

УСКОРИТЕЛЬ ЛУЭ-200 УСТАНОВКИ ИРЕН: СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ

*Ю. Бечер^a, Е. А. Голубков^a, В. А. Егоров^a,
Ю. К. Зайцева^a, В. Н. Замрий^a, А. С. Каюков^a,
В. В. Кобец^a, А. Ж. Корокин^a, В. Ф. Минашкин^a,
В. Г. Пятаев^a, А. Н. Репкин^a, А. В. Скрыпник^a,
А. П. Сумбаев^{a, 1}, К. В. Удовиченко^a, В. Г. Шабратов^a,
В. А. Швец^a, В. Н. Швецов^a, В. М. Павлов^b*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

Представлена общая схема, и описано существующее состояние линейного ускорителя электронов с ускоряющей структурой на бегущей волне 10-см диапазона ($f = 2856$ МГц) — драйвера импульсного источника нейтронов ИРЕН в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований, приведены параметры ускоряющей системы ЛУЭ-200 и измеренные параметры пучка электронов: ток пучка в импульсе, длительность импульса тока, частота циклов, спектр энергий пучка электронов, нагрузочная характеристика ускоряющей структуры. Сообщается о начале реализации проекта второй очереди установки ИРЕН, в основе которого развитие ускорителя с целью увеличения мощности пучка. Обсуждаются технические решения, положенные в основу модернизации электрофизических систем ускорителя: ускоряющей системы, системы источников СВЧ-мощности, модуляторов.

The general scheme and current status of the electron linear accelerator with an S-band travelling wave ($f = 2856$ MHz) accelerating structure — driver for a pulsed neutron source (IREN) at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research are presented. The parameters of the accelerating system and the measured parameters of the electron beam: pulse beam current, duration of the current pulse, repetition rate, electron energy spectrum, loading characteristics of the accelerating structure are given. The beginning of the implementation of the project of the second stage of the IREN facility, which forms the basis for the development of the accelerator aimed at increasing its beam power, is reported. The technical solutions underlying the modernization of the accelerator electrophysical systems are discussed: accelerating system, RF power supplies, modulators.

PACS: 29.20.Ej

¹E-mail: sumbaev@nf.jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В январе 2009 г. В Лаборатории нейтронной физики осуществлен физический пуск первой очереди Источника РЕзонансных Нейтронов (ИРЕН), предназначенного для фундаментальных и прикладных исследований в области нейтронной ядерной физики методами прецизионной нейтронной спектроскопии в диапазоне энергий нейтронов от электронвольт до сотен килоэлектронвольт [1]. В основе концептуальной схемы источника нейтронов используется линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 с ускоряющей структурой на бегущей электромагнитной волне 10-см диапазона ($f = 2856$ МГц). Источником нейтронов является массивная мишень (фотомишень), изготовленная из материала с высоким атомным номером (W), излучающая потоки фотонейтронов под воздействием импульсного пучка электронов, ускоренных в ЛУЭ-200. Схема ускорителя с энергией пучка до 200 МэВ и средней мощностью пучка ~ 10 кВт, состоящего из двух ускоряющих секций (рис. 1), предложенная Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН [2], реализуется в два этапа. На первом этапе создана первая очередь — полномасштабный ускоритель, состоящий из одной ускоряющей секции с постоянным импедан-

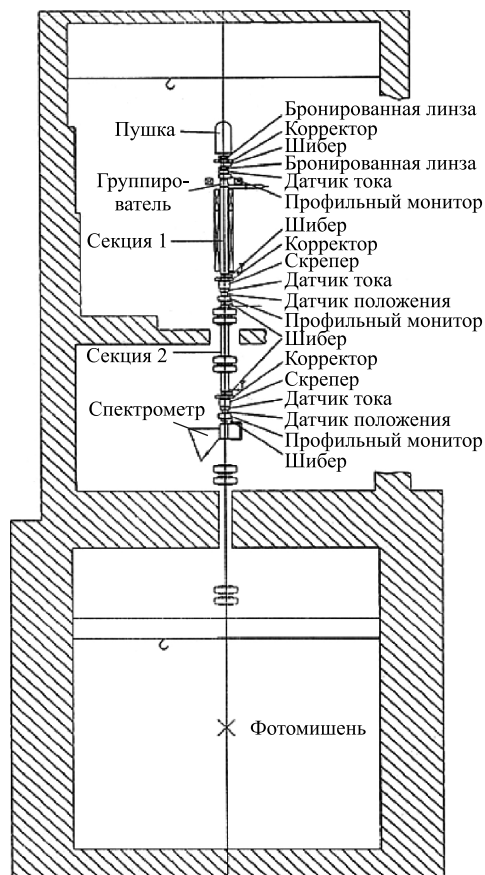


Рис. 1. Концептуальная схема ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН [2]

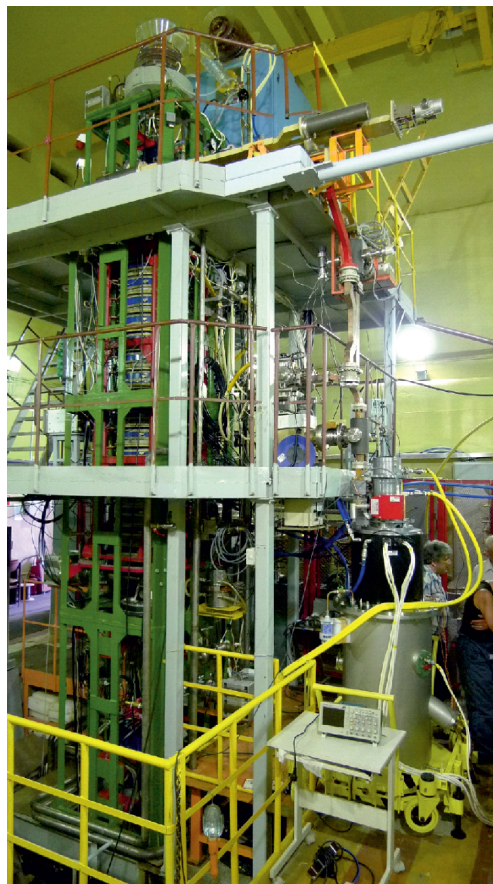


Рис. 2. Общий вид ускорителя

сом, запитанной от одного клистрона с системой умножения мощности SLED. Вместо второй секции установлена труба дрейфа со всеми штатными элементами фокусировки и коррекции пучка. Так называемая первая очередь ускорителя, его параметры и характеристики пучка подробно представлены в работе [3]. Общий вид ЛУЭ-200 приведен на рис. 2.

Первый пучок электронов на ускорителе был получен в июне 2008 г., первые нейтроны на мишени установки ИРЕН произведены в декабре 2008 г. В феврале 2009 г. начата регулярная работа ускорителя при частоте циклов 5–10 Гц, в мае 2010 г. — при частоте 25 Гц. В общей сложности «на мишень», т. е. на эксперимент, к середине 2013 г. ускоритель отработал более 3200 ч.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ УСКОРИТЕЛЯ

Из-за дефицита клистронов 5045 SLAC, предусмотренных проектом, в первой очереди ускорителя одна ускоряющая секция запитана от одного клистрона TH2129 («Thomson») с номинальной выходной импульсной мощностью 20 МВт. При этом вследствие снижения мощности источника СВЧ-мощности проектная мощность пучка снижена до ~ 3 кВт. В процессе реализации проекта ряд параметров установки был изменен. Из-за ограничений в системе питания модулятора электронной пушки [4, 5] цикличность работы ускорителя снижена до 25 Гц, а для повышения разрешающей способности времяпролетных нейтронных спектрометров длительность импульса пучка была сокращена с 250 до 100 нс. Средняя мощность пучка электронов составила 0,13 кВт для пучка со средним током в импульсе 1,5 А и 0,2 кВт для пучка с током 2,5 А.

Для сравнения в табл. 1 приведены первоначальные проектные параметры ускорителя, проектные параметры, скорректированные для сборки из одной ускоряющей сек-

Таблица 1. Параметры ускорителя ЛУЭ-200

Параметр	Проект ИЯФ 1993 г.	Проект 1-й очереди	Ожидание 1-й очереди	Реализация 1-й очереди
Количество ускоряющих секций	2 (2 клистрона)	1 (1 клистрон)	1 (1 клистрон)	1 (1 клистрон)
Тип клистрона, мощность клистрона, МВт	5045 SLAC 67	5045 SLAC 67	TH2129 Thomson 20	TH2129 Thomson 17
Максимальная энергия электронов, МэВ	212	106	57	32–42
Средний ток пучка в импульсе, А	1,5	1,5	1,5	1,5–2,5
Длительность импульса тока, нс	250	250	250	100
Частота циклов, Гц	150	150	150	25
Средняя мощность пучка, кВт	≈ 12	≈ 6	3,2	0,13–0,2

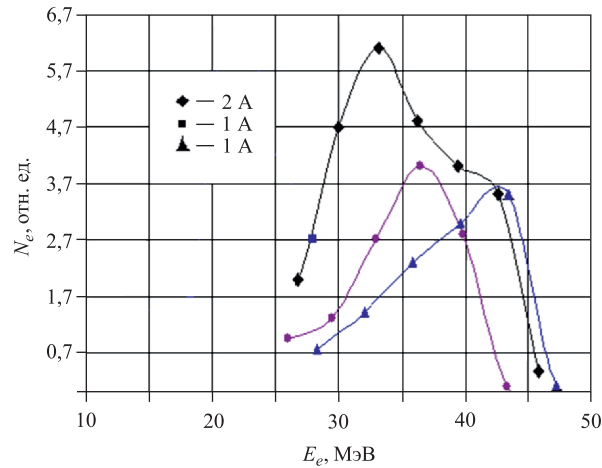


Рис. 3. Спектры энергий пучка первой очереди ускорителя, измеренные при различных токах пучка

ции, запитываемой от клистронов различной мощности, и параметры ускорителя, полученные при работе первой очереди в режиме регулярной работы. Величина энергии электронов, указанная в таблице для проектных значений и для ожидаемых значений первой очереди, определена скейлингом в соответствии с зависимостью энергии частиц, ускоренных в структуре с бегущей волной, от СВЧ-мощности, поданной в структуру от клистрона: $E \sim (P_{\text{кл}})^{1/2}$. С учетом этой зависимости при использовании клистрона ТН2129 ожидалось получение максимальных значений энергии электронов до 57 МэВ, однако в реально измеренных энергетических спектрах пучка (рис. 3) величины максимальных значений энергий оказались, в зависимости от величины ускоренного тока, равными 33–42 МэВ. Это отчасти можно объяснить тем, что в рутинных эксплуатационных режимах клистрон ТН2129 использовался не на полную мощность. Если принять во внимание, что в рутинном для ускорителя режиме от клистрона ТН2129 «отбирается» СВЧ-мощность не более 17 МВт, верхняя граница энергетического спектра должна снизиться до 52 МэВ, что все же оказывается выше измеренных значений.

Более важным фактором, определяющим снижение энергетических характеристик пучка, ускоренного в структуре с бегущей волной, является «подгрузка» структуры пространственным зарядом пучка. В физическом обосновании проекта ускорителя [2] возможные энергетические потери пучка от подгрузки ускоряющей структуры пучком оцениваются в 10–20% в зависимости от тока пучка. В работе [6] произведены расчеты эффекта подгрузки для ускоряющей структуры с постоянным градиентом в зависимости от длительности импульса тока пучка. Для структуры с параметрами, аналогичными параметрам ускоряющей секции ЛУЭ-200, при длительности тока пучка 100 нс расчетная «подгрузка» составила более 15 МэВ. «Нагрузочная характеристика» ускоряющей секции ЛУЭ-200, измеренная на начальном этапе работы [3], — зависимость положения максимума спектра энергий пучка от величины тока ускоренного пучка — также имеет падающий характер. При увеличении тока пучка от 0,7 до 2,6 А снижение энергии пучка достигало 9–10 МэВ. Таким образом, можно предположить, что отличие измерен-

ных энергетических характеристик от ожидаемых в значительной степени объясняется нагрузкой секции увеличенным током ускоренного пучка.

Оценки интегрального выхода нейтронов из фотомишени, выполненной из вольфрама, произведенные по измерению плотности потока нейтронов различными методами на расстоянии 10 м от мишени, дают значение $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Плотность потока нейтронов на самой короткой пролетной базе (10 м), доступной для экспериментов, составляет $(2,4-4) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Результаты экспериментов, выполненных на нейтронных пучках установки ИРЕН, представлялись на международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами ISINN [7].

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Главной целью развития линейного ускорителя является повышение эффективности установки как источника нейтронов, т. е. увеличение выхода нейтронов за счет возрастания средней мощности пучка электронов путем увеличения энергии электронов и повышения цикличности работы. Основные ориентиры для развития ускорителя до второй очереди представлены проектными параметрами 1993 г. в табл. 1, но их реализация, как и ранее, рассматривается вариантным образом в зависимости от имеющихся в наличии возможностей.

Общая концепция развития ускорителя представлена схемой на рис. 4. Базовое решение основано на развитии ускоряющей системы — увеличении числа ускоряющих секций до двух с соответствующим увеличением числа источников СВЧ-мощности — клистронов и модуляторов. Кроме этого, базовое решение должно быть дополнено заменой клистронов на более мощные как по импульсной, так и по средней выходной мощности и, соответственно, заменой модуляторов с увеличением их мощности, а также модернизацией электронной пушки.

Вторая ускоряющая секция, предусмотренная для установки проектом, является полным аналогом первой ускоряющей секции. Характеристики ускоряющей секции, разработанной и изготовленной в ИЯФ СО РАН, представлены в работе [8]. В тестовых экспериментах, проведенных на типовых секциях инжекторного участка ускорительного комплекса ВЭПП-5 при ускорении пучка с током $\sim 1 \text{ А}$ длительностью 15 нс, получены ускоряющие градиенты до 45 МВ/м [9]. Установка второй секции сопровождается установкой второго СВЧ-фидера, подводящего СВЧ-мощность от клистронов, вместе с системой умножения СВЧ-мощности SLED [10]. Дополнительное ускорение пучка во второй секции должно обеспечить прирост энергии частиц пучка, сравнимый с энергией, полученной пучком в первой секции.

В первой очереди ускорителя в качестве модулятора М350 — источника питания высоковольтного импульсного напряжения для клистронов — применялась установка «Оливин-СУ», использующая для получения зарядного напряжения формирующей линии (40–46 кВ) высоковольтный выпрямитель ВС-25/5 (25 кВ, 5 А) с последующим удвоением напряжения путем разряда накопительной емкости на емкость формирующей линии через зарядный индуктивный дроссель. Устаревшая элементная база и недостаточная мощность выпрямителя ограничивают возможности использования модулятора М350 для работы с большой цикличностью. В новой версии модулятора [11] для зарядки

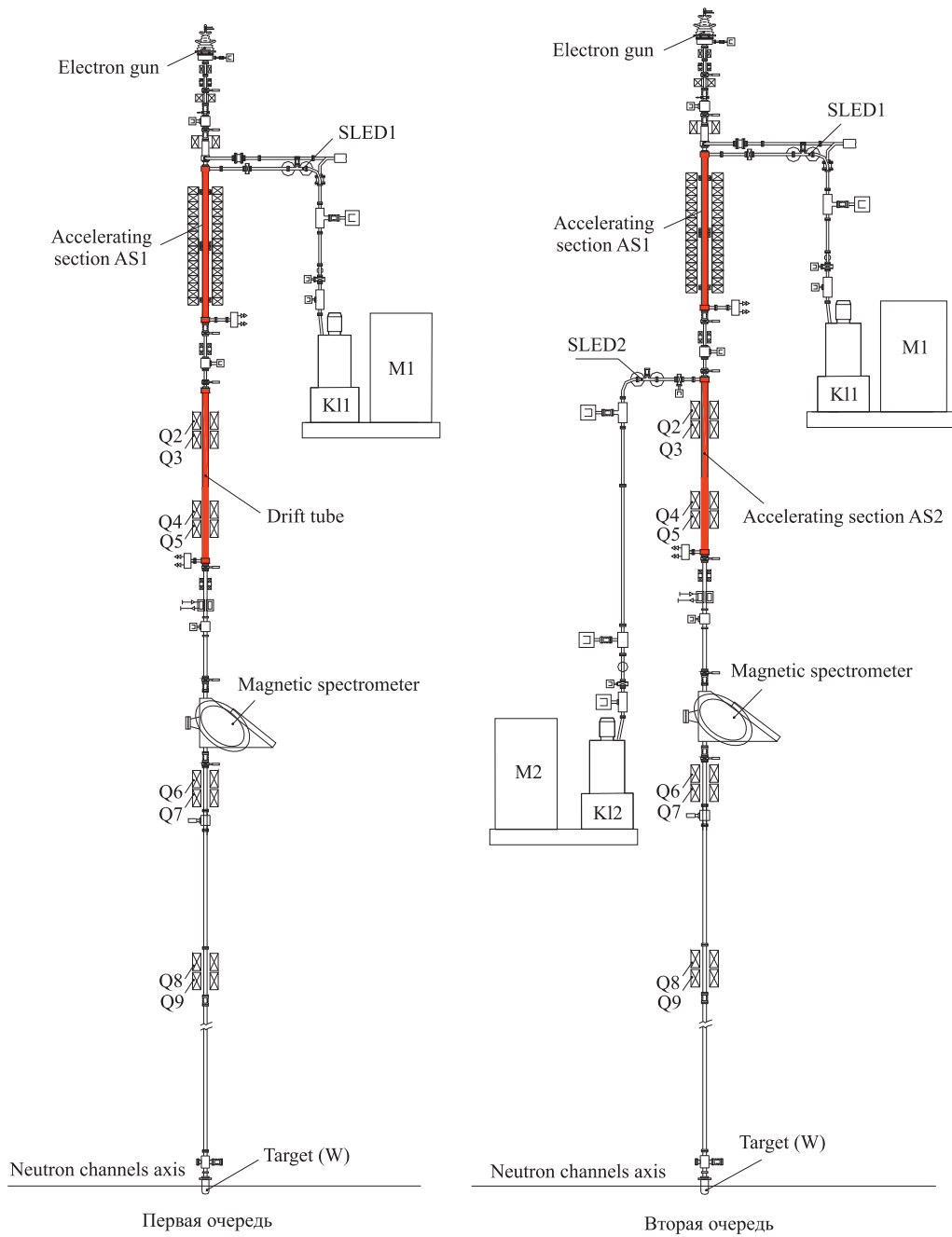


Рис. 4. Схема развития ускорителя

формирующей линии предложено использование мощных высоковольтных специализированных источников инверторного типа.

Новый модулятор будет формировать в нагрузке высоковольтные импульсы с напряжением до 23 кВ, импульсной мощностью до 180 МВт с частотой циклов до 120 Гц. Отличительной особенностью нового модулятора должна стать возможность перестройки параметров в определенных пределах для согласования с нагрузкой, величина которой может меняться в зависимости от величины импеданса использованного клистрона (изменения импеданса в диапазоне 800–880 Ом).

Ключевыми элементами, определяющими возможности повышения энергоемкости ускоренного пучка, являются источники СВЧ-мощности — клистроны. Их выходные параметры по импульсной мощности определяют темп ускорения, т.е. набор энергии пучка, а значение максимальной выходной средней мощности определяет возможности по максимальной частоте циклов работы. В табл. 2 представлены параметры клистронов 10-см диапазона (2856 МГц), которые могут быть использованы на ускорителе как адекватные предъявленным требованиям по выходной импульсной и средней мощности.

Наиболее предпочтительными из представленных в табл. 2 клистронов для использования на ускорителе ЛУЭ-200 как по импульсной, так и по средней мощности являются клистроны 5045 SLAC. Однако вследствие высокой коммерческой стоимости эти клистроны пока все еще имеют ограниченное распространение. Клістроны, разработанные и предлагаемые на рынке японскими (TETD, «Mitsubishi») и китайской («Hubei Hanguang Technology Co., LTD») компаниями, уступают клистроном 5045 SLAC как по выходной

Таблица 2. Параметры клистронов 10-см диапазона

Тип клистрона	Импульсная мощность, МВт	Средняя мощность, кВт	Напряжение на катоде, кВ	Ток катода, А	Импеданс, Ом	Максимальная частота циклов, Гц
E3730A Toshiba, Япония	50	10	320	360	889	50
E3712A Toshiba *, Япония	80	4	400	488	820	50
E37317 Toshiba **, Япония	50	30	350	414	845	150
KMF-418 Hubei Hanguang Technology Co., LTD, Китай	65	13	350	415	843	50
PV-3050 Mitsubishi, Япония	50	10	310	366	847	50
PV-2014B Mitsubishi, Япония	25	30	240	247	972	300
5045 SLAC, США	60	35–45	350	400	875	150

* Клистрон предназначен для генерации коротких (~ 1 мкс) импульсов СВЧ-мощности.
 ** Клистрон разрабатывается.

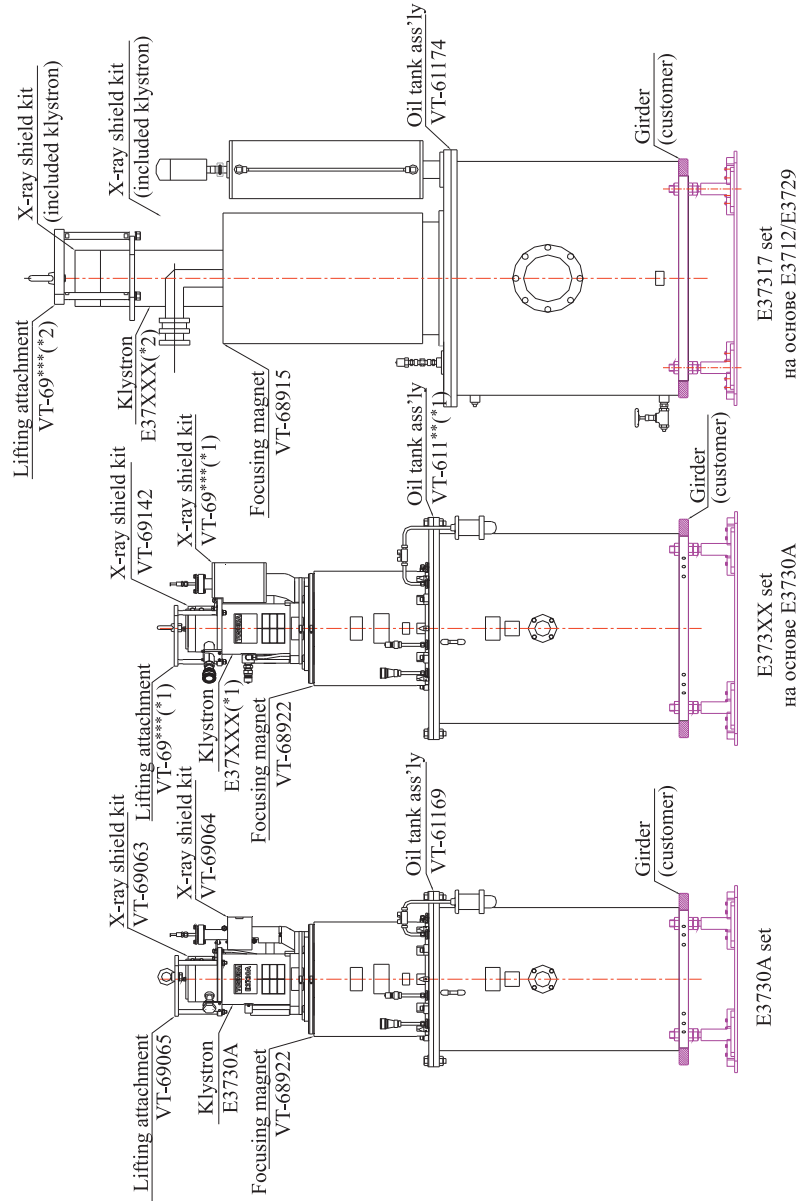


Рис. 5. Предложения компании TETD по разработке мощных импульсных клистронов E37317 Toshiba

мощности, так и по другим эксплуатационным параметрам, но коммерчески вполне доступны. Клистроны серии E37*** Toshiba (более 10 наименований), выпускаемые компанией «Toshiba Electron Tubes and Devices Co., LTD» (TETD), имеют широкий спектр параметров как по выходной импульсной мощности, так и по длительности импульса. Среди этих клистронов полных аналогов клистрона 5045 пока нет, но в 2011 г. компания TETD объявила о готовности разработать клистроны с условным наименованием E37317 Toshiba для импульсов СВЧ-мощности длительностью 4 мкс с выходной импульсной мощностью 50 МВт, способные работать с частотой циклов до 150 Гц. Новые клистроны могут быть разработаны на базе клистронов E3730A или E3712/E3729. Соответствующие пояснения представлены на рис. 5. В случае реализации таких намерений возможности выбора клистронов будут расширены.

Таблица 3. Параметры ускорителя ЛУЭ-200 при развитии до второй очереди

Параметр	Проект ИЯФ 1993 г.	2-я очередь (варианты)		
		2 (2 клистрона)	2 (2 клистрона)	2 (2 клистрона)
Тип клистрона, мощность клистрона, МВт	5045 SLAC, 67	5045 SLAC, 60	E37XXX Toshiba, 50	E3037A Toshiba, 50
Максимальная энергия электронов, МэВ	212	180	1161–181	161–181
Средний ток пучка в импульсе, А	1,5	1,5	1,5–2,5	1,5–2,5
Длительность импульса тока, нс	250	100	100	100
Частота циклов, Гц	150	150	120	50
Средняя мощность пучка, кВт	≈ 12	4	3,1–4,6	1,3–1,9

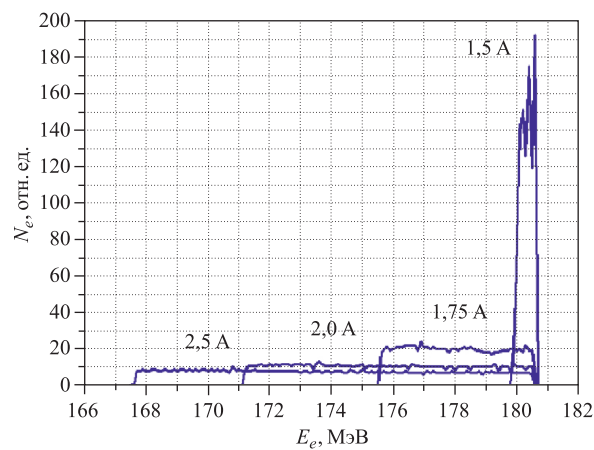


Рис. 6. Расчетные спектры частиц на выходе двух ускоряющих секций ЛУЭ-200 при ускорении пучка с различными токами при длительности импульса 100 нс

Варианты параметров ускорителя ЛУЭ-200 при развитии установки до второй очереди представлены табл. 3. При определении эксплуатационных параметров второй очереди ускорителя приняты во внимание следующие обстоятельства:

— с целью повышения разрешающей способности времяпролетных нейтронных спектрометров длительность импульса пучка сокращена до 100 нс;

— реальный недобор энергии пучка из-за подгрузки ускоряющих структур пучком может достигать 13–15 МэВ на каждую секцию (рис. 6).

В порядке очередного шага по реализации проекта второй очереди на ускорителе после монтажа второй ускоряющей секции будет произведена замена модулятора и клистрона ТН2129 на клистрон Е3730А. Следовательно, при переходе на частоту циклов 50 Гц может быть достигнута средняя мощность пучка $\sim 1,5$ кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате запуска и оптимизации режимов работы ускорителя ЛУЭ-200 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ действует импульсный источник нейтронов — базовая установка для проведения исследований в области нейтронной ядерной физики и прикладных исследований. Предложенные варианты развития ускорителя позволят повысить среднюю мощность ускоренного пучка в 5–10 раз, что должно увеличить интенсивность потока производимых нейтронов в таком же соотношении.

Дальнейшее развитие установки для выхода на проектные параметры возможно при использовании клистронов с большей средней мощностью, а также при замене неразмножающей мишени на размножающую подкритическую сборку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sumbaev A., Shvetsov V.* Physical Startup of the First Stage of the IREN Facility // JINR News. 2009. No. 1. P. 9–13.
2. *Novohatsky A. V. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. Dubna: JINR, 1994. P. 197–211.
3. *Belozеров A. V. et al.* Physical Startup of the First Stage of the IREN Facility // Part. Nucl., Lett. 2010. V. 7, No. 7(163). P. 923–932.
4. *Трубников Г. В., Швец В. А.* Источник электронов для ЛУЭ-200 (проект ИРЕН). Постерное сообщ. на XIX Всерос. конф. по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2004, Дубна, 4–8 окт. 2004 г.
5. *Гришинов Б. И. и др.* Система питания модулятора электронной пушки ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 3(126). С. 86–91.
6. *Александров В. С. и др.* Моделирование нагрузки током пучка ускорителя ЛУЭ-200 // Там же. С. 72–75.
7. <http://isinn.jinr.ru/home.html>
8. *Dolya S. N. et al.* The VEPP-5 Team. Linac LUE200. First Testing Results // LINAC2000 Conf., Monterey, California, USA, Aug. 21–25, 2000.

9. *VEPP-5 Team* (Budker INP, Novosibirsk, Russia). Test of Accelerating Structure for VEPP-5 Preinjector // *Ibid.*
<http://arxiv.org/abs/physics/0008100>.
10. *Павлов В. М.* Система умножения мощности SLED. Препринт ИЯФ 97-94. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1997.
11. *Kim Dong Su, Sumbaev A. P., Shvetsov V. N.* 180 MW/180 kW Pulse Modulator for S-Band Klystron of LUE-200 Linac of IREN Installation of JINR // *Part. Nucl., Lett.* 2014. V. 11, No. 5. P. 1040–1044.