

Оценка межэлектродного напряжения в линейных ускорителях с ВЧ-фокусировкой по спектрам тормозного излучения

В.Е. Бородин, И.В. Селиверстов, В.Б. Степанов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Создателям линейных ускорителей ионов с ВЧ-фокусировкой важно знать напряжение на ускоряюще-фокусирующих электродах еще до работы ускорителя с пучком. Измерение напряжения $U_{ВЧ}$ через вводимую в резонатор ВЧ-мощность оказывается невозможным, если оконечный каскад ВЧ-генератора совмещен с секцией ускоряющей системы [1, 2]. При жестких допусках на $U_{ВЧ}$ [3] необходимо периодически аттестовывать вторичные петлевые датчики, показания которых могут искажаться процессами в самой ускоряющей системе и наводками от мощных электросистем. Диапазон измеряемых значений $U_{ВЧ}$ составляет 80÷350 кВ. В литературе [4, 5] приведены методики определения величины $U_{ВЧ}$ как результат обработки измеренного спектра тормозного излучения (СТИ), генерируемого установкой, ибо $h\nu = eU$.

В ИФВЭ апробирована методика определения $U_{ВЧ}$ по СТИ. Результаты этой работы позволили сформулировать основные требования к аппаратуре и программному обеспечению, реализующие методику измерения и обработки СТИ. Настоящая работа посвящена: созданию измерительного комплекса для проведения измерений СТИ, методике обработки аппаратурных спектров тормозного излучения с целью определения величины $U_{ВЧ}$ для действующих и разрабатываемых в отделе установок. Измерения проведены на секциях НЧУ-1,8 и С1 создаваемого ускорителя УРАЛ-30 [6].

1. Измерительный комплекс

На рис. 1 приведена схема измерительного комплекса, предназначенного для проведения измерений спектров тормозного излучения на ускорителе ЛУСИ. Состав комплекса:

- сцинтиблок в защитном коллиматоре;
- анализатор АМА-3Ф, размещенный в стойке;
- юстировочный блок на основе лазерного устройства ОГК-13 (на рисунке не показан);
- РС-286.

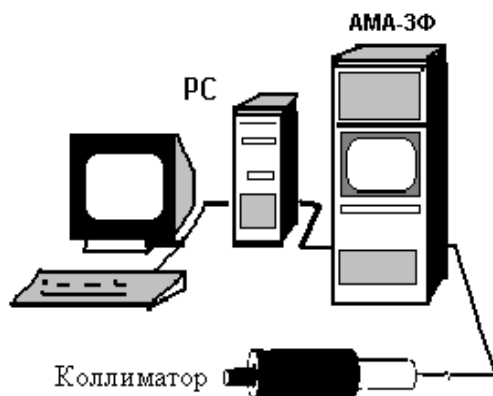


Рис. 1 Схема измерительного комплекса.

Связь между компьютером и АМА-3Ф осуществлялась через плату ПВЦ-12Ф, входящую в комплект поставки АМА-3Ф. Обработка исходных данных аппаратурных спектров проводилась на второй РС с использованием стандартных программ. Все работы по отработке методики измерений, проверке эффективности защитного кожуха с коллиматором проводились с образцовыми спектрометрическими гамма-радионуклидными источниками (ОСГИ).

2. Экран - коллиматор

Основная трудность при создании аппаратуры сводилась к созданию коллиматора с малым телесным углом. Вместе с тем необходимо было сохранить достаточную чувствительность спектрометра, чтобы время измерения тормозного спектра было разумным. Эти требования влекли за собой необходимость точной юстировки коллиматора в точке измерения спектра - перпендикулярно оси ускорителя. Необходимо было иметь достаточно "черный" коллиматор, чтобы до предела снизить вклад в измеряемый спектр фоновое излучение. При создании коллиматора было уделено внимание минимизации комптоновского рассеяния в канале самого коллиматора.

Аксиально-симметричная форма канала коллиматора рассчитана графоаналитическим методом [7]. Толщина защитного экрана коллиматора из свинца определялась из условий 500-кратного ослабления им гамма-излучения с энергией $E_\gamma = 0,5$ МэВ [8, 9].

Конструкция экрана-коллиматора комбинированная: основа конструкции – дюралевые обечайки – цилиндры, в пространство между которыми затем залит свинец. Вставки внутри кожуха – медные.

Коллимационная кривая для этого коллиматора приведена на рис. 2. Проведены измерения спектра ^{137}Cs на расчетном расстоянии $R_c = 471,5$ мм в воздухе (SP 00) и за корпусом начальной части ускорителя (НЧУ) в месте размещения элементов ускоряющей системы (SP s471). Результаты этих измерений представлены на рис. 3.

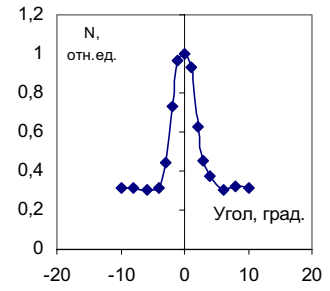


Рис. 2 Коллимационная кривая

3. Калибровка

Калибровка спектрометра ОСГИ проводилась при напряжении на ФЭУ равном 1478 В. Обработка спектра проводилась с использованием встроенной программы АМА-3Ф по определению для данной энергии гамма-квантов центра тяжести пика (ЦТП), площади под пиком ($S_{\text{пика}}$), фона, разрешения.

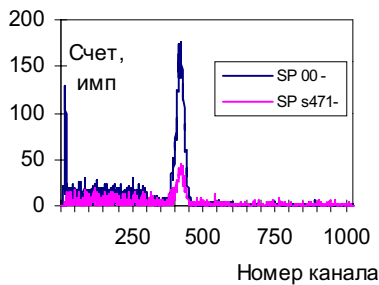


Рис. 3 Спектры Cs-137 для двух случаев измерения.

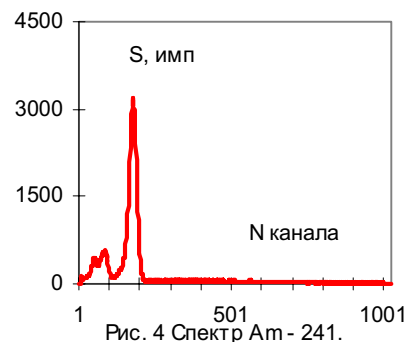


Рис. 4 Спектр Am-241.

На рис. 4 представлен спектр ^{241}Am . Спектр ^{133}Ba получен аналогичным образом. Используя пики америция и бария, построена калибровочная зависимость. Она дает калибровочный коэффициент, равный 0,3055 кэВ/канал.

4. Результаты измерений $U_{вч}$ на секциях НЧУ-1,8 и С1

На секции НЧУ-1,8 были измерены спектры тормозного излучения в 3 точках, равномерно расположенных вдоль секции, для уровней ВЧ-напряжения в диапазоне $1,2 \div 2,32$ В. Для иллюстрации приводится лишь один характерный измеренный СТИ в точке 3 при $U_{II} = 2,04$ В (рис. 5а) и его обработка (рис. 5б и в). По трем точкам вершины этого спектра определена парабола, правая ветвь которой отсекает на оси абсцисс отрезок, соответствующий максимальному напряжению на электродах в точке 3, равному 85,0 кВ.

Весь массив результатов измерений сгруппирован на графике рис. 6 как зависимость $U_{\phi\pm} = f(U_{II})$ в точках измерения 1, 2, 3. Как и ожидалось, зависимости представляют собой прямые, проходящие через начало координат. Правда, ожидалась одна прямая, а не три, поскольку в [6] произведена настройка канала на

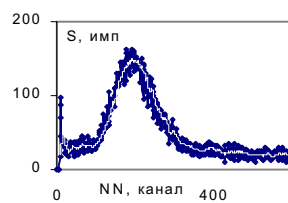


Рис.5а. Измеренный спектр SP103

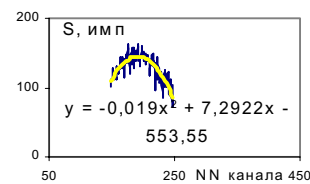


Рис.5б. Определение коэффициентов параболы

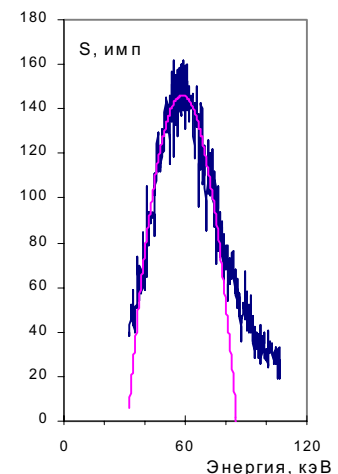


Рис. 5в. Определение $U_{вч}$ по спектру SP103

$U_{ВЧ} = \text{const}$ на отрезке между точек 1–3. Используя семейство прямых рис. 6, на рис. 7 построены зависимости $U_{ВЧ} = f(L)$ для уровней по петлевому детектору 1,6; 2,0 и 2,4 В.

Из приведенных зависимостей следует, что напряжение падает к концу ускоряющего канала секции. Величина спада значительна и зависит от уровня ВЧ, т.е. от режима оконечного каскада. С точки зрения радиотехники, анодная цепь оконечного каскада представляет собой колебательный контур, связанный с резонатором секции. Емкость колебательного контура зависит от режима каскада. Если этот контур сильно расстроить, то наклон $U_{ВЧ}$ исчезает. Для устранения наклона $U_{ВЧ} = f(L)$ (а он приводит к 20%-му росту эмиттанса пучка, как показали расчеты динамики частиц), видимо, придется изучить создавшееся положение.

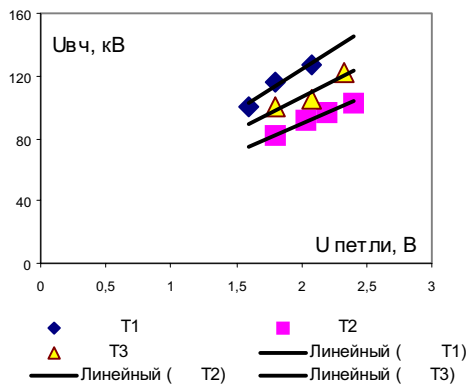


Рис. 6 Зависимость $U_{ВЧ}=F(U_{п})$.

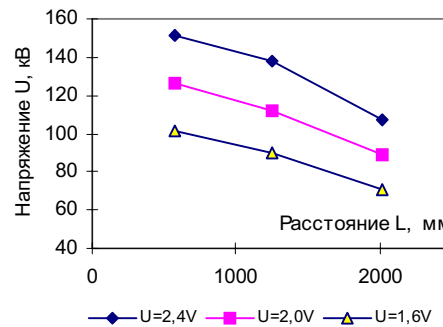


Рис.7. Зависимость $U_{ВЧ} = F(L)$ для различных значений $U_{петли}$.

Аналогичные измерения были проведены на секции С1. Они показали, что измеряется напряжение только на квадрупольном зазоре. На электродах, находящихся под суммарным напряжением, напряженность на поверхности недостаточна для эмиссии электронов и, следовательно, для рентгеновского излучения.

Заключение

Создан комплекс для измерения спектров тормозного излучения, отработана методика обработки этих спектров для определения ВЧ-напряжения, приложенного к электродам ускорителя.

Выполнено измерение ВЧ-напряжения на двух секциях (НЧУ-1,8 и С1) линейного ускорителя, создаваемого для ускорительного комплекса ИФВЭ. Результаты этих измерений показали удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных величин.

Проведенная работа показала, что:

- в секции НЧУ-1,8 имеется наклон ВЧ-поля, связанный с установкой ВЧ-генератора непосредственно на корпус секций;
- среднеквадратичная погрешность измерения ВЧ-напряжения составила $\pm 5\%$ (максимальная величина погрешности $\pm 17\%$).

Работа позволяет сделать предложение о расширении функций измерительного комплекса. Замена датчиков позволяет измерять мощность дозы рентгеновского и нейтронного излучения. Оснащение секций ускорителя устройствами для перемещения соответствующих датчиков позволит оперативно определять распределение $U_{ВЧ}$ и P_X вдоль секций. Это, в свою очередь, позволит поддерживать заданное и аттестованное распределение $U_{ВЧ}$ вдоль секции, контролировать степень загрязнения электродов и места потерь пучка.

Авторы благодарят сотрудника ИЯР ФНЦ «Курчатовский институт» В.К.Папина за помощь в организации проведения экспериментов и за обсуждении результатов работы, сотрудников ОРИ ГНЦ ИФВЭ В.А.Пикалова и В.С.Луканина за помощь в подготовке аппаратурного парка и программного обеспечения для обработки полученной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Боровиков и др. – В трудах XII ВС по УЗЧ, т. 2, с. 120
2. Stepanov et al. Acceleration of Polarized Proton to 1 TeV in Fermilab Tevatron. // Progress report of SPIN Collaboration, USA, 1994, p. 37 - 50.
3. Жеребцов и др. – Препринт ИФВЭ 90 - 29, Протвино, 1990.
4. Volme et al. – In the Proceedings of the 1990 Linear Accel. Conf. USA, Albuquerque, New Mexico, Los-Alamos, 1991, p. 219.
5. Ю.Н. Гавриш. и др. – В трудах XVI Совещания по УЗЧ, Протвино, 1994, т. 3, с. 5.
6. О.К. Belyaev et al. – Proceedings of 2000 Linear Accel. Conf. (to be published).
7. О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. Справочник по ядерной физике. – Наукова думка, Киев, 1975.
8. Н.А. Вартанов, П.С. Самойлов. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия. – Атомиздат, М., 1972.
9. Л.Р. Кимель, В.П. Машкович. Защита от ионизирующего излучения. Справочник. – Атомиздат, М., 1972.