ионизационными?
5. Дать определение поглощенной, эквивалентной, эффективной и экспозиционной дозе.

6. Какова максимально допустимая мощность дозы тормозного излучения на рабочем месте постоянного пребывания сотрудников группы А?
7. При прохождении потока рентгеновского излучения через вещество, в облученном объекте поглотилось 0,001 Дж, масса объекта 1 кг. Какова эквивалентная доза облучения объекта, если считать, что под облучение попала биологическая ткань? Во сколько раз эквивалентная доза отличается для случая при указанных параметрах для электронного и нейтронного (<5 кэВ) излучений?
8. Исходя из соотношения удельных ионизационных потерь энергии к радиационным (соотношение 3), определить, какая часть кинетической энергии ускоренного до 500 кэВ электрона перейдет в энергию тормозного рентгеновского излучения при торможении в вольфраме, тантале, молибдене.
9. Минимальная толщина конвертора из молибдена, вольфрама и тантала для электронного пучка, полученного в вашей лабораторной работе.

Рекомендуемая литература:

1. А.К.Пикаев. Современное состояние радиационной технологии.//Успехи химии.- 1995.-№6.-Т.64.- С. 609-640
2. П.Г.Власенко, В.В. Рожков. Использование рентгеновского излучения для радиационных технологий.// Вопросы атомной науки и техники. *Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (80).-2001.-№4.-С.133-136
3. А.Б.Батраков, Б.В.Середа, А.М.Егоров и др. Создание импульсного источника тормозного излучения на базе наносекундного и микросекундного ускорителей РЭП// Вопросы атомной науки и техники. *Серия «Ядерно-физические исследования»* (43). – 2004. - №2. – С.206-208
4. Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев и др. Исследование выхода тормозного излучения на сильнооточных ускорителях релятивистских электронных пучков. // Вопросы атомной науки и техники. *Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (80)- 2012.-№4.- С. 163-166