

УДК 539.1

А. С. Следнева, В. В. Кобец**Исследования энергетических характеристик ускоренного пучка электронов после первой ускоряющей станции ускорительного стенда Объединенного института ядерных исследований**

В рамках работ по созданию Тестового стенда с электронным пучком на основе линейного ускорителя с энергией до 250 МэВ в лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ ведутся работы по созданию линейного ускорителя электронов на базе ускорителя LINAC-800, привезенного из Нидерландов. Эти работы проводятся для исследования свойств ускоряющих структур, для использования пучка электронов в лазерах на свободных электронах, тестирования кристаллов BaF_2 и CsI с целью их применения в детекторах частиц и других работах. В настоящее время запущены и работают на пользователей две ускорительные станции ускорителя с энергией пучка 60 МэВ, ведутся работы по проводке пучка через ускоряющие секции 3-й ускорительной станции. Для обеспечения пользователей нужными им параметрами ускоренного пучка проводятся исследования характеристик пучка. Целью данной работы является исследование энергетических характеристик ускоренного пучка электронов при разных уровнях высокочастотной мощности, вводимой в ускоряющую секцию, отработка методики и экспериментальное подтверждение того, что данный электронный ускоритель обладает пучком достаточно низкой интенсивности и подходит для проведения испытаний кристаллических образцов разного типа.

Ключевые слова: линейный ускоритель электронов, электронный пучок, магнитный анализатор, клистрон, ускоренный ток.

Об авторах

Следнева Анна Сергеевна – магистрант кафедры ядерной физики Государственного университета «Дубна». 141982 Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, кафедра ядерной физики. E-mail: Ekaterinburger23@gmail.com.

Кобец Валерий Васильевич – кандидат технических наук, начальник сектора научно-экспериментального отдела инжектора и кольца Нуклотрона лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. E-mail: vkobets@jinr.ru.

В рамках работ по созданию Тестового стенда с электронным пучком на основе линейного ускорителя электронов с энергией до 250 МэВ в Объединенном институте ядерных исследований создается линейный ускоритель электронов на базе ускорителя ЛИНАК – 800, привезенного из Нидерландов. В настоящее время запущены и введены в эксплуатацию две ускорительные станции с энергией пучка 60 МэВ, ведутся работы по проводке пучка через ускоряющие секции 3-й ускорительной станции. На данный момент ускорительный стенд используется для тестирования кристаллов BaF_2 и CsI с целью их применения для детекторов частиц в экспериментах $Muon\ g-2$, $Mu2e$, Comet, подготовка которых требует детального исследования свойств детекторов, например, их облучения на пучках ускорителей.

Общими проблемами таких исследо-

ваний является высокая интенсивность пучка ускорителей, приводящая к наложениям сигналов от многих ускоренных частиц. Для устранения такой проблемы важно иметь возможность получать пучки ускоренных частиц с низкой интенсивностью (несколько десятков или сотен электронов в секунду), что позволяет регистрировать отклик детектора на единичную падающую частицу.

Исследования свойств кристаллов проводятся на различных ускорителях на пучках электронов или фотонов в разных научных центрах мира (Стэнфорд, США), Специальный тестовый канал в ИНФН (Фраскати, Италия), электронный ускоритель МАМИ (Майнц, Германия), но они работают на достаточно больших энергиях (от 100 МэВ до ГэВ).

Установка ОИЯИ имеет нижнюю границу в несколько МэВ, что выгодно отличает ее от рассмотренных выше. Исследования, планируемые на данном пучке, дадут деталь-

ную информацию о параметрах одиночных кристаллов при энергиях от единиц МэВ до нескольких десятков МэВ (20–25 МэВ).

Целью данной работы является исследование энергетических характеристик ускоренного пучка электронов на разных уровнях высокочастотной мощности, отра-

ботка методики и экспериментальное подтверждение того, что данный электронный ускоритель (рис. 1) обладает пучком достаточно низкой интенсивности и подходит для проведения испытаний кристаллических образцов разного типа.



Рис. 1. Линейный ускоритель электронов ОИЯИ

В работе были поставлены следующие задачи исследований. Во-первых, это изучение методики измерения энергии пучка с помощью магнитного анализатора. Во-вторых, калибровка магнитного анализатора. Далее были измерены энергетические зависимости ускоренного пучка электронов и проведена обработка результатов измерений.

Структурно линейный ускоритель состоит из инжектора и 7 ускоряющих секций [1; 4]. Электронный инжектор состоит из электронной пушки, чоппера, пребанчера и банчера (рис. 2).

Банчер – короткая секция ускоряющей структуры, предназначенная для группировки пучка. На вход банчера подаётся СВЧ – мощность около 2 МВт от первого клистроны. С выхода банчера мощность через фазовращатель идет на первую короткую ускоряющую структуру А0ВВ. Банчер и короткие ускоряющие секции (3,67 м) находятся в соленоидальном поле величиной около 500 Гс. Длинные секции (7,35 м) работают без магнитного поля [2; 5].

Четыре ускорительные станции (А01 – А04) включают в себя источники ВЧ-мощности (клистроны с модуляторами), СВЧ-фидеры и ускоряющие структуры (сек-

ции + дрейфовые участки). Ускоряющие секции – волноводные.

Энергетический спектр пучка заряженных частиц является одним из основных параметров ускорителя. Основным параметром спектрометров является разрешающая способность, которая определяет способность измерителя разделять частицы с различными импульсами, т.е. разрешать близко расположенные линии спектра. На практике чаще используют обратную величину, которая называется разрешением и выражается в процентах. Она и определяет погрешность измерения [3].

В данной работе был использован магнитный спектрометр. Магнитные спектрометры являются наиболее распространенными приборами для точных измерений максимальной и средней кинетической энергии, энергетического спектра пучков заряженных частиц. Их можно использовать при любых энергиях частиц, получаемых на ускорителях, а разрешение достигает 0,001%.

Перед началом измерений энергии ускоренного пучка электронов были измерены параметры поворотного магнита (рис. 3): радиус поворота и зависимость магнитного поля магнита от тока в обмотках (рис. 4а). Радиус вычислили из геометрии магнита. Угол поворота магнита $\alpha = 45^\circ$.

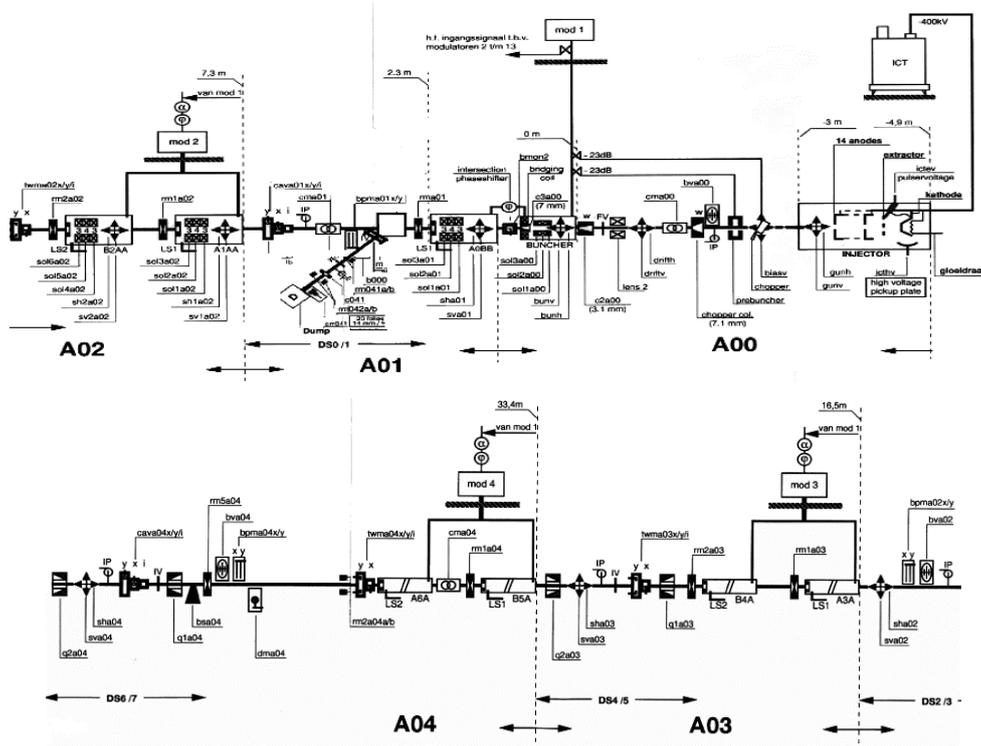


Рис. 2. Схема линейного ускорителя электронов ОИЯИ

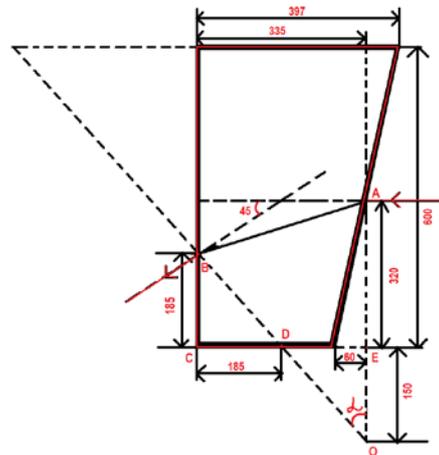
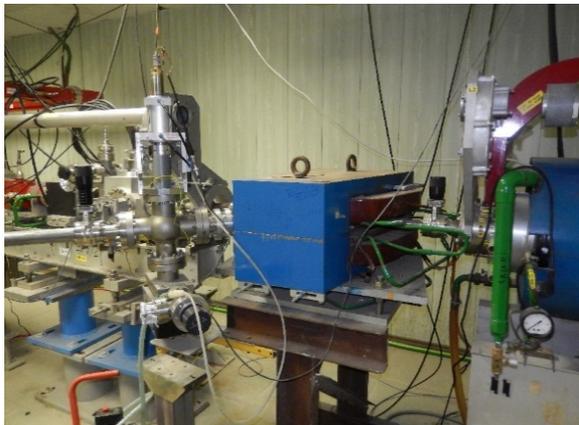


Рис. 3. Поворотный магнит и его геометрия

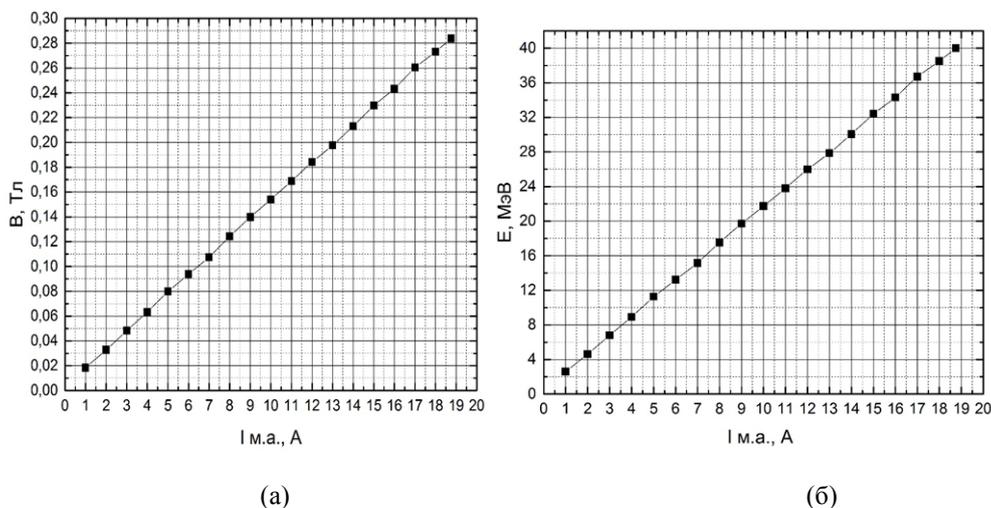


Рис. 4. Зависимость поля магнита от тока в обмотках магнита (а), зависимость энергии ускоренных электронов от тока в обмотках магнита (б)

По формуле (1), зная поле магнита, можно вычислить энергию ускоренного пучка. На рис. 4б приведена зависимость энергии ускоренного пучка электронов от тока магнита.

$$E = 300 BR. \quad (1)$$

Поскольку ускоритель пока не выведен в штатный режим и проводятся пусконаладочные работы, еще не достигнут проектный ток ускоренного пучка ~50 мА. Все работы проводятся при токе на выходе первой ускоряющей секции около 15 мА.

Перед началом измерений зависимости энергии ускоренного пучка от уровня вводимой мощности в ускоряющую секцию ускоритель был настроен на максимальный ток ускоренного пучка.

Мощность, вводимая в ускоряющую секцию, была максимально возможной. Больше нельзя было ввести, т.к. начинались пробои в секции. Энергия инжекции во время измерений была 400 кВ, и этот уровень контролировался. Измерения энергии ускоренного пучка начались при токе клистрона 90 А и проводились для значений тока клистрона 80 А, 70 А, 60 А и 50 А (таблица). Измерения проводились следующим образом. При установленном токе клистрона изменялся ток в обмотках магнита и измерялся ток пучка на токоприемнике после магнита. Ток пучка измерялся с помощью осциллографа. Измерялась амплитуда импульса тока пучка в милливольтгах.

Измеренные значения

I клистрона = 90А		I клистрона = 80А		I клистрона = 70А		I клистрона = 60А		I клистрона = 50А	
I м.а., А	I пучка, мВ								
9,2	40	8,6	48	7,7	30	5,7	15	4,5	5
9,4	130	8,9	130	7,8	100	6,3	40	4,9	12
9,7	250	9,1	240	8	160	6,5	100	5,2	20
10,2	230	9,3	230	8,1	180	6,8	170	5,5	40
10,4	160	9,6	210	8,5	160	7,1	140	5,7	43
10,6	100	9,8	170	8,7	150	7,3	70	6	35
10,8	30	9,9	140	9	50	7,5	20	6,2	25
		10	40	9,3	18			6,3	5

Ниже приведена зависимость мощности клистрона от тока клистрона, взятая из паспортных данных клистрона (рис. 5а).

Результаты измерений энергии пучка были пронормированы, по ним построены

спектры для различных уровней мощности, которые приведены на рис. 5б.

Зависимость энергии ускоренного пучка от уровня вводимой мощности приведена на рис. 6а.

Также были проведены измерения спектров ускоренного пучка в зависимости от энергии инжекции при постоянном уровне мощности, вводимой в ускоряющую секцию (рис. 6б).

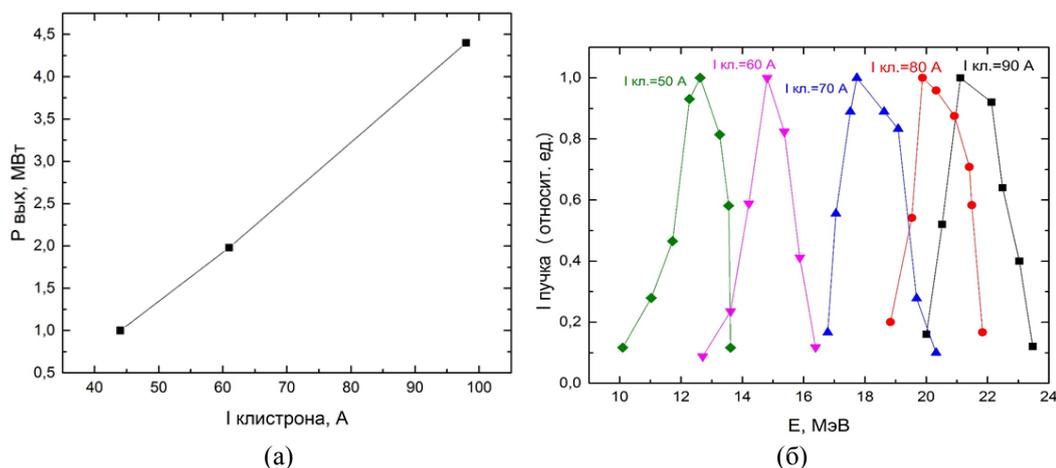


Рис. 5. Зависимость выходной мощности клистрона от тока клистрона (а), спектры ускоренного пучка электронов для разных уровней мощности (б)

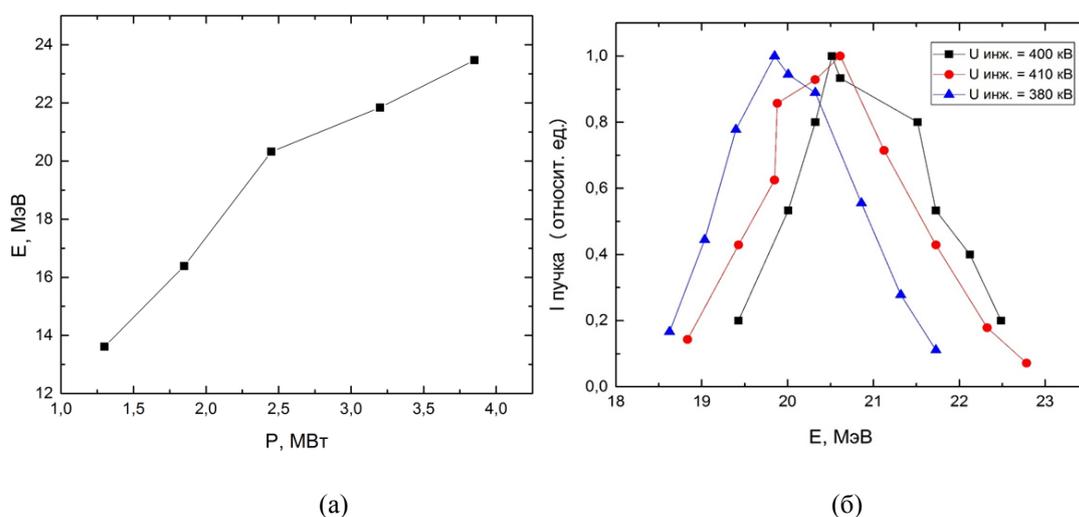


Рис. 6. Зависимость энергии пучка электронов от уровня мощности в ускоряющей секции (а), спектры ускоренного пучка при разных уровнях инжекции и постоянстве уровней вводимой мощности (б)

Проведение прецизионных экспериментов накладывает требование на высокое энергетическое разрешение калориметра, поэтому исследования кристаллов должны проводиться в пучках ускорителей с низкими фоновыми нагрузками. Таким образом, для проведения испытаний кристаллических образцов разного типа необходим электронный

пучок низкой интенсивности (несколько десятков или сотен электронов в секунду), что исключит наложение сигналов от нескольких частиц и позволит регистрировать отклик детектора на единичную падающую частицу.

В результате проделанной работы были сняты спектры ускоренного пучка электронов для различных уровней вводимой

мощности. По этим спектрам построена зависимость энергии ускоренного пучка от уровня вводимой мощности, что дает возможность при работе на пользователей пучка сразу устанавливать нужную энергию, не проводя измерений энергии, что не всегда возможно. Оценки разброса энергии на полувывоте спектральных кривых показывают, что разброс порядка 11–12%.

Эти измерения были проведены на ускорителе впервые после его монтажа и физического пуска. Из них видно, что ускоритель работает достаточно хорошо, но проектные параметры ещё не достигнуты и нужно форсировать работы по включению чоппера и работы по вводу диагностики пучка. Однако, несмотря на это, ускоритель может работать на потребителей пучка и обеспечивать их ускоренным пучком элек-

тронов с энергией до 23–24 МэВ и током до 15 мА.

Библиографический список

1. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
2. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Arzumanian G., Balalykin N., Kobets V. et al. Konceptual Design Report. Dubna, 2001.
4. Kroes F.B. Electron Linac MEA, Compendium of Scientific Linacs, LINAC'96. 1996.
5. Kroes F.B. et al. Improvement of the 400 kV Linac Electron Source of AMPS // Proc. of EPAC'92. 1992. P. 1032.

*Поступила в редакцию
23.09.2016*