

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ УСТАНОВКИ ИРЕН

*А. В. Белозеров, Ю. Бечер, Ю. К. Булычева, В. Н. Замрий,
А. С. Каюков, В. В. Кобец, И. Н. Мешков, В. Ф. Минашкин,
В. А. Петров, В. Г. Пятаев, П. В. Седышев, А. В. Скрыпник,
А. П. Сумбаев, А. В. Уфимцев, В. Г. Шабратов, В. А. Швец,
В. Н. Швецов, А. А. Фатеев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

О. В. Беликов, А. А. Гальт, П. В. Логачев, А. С. Медведко, В. М. Павлов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Сообщается о запуске первой очереди установки ИРЕН в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований. Представлены общая схема и существующее состояние линейного ускорителя электронов с ускоряющей структурой на бегущей волне 10-см диапазона ($f = 2856$ МГц). Приведены результаты наладки основных функциональных систем ускорителя и измеренные параметры пучка электронов: ток пучка в импульсе 1,5 А; энергия электронов 30 МэВ; длительность импульса тока 100 нс; частота циклов 25 Гц. Интегральный поток нейтронов от неразмножающей мишени достигает значений $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

It is reported on startup of the first stage of the Intense REsonance Neutron source installation (IREN) at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. The general scheme and current status of the electron linear accelerator with accelerating structure on an S-band traveling wave ($f = 2856$ MHz) are presented. Results of adjustment of the basic functional systems of the linac and the measured parameters of the beam (pulse current of a beam 1.5 A, electron energy 30 MeV; duration of a pulse current 100 ns; rep. rate 25 Hz) are reported. The integral neutron yield from nonmultiplying target reaches $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$.

PACS: 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 разработан в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск) [1, 2] как драйвер интенсивного импульсного источника резонансных нейтронов бустерного типа ИРЕН [3]. Ускоритель состоит из импульсной электронной пушки, ускоряющей системы, источников СВЧ-мощности на базе клистронов 10-см диапазона с модуляторами, системы фокусировки–транспортировки пучка, системы диагностики с широкополосным магнитным спектрометром и вакуумной системы. Ускоритель размещается вертикально в трехэтажном здании бывшей установки

ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (рис. 1). Его основные проектные параметры представлены в табл. 1. Принципиальная схема ускорителя представлена на рис. 2 (ускоряющая секция № 2, клистрон № 2 и модулятор № 2 устанавливаются при развитии ускорителя). На первом этапе предусмотрена работа источника нейтронов на основе неразмножающей нейтронопроизводящей мишени.



Рис. 1. Общий вид ускорителя в здании источника нейтронов ИРЕН ЛНФ ОИЯИ

Таблица 1. Основные проектные параметры ускорителя ЛУЭ-200

Максимальная энергия электронов, МэВ	200
Средний ток пучка в импульсе, А	1,5
Длительность импульса тока, нс	≤ 250
Частота циклов, Гц	150
Число ускоряющих секций (длиной по 3 м)	2
Средний ускоряющий градиент, МэВ/м	~ 35
Средняя мощность пучка, кВт	≈ 11

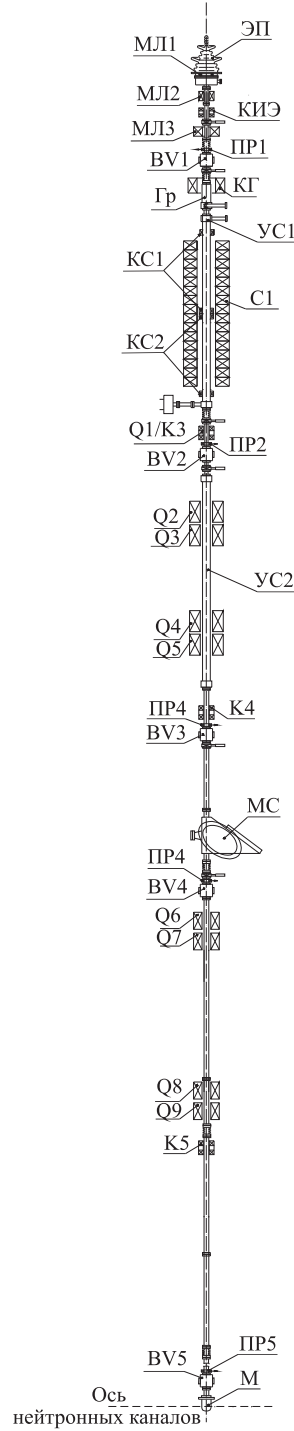


Рис. 2. Принципиальная схема ускорителя: ЭП — электронная пушка; МЛ1, МЛ2, МЛ3 — короткие соленоидальные магнитные линзы; КГ — короткий соленоид группирователя; С1 — фокусирующий соленоид первой ускоряющей секции; КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5 — корректирующие магниты; Q1 — первая квадрупольная линза; Q2-Q3, Q4-Q5 — дублеты широкоапертурных квадрупольных линз; Q6-Q7, Q8-Q9 — дублеты квадрупольных линз; Гр — СВЧ-группирователь; УС1 — первая ускоряющая секция; УС2 — вторая ускоряющая секция; МС — магнитный спектрометр; М — мишень-конвертер; BV1, BV2, BV3, BV4, BV5 — бимвьюеры; PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 — магнитноиндукционные датчики тока пучка (пояса Роговского)

1. ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

В качестве источника электронов в ускорителе используется двухэлектродная электронная пушка с оксидным термокатодом $\varnothing 12$ мм от СВЧ-лампы ГС-34. Катод запитывается от 200-кВ импульсного повышающего трансформатора. Анодом служит стенка вакуумной камеры с отверстием $\varnothing 43$ мм, закрытым сеткой из нержавеющей стали с размерами ячейки 2×2 мм. Пушка обеспечивает импульсный ток пучка до 6 А с продолжительностью импульса 250–300 нс с частотой циклов 50 Гц и эмиттансом $\leq 0,01\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$.

2. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Ускоряющая система состоит из СВЧ-группирователя и двух коротких (по 3 м) ускоряющих секций с предельно высоким темпом ускорения. Ускоряющие секции разработаны и изготовлены в ИЯФ СО РАН. Секции представляют собой круглый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом, в который подается СВЧ-мощность. Секции запитываются от клистронов — усилителей СВЧ-мощности 10-см диапазона (2856 МГц). Прототип ускоряющей системы протестирован на форинжекторе комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН, где достигнуты максимальное ускоряющее поле ≈ 45 МВ/м и средний ускоряющий градиент ~ 35 МэВ/м [4, 5]. Проектом ускорителя предусмотрена сборка из двух секций длиной по 3 м, обеспечивающих проектную энергию электронов. В составе первой очереди ускорителя смонтирована одна ускоряющая секция. Вместо второй ускоряющей секции установлен участок дрейфа с двумя квадрупольными дублетами.

3. ИСТОЧНИКИ СВЧ-МОЩНОСТИ

Оптимальными источниками СВЧ-мощности для ускоряющей системы ускорителя являются клистроны 5045 (SLAC, США), способные вырабатывать импульсную СВЧ-мощность до 60 МВт при средней мощности 45 кВт. Использование систем компрессии СВЧ-мощности позволяет в 3–4 раза повысить эффективность закачки мощности в ускоряющую структуру таким образом, что средний темп ускорения может достигать 33–35 МэВ/м. Основными компонентами СВЧ-системы ускорителя являются двухканальный высокочастотный задающий генератор с возможностью сдвига фазы колебаний между каналами на 180° и быстрого переворота фазы СВЧ-колебаний в обоих каналах одновременно на 180° , два импульсных предусилителя СВЧ-мощности для возбуждения клистронов, две системы умножения мощности, волноводный тракт подвода СВЧ-мощности от клистронов к ускоряющим секциям и группирователю, мощный направленный ответвитель, регулятор мощности, фазовращатель и измерительные направленные ответвители. Непрерывный СВЧ-сигнал мощностью ~ 20 мВт и частотой 2856 МГц от задающего генератора по коаксиальным линиям поступает на вход усилителя предварительного возбуждения. Сдвиг фаз между каналами возбуждения осуществляется фазовращателем. С выхода клистрона СВЧ-мощность по прямоугольному вакуумированному волноводу поступает на трехдецибелльный мост. В двух плечах моста расположены высокочастотные накопительные резонаторы системы умножения мощности SLED, а четвертое плечо

моста соединено с ускоряющей секцией. Увеличение импульсной мощности, подводимой к секциям ускорителя, осуществляется за счет накопления энергии в резонаторах с последующим ее переизлучением в идущий к секции волновод при перевороте фазы подводимой к резонаторам волны на 180° . На входе в секцию установлен направленный ответвитель, сигналы с которого используются для контроля падающей и отраженной волн. Волноводный тракт выполнен из прямоугольных вакуумированных волноводов сечением 72×34 мм. Откачка волноводов совместно с ускоряющей секцией осуществляется магниторазрядными насосами.

К настоящему времени из-за дефицита клистронов 5045 смонтирована и запущена в опытную эксплуатацию первая очередь ускорителя в составе одной ускоряющей секции, запитанной от одного клистрона TH2129 (Thomson), обеспечивающего импульсную мощность до 20 МВт.

4. ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

Система фокусировки обеспечивает транспортировку и коррекцию траектории пучка электронов от электронной пушки до мишени-конвертера. Структура системы фокусировки представлена на рис. 2. Фокусировка пучка от пушки до входа в группирователь осуществляется короткими соленоидальными магнитными линзами МЛ1, МЛ2, МЛ3. В группирователе и в первой ускоряющей секции транспортировка пучка осуществляется непрерывным соленоидальным магнитным полем, сформированным коротким соленоидом КГ (19 см) и длинным соленоидом С1 (260 см), в который ускоряющая секция длиной 300 см «погружается» практически по всей длине. Для транспортировки пучка от выхода первой ускоряющей секции до мишени должна использоваться фокусировка квадрупольными линзами: Q1 — в конце первой секции, дублетами широкоапертурных квадрупольных линз Q2–Q3, Q4–Q5 в области установки второй ускоряющей секции и дублетами квадрупольных линз Q6–Q7, Q8–Q9 для транспортировки пучка к мишени. Коррекция положения пучка по ускорительному тракту и каналу транспортировки осуществляется магнитами поперечного магнитного поля КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5.

Таблица 2. Основные параметры источников питания системы фокусировки и коррекции

Параметры	УМ-10	УМ-25	ВЧ-300/5	«Bruker»		
	(22 канала)	(4 канала)	(4 канала)	(3 канала)		
Диапазон выходных токов, А	± 10	± 25	10–300	0–500	0–350	0–500
Максимальное выходное напряжение, В	± 20	± 10	20	280	230	90
Долговременная нестабильность тока, не более 10^{-6}	500	200	200	500	500	500
Напряжение питания (от сети), В	$\sim 3 \times 380$	~ 220	$\sim 3 \times 380$	$\sim 3 \times 380$	$\sim 3 \times 380$	$\sim 3 \times 380$
Частота преобразования	20 кГц	40 кГц	20 кГц	50 Гц	50 Гц	50 Гц

Для питания магнитов фокусирующей системы используются четыре группы источников, параметры которых представлены в табл. 2. Короткие соленоидальные линзы и корректирующие магниты запитываются от двуполярных стабилизированных источников питания УМ-10 с токами $\pm(0-10)$ А. Питание квадрупольных линз производится от источников типа ВЧ-300/5 с током 0–300 А и УМ-25 с током $\pm(0-25)$ А [6]. Эти источники тока разработаны и изготовлены в Институте ядерной физики СО РАН. Выходные регуляторы источников тока выполнены по технологии высокочастотного преобразования мощности с применением широтно-импульсной модуляции выходного напряжения, что позволяет получить хорошие характеристики регуляторов при высоком коэффициенте полезного действия силовых элементов источников.

Сильноточные соленоиды КГ и С1 и магнит спектрометра МС запитываются от источников фирмы «Bruker» (www.bruker.fr).

Контроль и управление источниками питания осуществляется по CANbus с использованием интеллектуальных модулей, разработанных в ИЯФ [7]: одноканальных для источников ВЧ-300/5, «Bruker» и многоканальных для УМ-25 и УМ-10.

5. ПРОВОДКА ПУЧКА

Физический пуск ускорителя осуществлялся последовательной настройкой систем формирования пучка (электронной пушки, систем фокусировки и транспортировки пучка) и ускоряющей системы. В процессе настройки состояние пучка электронов контролировалось в пяти диагностических постах, распределенных по ускорителю в соответствии со схемой, представленной на рис. 2: после электронной пушки, после ускоряющей секции, в конце участка дрейфа, заменяющего вторую ускоряющую секцию, после магнитного спектрометра и перед мишенью. Диагностические посты включают в себя магнитоиндукционные датчики тока — пояса Роговского, бимбьюеры — люминофорные экраны с CCD-видеокамерами и вторично-эмиссионные сеточные профилометры, позволяющие измерять величину тока пучка и его положение в каждом импульсе. Типичные эпюры, полученные с диагностических постов, представлены на рис. 3 и 4.

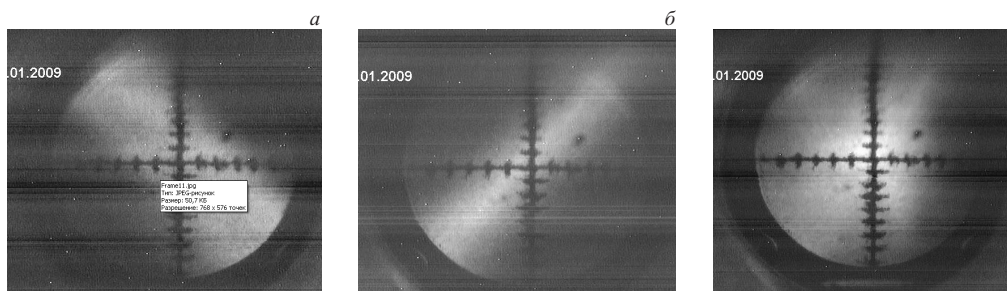


Рис. 3. Эволюция автографа пучка на BV5 при настройке дублета квадруполей Q4–Q5: а) Q4 включен, Q5 выключен; б) Q5 включен, Q4 выключен; в) включены Q4 и Q5; диаметр люминофорного экрана 20 мм

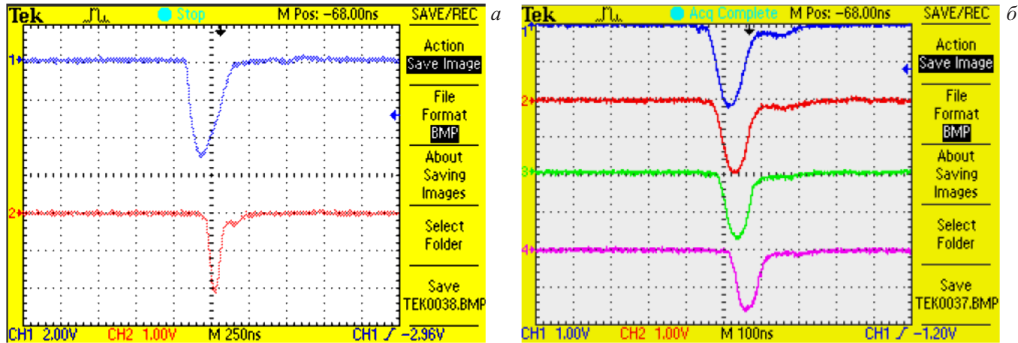


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока пучка с поясов Роговского: а) верхний луч — ПР1, 2 А/дел., нижний луч — ПР2, 1 А/дел., 250 нс/дел.; б) сверху вниз — ПР2, ПР3, ПР4, ПР5, 1 А/дел., 100 нс/дел.

В результате оптимизации режимов ускоряющей и фокусирующей систем при токе электронной пушки 5 А в регулярном режиме в конце ускоряющей секции получен ускоренный пучок с током 2–2,2 А, при этом до мишени транспортируется пучок с током 1,5–1,6 А.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПУЧКА

Для измерений спектров энергий пучка электронов используется широкополосный магнитостатический анализатор с магнитным полем, поперечным к направлению движения частиц пучка. Магнит спектрометра Ш-образной формы с магнитной жесткостью, изменяемой в пределах 0,166–0,7 Тл·м, размещается в промежутке между проектируемой второй ускоряющей секцией и дублетом квадрупольных линз Q6–Q7. Пучок электронов в магнитном поле спектрометра поворачивается на угол, близкий к 90°, через закрытое фольгой окно (50 мкм, нержавеющая сталь) выводится из вакуумной камеры в атмосферу на позиционно-чувствительный коллектор пучка полного поглощения. Сигналы с ламелей коллектора измеряются в одном цикле и обрабатываются в режиме «off line».

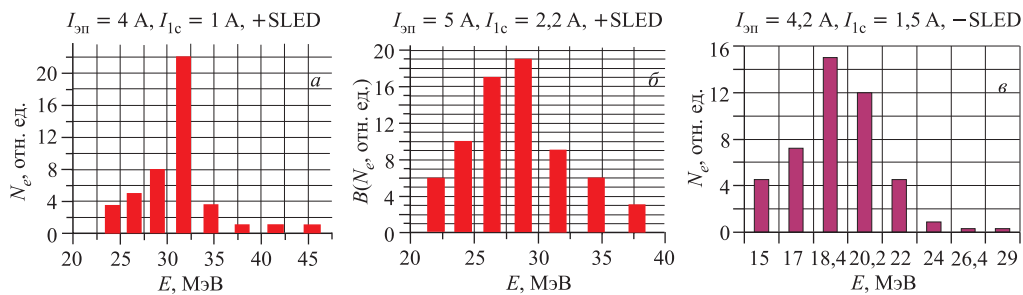


Рис. 5. Типичные спектры энергий пучка электронов при возбуждении ускоряющей структуры: а, б) с системой компрессии СВЧ-мощности SLED; в) без системы SLED

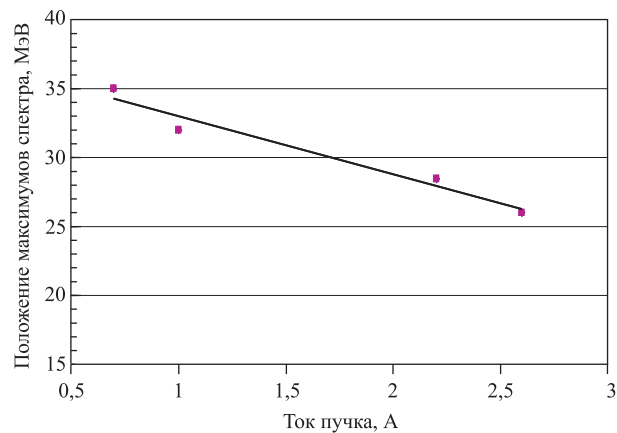


Рис. 6. Нагрузочная характеристика ускоряющей структуры

Конструктивные особенности магнитного анализатора позволяют производить измерения спектров энергий с относительной точностью $\Delta E/E$ не хуже $\pm 5\%$.

Измерение энергетических спектров пучка производилось при различных значениях ускоренного тока пучка в диапазоне от 0,7 до 2,6 А и в режимах включения и отключения системы умножения SLED. Типичные спектры пучка представлены на рис. 5.

В результате анализа измеренных спектров установлено, что при увеличении тока ускоренного пучка ширина спектра увеличивается, а положение максимума спектра смещается в область более низких энергий. Нагрузочная характеристика ускоряющей структуры приведена на рис. 6, где по оси ординат указано положение максимумов спектров, а по оси абсцисс — величина тока пучка, прошедшего ускоряющую секцию.

При работе ускоряющей структуры без системы SLED максимум спектра пучка лежит в области 18–20 МэВ (рис. 3, в). При работе системы ускоряющей структуры с системой SLED максимум спектра энергий пучка находится в области 27–31 МэВ.

7. НЕРАЗМНОЖАЮЩАЯ НЕЙТРОПРОИЗВОДЯЩАЯ МИШЕНЬ

В качестве материала для нейтропроизводящей неразмножающей мишени использован сплав на основе вольфрама ВНЖ-90. Нейтроны в мишени рождаются в результате двухступенчатого процесса. Вначале ускоренные электроны останавливаются в мишени, рождая тормозные гамма-кванты. Энергетический спектр гамма-квантов ограничен сверху максимальной энергией ускоренных электронов. Затем в результате взаимодействия высокоэнергетичных гамма-квантов с ядрами изотопов вольфрама в реакциях ${}^A\text{W}(\gamma, n){}^{A-1}\text{W}$ рождаются нейтроны. Мишень представляет собой цилиндр из сплава ВНЖ диаметром 40 мм и высотой 100 мм, размещенный внутри алюминиевого бачка диаметром 160 мм, через который прокачивается дистиллированная вода из замкнутого контура для охлаждения мишени и формирования нейтронного спектра. Толщина водяного слоя в радиальном направлении 50 мм. Ускоренные электроны проходят внутрь бачка через полусферическое бериллиевое окно диаметром 36 мм и толщиной 1 мм. На переднем торце мишени установлена термопара для оперативного контроля температуры мишени.

8. ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЫХОДА И ПАРАМЕТРОВ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА НЕЙТРОНОВ

Оценка интегрального выхода нейтронов осуществлялась путем измерения плотности потока нейтронов на расстоянии 10 м от мишени при помощи пропорционального газового детектора СММ-16 на основе ^3He , а также измерением плотности потока нейтронов на внешней поверхности бачка охлаждения мишени при помощи активационных детекторов. Давление ^3He в счетчике СММ-16, использовавшемся в экспериментах, было измерено предварительно методом пропускания сколламированного пучка нейтронов через счетчик и составляло 4,3 атм. Результаты оценки интегрального выхода нейтронов для приведенных выше значений параметров импульсного тока, энергии, длительности импульса электронов и частоты повторения двумя методами хорошо согласуются между собой и дают значение $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Соответствующая плотность потока нейтронов на расстоянии 10 м от мишени (самая короткая пролетная база, доступная для экспериментов) составляет $(2,4-4) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оценки параметров выведенного пучка нейтронов осуществлен эксперимент по пропусканию пучка нейтронов от мишени через образцы-фильтры толщиной 2 мм из тантала и индия, материалов, имеющих сильные резонансы в полном сечении взаимодействия с нейтронами в области от единиц до сотен электронвольт. Прошедшие через образцы нейтроны детектировались счетчиком СММ-16 и газовым детектором SHVAPS на основе ^3He диаметром 38 см и длиной 53 см с давлением ^3He 1 атм. Времяпролетные спектры регистрировались при помощи временного кодировщика с минимальной шириной временного канала $dt_{\text{min}} = 20,83 \text{ нс}$ и возможностью разбивать временной диапазон на группы с разной шириной временного канала, кратной dt_{min} . Времяпролетные спектры после регистрации пересчитывались в энергетические. Результаты измерений представлены на рис. 7.

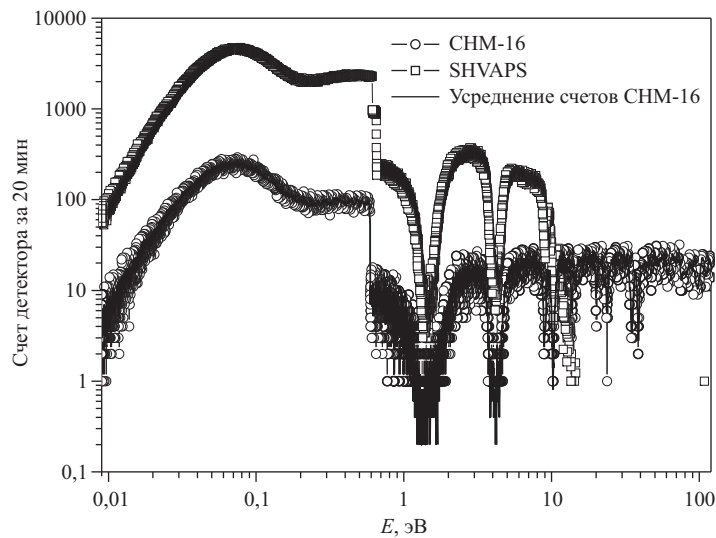


Рис. 7. Кривые пропускания нейтронов через фильтры из Та и Ин. Экспозиция 20 мин, пролетная база 9,3 м, ширина временного канала в диапазоне энергий до 0,5 эВ 10 мкс, выше 0,5 эВ 2 мкс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен физический запуск первой очереди установки ИРЕН в составе ускорителя ЛУЭ-200 со следующими параметрами: максимальная энергия электронов 30 МэВ; импульсный ток пучка 1,5 А; длительность импульса тока 100 нс; частота циклов 25 Гц; средняя мощность пучка ≈ 110 Вт. Произведены тестовые измерения нейтронных потоков, полученных от неразмножающей мишени и на выведенных нейтронных пучках в экспериментальном зале. Интегральный поток нейтронов от мишени достигает значений $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

В первой половине 2009 г. ускоритель отработал на облучение фотонейтронной мишени более 200 ч в регулярном режиме. В ближайшее время планируется переход к цикличности работы ускорителя от 25 к 50 и 100 Гц, что позволит увеличить среднюю мощность пучка. В случае адекватного финансирования и приобретения клистронов 5045 SLAC или их менее мощных аналогов клистронов E3730A Toshiba возможно развитие установки с целью приближения к параметрам, заложенным в первоначальном проекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novohatsky A. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. Dubna, 1994. P. 197.
2. *Kaminsky A. et al.* LUE-200 — Driver Linac for Intense Resonant Neutron Spectrometer (IREN) // Proc. of the XVIII Intern. Linear Accel. Conf., Geneva, Switzerland, Aug. 26–30, 1996. CERN 96-07. 1996. V. 2. P. 508–510.
3. *Anan'ev V. D. et al.* Intense Resonance Neutron Source (IREN) — New Pulsed Source for Nuclear and Applied Investigations // Part. Nucl., Lett. 2005. V. 2, No. 3(126). P. 11–18.
4. *Dolya S. N. et al.* Linac LUE-200. First Testing Results // LINAC-2000 Conf., Monterey, California. Aug. 21–25, 2000.
5. VEPP-5 Team (Budker INP, Novosibirsk, Russia). Test of Accelerating Structure for VEPP-5 Preinjector // Ibid.; <http://arxiv.org/abs/physics/0008100>
6. *Belikov O., Kozak V., Medvedko A.* Four-Quadrant Power Supplies for Steering Electromagnets for Electron–Positron Colliders // XXI Rus. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2008), Zvenigorod, Russia, 2008; <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/r08/papers/WEBAU03.pdf>
7. *Козак В. Р., Купер Э. А., Фисенко А. Н.* Набор устройств с интерфейсом CANbus для систем автоматизации физических установок. Препринт 2003-70, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2003; <http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/oldwww/texts/p2003-70.pdf>