

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЕЙ ТИПА БИМ

Д. А. Кидяйкин, А. Л. Макаров, Д. М. Гришин, А. А. Лебедев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Настоящая методика устанавливает порядок подготовки и проведения измерений выходных характеристик ускорителей типа БИМ (бетатрон импульсный малогабаритный).

Безжелезные бетатроны были предложены в пятидесятых годах прошлого века А. И. Павловским [1], как альтернатива ускорителям прямого действия, для решения задачи создания мощного импульсного источника тормозного излучения [2], предназначенного для рентгенографии быстротекущих процессов [3].

В электромагните обычного бетатрона присутствует ферромагнитный сердечник, который обеспечивает концентрацию магнитного поля между полюсами электромагнита. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничивается процессом насыщения сердечника. Это приводит к нарушению условия стационарности орбиты. Для решения этой проблемы во ВНИИЭФ, под руководством А. И. Павловского, была разработана серия безжелезных бетатронов, которые выполняются без ферромагнитного сердечника. В них распределение электромагнитных полей формируется выбором определенной конфигурации системы токонесящих витков. Поэтому в безжелезных бетатронах энергия электронов в 2–3 раза больше, чем в обычных бетатронах с таким же радиусом орбиты. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничена лишь предельным током, который может быть пропущен в обмотке без ее разрушения.

Существуют и другие преимущества безжелезных бетатронов, например темп ускорения. В обычных бетатронах он ограничен вихревыми токами в сердечнике. В безжелезных бетатронах это ограничение снимается, и темп ускорения может достигать десятков кэВ за оборот.

Импульсные безжелезные бетатроны типа БИМ разработаны специально для использования в качестве источника излучения при рентгенографии быстротекущих процессов во взрывных экспериментах. Реализуется такой источник ускорением электронов до энергии в 50–70 МэВ. Мощность источника I сильно зависит от энергии ускоренных электронов (E) $I \sim E^3$, и пропорциональна количеству ускоряемых частиц. Рентгенограмма получается регистрацией теневого изображения объекта, просвечиваемого направленным пучком излучения.

Основными критериями качества ускорителя типа БИМ являются выходные характеристики, определяющие экспозиционную дозу, длительность

импульса излучения, а также размеры фокусного пятна излучателя. Относительная важность каждого из этих параметров определяется объектом исследования, скоростью процесса и требуемой точностью регистрации. Следует стремиться к получению максимальной интенсивности излучения при минимальной длительности импульса и минимальных размерах фокусного пятна (ФП).

Целью данной работы является разработка методики измерения выходных характеристик ускорителей типа БИМ.

Для достижения цели предлагаются следующие решения:

1) разработка метода измерения экспозиционной дозы тормозного излучения ускорителя прибором ИКС-А;

2) разработка метода измерения длительности импульсов излучения различных режимов работы ускорителя с помощью фотоэлектронного конвертера (ФЭК) и осциллографического регистратора;

3) разработка метода измерения размеров источника излучения с помощью камеры-обскуры и системы регистрации изображений.

Методика измерения обеспечивает диапазон измерения экспозиционной дозы тормозного излучения ускорителя от 1 до 100 Р, диапазон измеряемой длительности от 50 до 500 нс и диапазон измерения размеров источника излучения ≤ 10 мм.

Метод измерения экспозиционной дозы излучения

Из-за большого расстояния, на котором достигается электронное равновесие для квантов излучения мегавольтного диапазона, экспериментальное определение экспозиционной дозы для них практически невозможно. Поэтому для определения экспозиционной дозы жесткого тормозного излучения, измеряют поглощенную дозу в веществе и производят расчет с учетом характеристик вещества и спектрального состава излучения. Приближенно экспозиционную дозу можно рассчитать с помощью соотношения:

$$D_{\text{эксп}} = D_{\gamma} \frac{\mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{вещ}}} \exp(\mu_{0\text{вещ}} \rho d), \quad (1)$$

где D_{γ} – поглощенная доза, измеренная на глубине d ; ρ – плотность вещества; $\mu_{\text{возд}}$, $\mu_{\text{вещ}}$ – массовые коэф-

коэффициенты передачи энергии для воздуха и облучаемого вещества соответственно; $\mu_{0 \text{ вещ}}$ – массовый коэффициент ослабления для облучаемого вещества. Причем в качестве μ берутся их величины для средней по спектру излучения энергии.

Метод измерения дозы тормозного излучения основан на использовании явления термолюминесценции [4]. При облучении пластина ПСТ из алюмофосфатного стекла состава ИС-7 запасает поглощенную энергию. При нагревании ПСТ при температуре $T = 370^\circ\text{C}$ запасенная энергия освобождается в виде свечения – термолюминесценции.

Измерение поглощенной дозы излучения (в дальнейшем просто дозы) проводится с помощью прибора ИКС-А [5], где в качестве датчиков используются алюмофосфатные стекла ИС-7 (диаметр 8 мм, толщина 1 мм).

Связь дозы с результатом, полученным при измерении облученного дозиметра на измерительных пультах ИКС-А, определяется соотношением:

$$D_\gamma = f(\text{ДК}_\tau), \quad (2)$$

где D_γ , дел. – показания измерительного пульта; K_τ – коэффициент, учитывающий зависимость результата наблюдения от интервала времени τ , прошедшего от момента облучения стекол.

Стекла при проведении рабочих измерений помещаются в однородную среду, в качестве которой используется алюминиевый блок – фантом, эскиз которого показан на рис. 1.

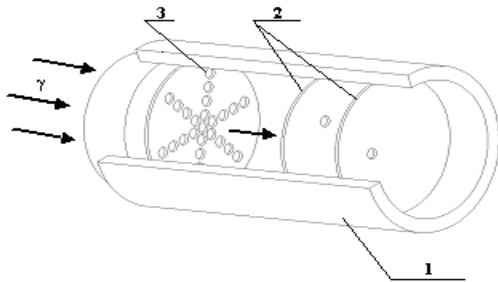


Рис. 1. Эскиз конструкции фантома: 1 – корпус, 2 – алюминиевые диски, 3 – отверстия для размещения датчиков ИС-7

Корпус фантома (1) представляет собой полый алюминиевый цилиндр диаметром $d_\phi = 136$ мм, с толщиной стенок $h = 8$ мм, длиной $a = 200$ мм. В цилиндре размещаются скрепляемые между собой до полного соприкосновения алюминиевые диски (2) различной толщины диаметром $d_d = 119$ мм. В дисках выполнены отверстия, в которые помещаются датчики ИС-7.

Фантом помещается в однородное по сечению поле, на оси источника излучения. Расстояние от источника излучения до фантома составляет 2 м. Схема измерения дозы тормозного излучения представлена на рис. 2. Глубина фантома, на которой достигается электронное равновесие, зависит от спектрального состава излучения (энергии, до которой электроны ускорятся в бетатроне).

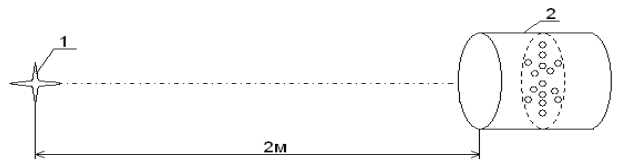


Рис. 2. Схема измерения дозы тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – тест-объект (фантом)

При исследовании зависимости дозы в фантоме от его глубины, объем цилиндра заполняется дисками с датчиками и, по положению максимума, определяется рабочая глубина. Показания датчиков расположенных на данной глубине принимаются за значения дозы, создаваемой тормозным излучением бетатрона на оси его распространения.

Метод измерения длительности импульсов излучения

При измерении длительности импульсов излучения используется сцинтилляционный конвертер, преобразующий γ -излучение в свет. В данном измерении используется ФЭК, который позволяет преобразовывать световые вспышки, возникающие при прохождении ионизирующего излучения через сцинтилляционный конвертер, в электрический сигнал. Далее при помощи электронной аппаратуры регистрируются электрические импульсы. ФЭК обычно располагается в металлическом корпусе совместно с сцинтилляционным конвертером и хорошо защищен от электромагнитных наводок. В качестве сцинтилляционного конвертера излучения используется сцинтиллятор типа ПС (полистирол), длительность высвечивания которого мала по сравнению с длительностью импульса излучения, поэтому он является техническим средством, не влияющим на результат измерения.

ФЭК располагается в однородном поле на оси излучения на расстоянии 2,5 м от источника излучения. Длительность его импульсной характеристики мала по сравнению с длительностью сигнала, поэтому он также является техническим средством, не влияющим на результат измерения. Сигнал от ФЭК регистрируется цифровым осциллографом Tektronix TDS3034C с полосой пропускания не ниже 100 МГц. Схема измерения длительности импульсов тормозного излучения представлена на рис. 3.

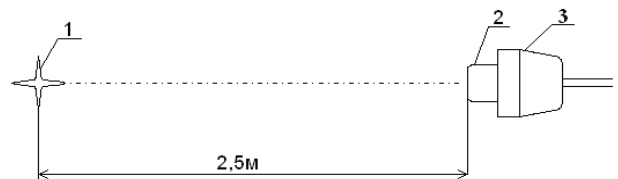


Рис. 3. Схема измерения длительности импульсов тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – сцинтилляционный конвертер, 3 – фотоэлектронный конвертер (ФЭК)

Сцинтилляционный метод имеет ряд преимуществ перед другими методами. Прежде всего, это высокая эффективность для проникающих излучений (для гамма-излучения – десятки процентов). Далее малое время высвечивания сцинтилляторов порядка 10^{-10} сек. Это обеспечивает высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных детекторов. Другими словами, позволяет работать с короткими импульсами ионизационного излучения, которые обычно генерируются в ускорительных установках. Сцинтилляционные детекторы имеют чувствительность на несколько порядков выше, чем ионизационные камеры и газовые пропорциональные счетчики.

Метод измерения размеров источника излучения

Измерения размеров источника излучения выполняются при помощи камеры-обскуры и регистратора изображения.

Камера-обскура представляет собой свинцовый корпус, внутри которого находятся танталовые или вольфрамовые диски. Ее структура представлена на рис. 4. Каждый диск имеет в центре просверленное отверстие. Диаметр отверстий уменьшается к середине устройства. Для достижения необходимой точности измерений минимальный диаметр отверстия не должен превышать 0,5 мм. В данной методике камера-обскура устанавливается на оси излучения на расстоянии 1,25 м от источника излучения. Между ними устанавливается свинцовая пластина.

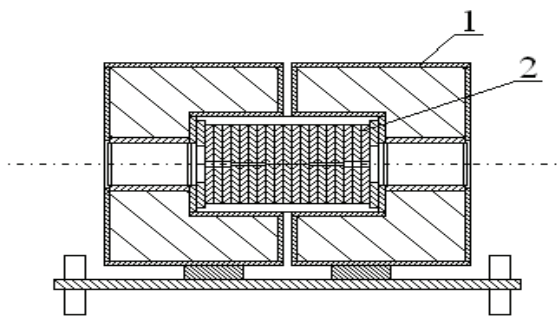


Рис. 4. Структура камеры-обскуры:
1 – свинцовый корпус, 2 – танталовые диски

В качестве регистратора используется регистрирующая кассета, структура которой показана на рис. 5. Она состоит из алюминиевого корпуса, двух танталовых пластин толщиной 1 мм и люминофорного экрана, расположенной между этими пластинами. Регистрирующая кассета размещается на расстоянии 2,5 м от источника излучения. На поверхности кассеты для контроля размеров изображения размещается шаблон, представляющий собой свинцовую пластину с размерами $10 \times 20 \times 20$ мм.

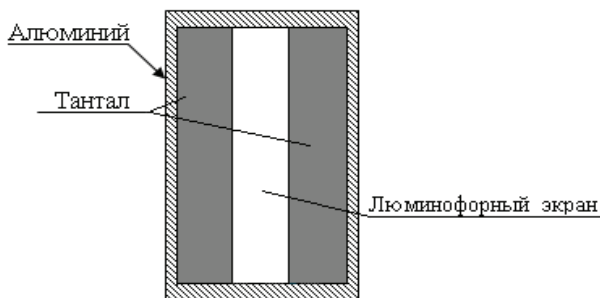


Рис. 5. Структура регистрирующей кассеты

Схема измерения размеров источника тормозного излучения представлена на рис. 6.

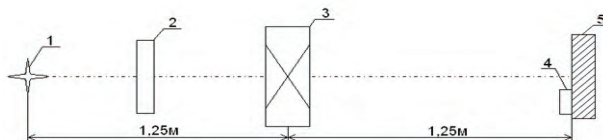


Рис. 6. Схема измерения размеров источника тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – свинцовая пластина, 3 – камера-обскура, 4 – шаблон для контроля размеров изображения, 5 – регистрирующая кассета с набором необходимых пластин

После облучения люминофорная пластина обрабатывается с помощью дигитайзера CR 30-X, предназначенного для сканирования экспонированных рентгеновских кассет с сигнальной пластиной и формирования полутонового цифрового изображения. Посредством обработки цифрового изображения определяются горизонтальный и вертикальный размеры источника излучения.

Порядок выполнения измерений

- Порядок выполнения измерения экспозиционной дозы:
 - воспроизведение импульса излучения на фантоме по команде с пульта;
 - получение результатов с дозиметра ИКС-А;
 - обработка полученных данных.
- Порядок выполнения измерения длительности тормозного излучения:
 - воспроизведение импульса излучения на ФЭК;
 - передача данных с ФЭК на осциллограф;
 - обработка полученных данных.
- Порядок измерения размеров источника излучения:
 - воспроизведение изображения камеры-обскуры на регистрирующей кассете;
 - считывание и оцифровка изображения на дигитайзере CR 30-X;

– подбор толщины свинцовой пластины таким образом, чтобы все изображение находилось в пределах линейной части диапазона чувствительности дигитайзера;

– повторно воспроизвести изображение камеры-обскуры на регистрирующей кассете, оцифровать изображение на дигитайзере CR 30-X с учетом подобранной свинцовой пластины;

– обработка полученных данных.

Обработка результатов измерений

1. Обработку результатов измерений дозы тормозного излучения следует выполнять следующим образом:

– рассчитывается коэффициент K_τ . Если измерение проводится не более чем через 24 часа после облучения, то $K_\tau = 1$. Иначе (от 1 до 20 суток) K_τ рассчитывается по формуле:

$$K_\tau = \tau^{0,03}, \quad (3)$$

где τ (сутки) – время от момента облучения до момента измерения.

Находится среднее из 4 (или более) результатов измерения для детекторов, которые стояли в одной точке поля нагружения \bar{D} , дел:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}, \quad (4)$$

где D_i , дел – результат измерения i -ого детектора; n – число детекторов в данной точке поля наблюдения.

– формула расчета дозы D_γ (формула 1) для каждого диапазона пультов ИКС-А определяется при градуировке.

– определяется погрешность вычисления дозы тормозного излучения при доверительной вероятности $P = 0,95$ в зависимости от условий облучения дозиметров и количества дозиметров в точке поля источника ионизирующего излучения. Результаты измерений оформляются записью в журнале. При записи в журнале значение дозы должно фиксироваться с точностью до одного знака после запятой с указанием порядка.

– экспозиционная доза рассчитывается по формуле 1.

2. Обработку результатов измерения длительности и тормозного излучения следует выполнять следующим образом:

– осциллографом регистрируется импульс тормозного излучения.

– определяется амплитуда импульса тормозного излучения.

– определяется длительность импульса на полувысоте.

– находится среднее из 4 (или более) результатов измерения длительности импульса на полувысоте.

3. Обработку результатов измерения размеров источника излучения следует выполнять следующим образом:

– измерения размеров источника излучения осуществляются посредством считывания информации с люминофорных экранов с помощью дигитайзера CR 30-X. Дигитайзер осуществляет считывание и оцифровку информации с люминофорных экранов с шагом 0,1 мм/пиксель. Он является основным компонентом системы оборудования, в которую кроме него входят рентгеновские кассеты со стираемыми люминофорными сигнальными пластинами и рабочая станция, на которой производится идентификация рентгеновских кассет, а также последующая обработка и отправка полученной в результате такой обработки цифровой информации. Дигитайзер CR 30-X сопряжен с отдельной рабочей станцией, на которой установлено программное обеспечение, выполняющее идентификацию кассет и обработку изображений.

– для обработки информации, полученной при сканировании люминофорных экранов с помощью дигитайзера CR 30-X, используется программный пакет для рабочей станции AGFA. Он представляет собой программную оболочку, устанавливаемую на персональный компьютер, в среде которой выполняется обработка цифровых изображений и используются специальные функции, обеспечивающие идентификацию, редактирование, печать и пересылку изображений.

– учитывая геометрию схемы метода (рис. 6), коэффициент увеличения β рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{L_2}{L_1}, \quad (5)$$

где L_1 – расстояние между источником излучения и камерой-обскурой, L_2 – расстояние между источником излучения и регистрирующей кассетой.

– на основе полученных данных рассчитываются горизонтальные и вертикальные размеры источника излучения по следующим формулам:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{R^2 - (\beta b)^2}; \\ z &= \sqrt{Z^2 - (\beta b)^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где R , Z – горизонтальный и вертикальный размеры изображения на полувысоте соответственно, b – диаметр отверстия камеры-обскуры.

Погрешности результатов измерений

1. Основная погрешность измерения дозы не превышает $\pm \left(15 + \frac{100}{N}\right)\%$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$, где N – показания стрелочного прибора. Точность измерения составляет $\pm 25\%$.

2. Основная погрешность измерения длительности импульса излучения указана без разделения ее на части (на систематическую и случайную). В технических характеристиках осциллографа Tektronix указано, что предел допускаемой абсолютной погрешности измерения длительности составляет:

$$\Delta_{\text{Осц}} = \pm(1,5 \cdot 10^{-2} \cdot t). \quad (7)$$

Относительная погрешность измерения длительности излучения рассчитывается следующим образом:

$$\delta_{\text{Осц}} = \pm \frac{(1,5 \cdot 10^{-2} \cdot t)}{t} = \pm 0,015. \quad (8)$$

3. Схема метода определения погрешности измерения размеров источника излучения выглядит следующим образом. Для начала проводятся 10 измерений размеров изображения эталонного тест-объекта программным методом. В качестве такого тест-объекта используется свинцовая пластина с размерами $10 \times 20 \times 20$ мм. Она размещается на поверхности регистрирующей кассеты. Затем полученные результаты сравниваются с реальными размерами свинцовой

пластины. На основе данного сравнения была получена погрешность измерения $\Delta = \pm 0,2$ мм.

Литература

1. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Зысин Ю. А., Герасимов А. И. Сильноточные безжелезные бетатроны // ДАН СССР. 1965. Т. 160. № 1. С. 68.
2. Богданкевич О. В., Николаев Ф. А. Работа с пучком тормозного излучения. – М.: Атомиздат, 1964.
3. Анисович К. В., Вайнберг Э. И., Кантер Б. М. и др. Рентгенотехника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. Р39 В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1980. Кн.2. С. 383.
4. Павловский А. И., Модель Б. И., Савченко В. А. и др. Применение стекол ИС-7 термолуминесцентного метода дозиметрии ИКС для исследований полей мощных фотонных излучений с энергиями ($10^{-2} - 50$) МэВ. Отчет о НИР / ВНИИЭФ, 1988.
5. Иванов В. И. Курс дозиметрии. – М.: Энергоатомиздат, 1988.