

Объединенный институт ядерных исследований

B38
H.34

**IV Научный семинар
памяти
В. П. Саранцева**

Дубна, 26–28 сентября 2001 г.

Труды

**IV Scientific Seminar
in Memory
of V. P. Sarantsev**

Dubna, September 26–28, 2001

Proceedings

ПРОЕКТ ИРЕН: СТАТУС И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В.В. Кобец, И.Н. Мешков, А.П. Сумбаев, В.И. Фурман, В.А. Швец
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

П.В. Логачев, В.М. Павлов, А.Р. Фролов, С.М. Гуров
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Рассматривается концепция проекта нового конкурентоспособного на мировом уровне источника резонансных нейтронов (ИРЕН), реализуемого в ОИЯИ. В установке ИРЕН современный линейный ускоритель ЛУЭ-200 инжектирует пучок электронов с энергией 200 МэВ продолжительностью импульса около 200 нс и средней мощностью 10 кВт в вольфрамовую мишень-конвертер, расположенную в центре компактной и быстрой активной зоны, собранной из твэлов, выполненных из металлического плутония. Фотонейтроны, образованные в конвертере, размножаются в окружающей активной зоне с коэффициентом умножения около 30, при этом продолжительность импульса быстрых нейтронов не превышает 400 нс. Представлены результаты первых экспериментов по испытанию ускоряющих секций линейного ускорителя ЛУЭ-200 на установке ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН и состояние работ по проекту ИРЕН.

IREN Project: Status and First Results

V. V. Kobets et al.

The concept of the project of the new competitive at a world level intense resonance neutron source (IREN) creating now at JINR is considered. The IREN source consists of the modern linear accelerator of electrons LUE-200 with energy 200 MeV, the pulse duration about 200 ns and average beam power 10 kW and of the neutron multiplying target. The electron beam is transported to a tungsten target-converter located at the center of a compact and fast active core which is composed of metallic plutonium fuel elements. Photofission neutrons produced in the converter are multiplied with gain about 30 into surrounding core so the total duration of fast neutron burst does not exceed 400 ns. The results of the first experiments on test of the LUE-200 accelerating sections carried out at BINP, Novosibirsk on the basis of the VEPP-5 preinjector as well as a current status of the IREN project are presented.

Интенсивный импульсный источник резонансных нейтронов ИРЕН так же, как и работавший до июня 2001г. источник-бустер ЛУЭ-40 - ИБР-30, представляет собой традиционную для ОИЯИ комбинацию из драйвера - линейного ускорителя электронов и мишени-конвертера с размножающей оболочкой из делящегося материала.

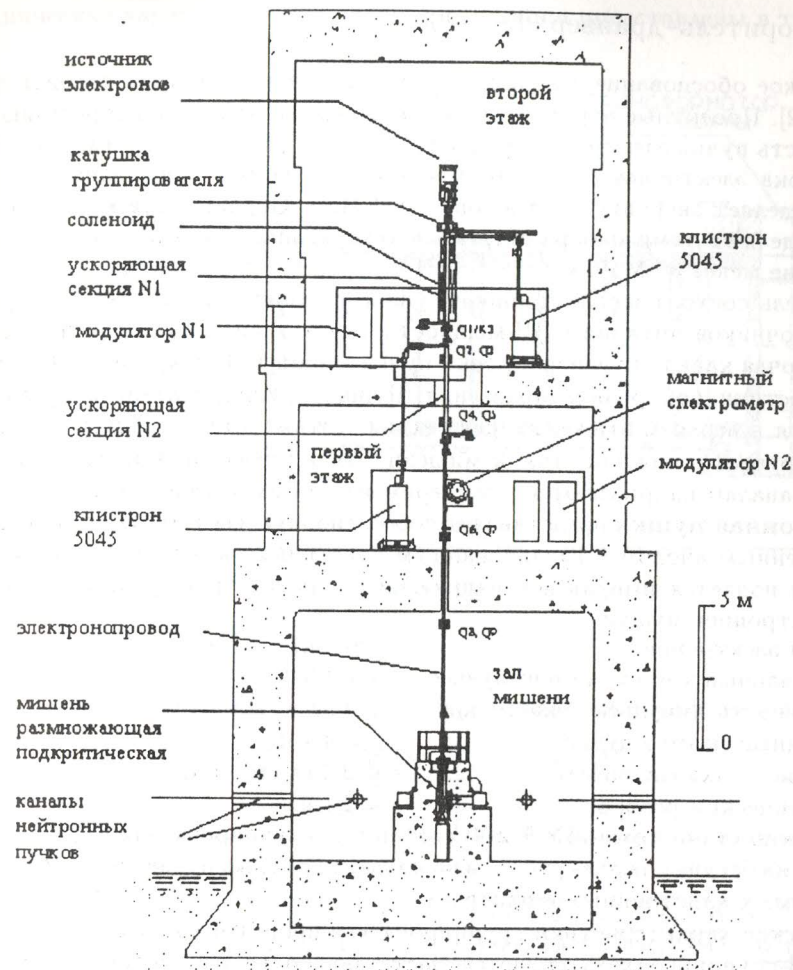


Рис. 1. Схема размещения установки ИРЕН

Импульсные потоки нейтронов из мишени используются для времяпролетных спектрометров высокого разрешения. Новая установка создается с целью сокращения длительности импульса при сохранении высокой средней интенсивности нейтронных потоков для повышения энергетического разрешения спектрометров. При коэффициенте размножения нейтронов в мишени ~ 30 и длительности нейтронного импульса 400 нс интегральный выход нейтронов источника составит $\sim 9 \cdot 10^{14}$ н/с.

Установка будет размещена в трех этажах существующего здания установки ЛУЭ-40 - ИБР-30 (рис.1): в двух верхних этажах в вертикальном положении размещается ускоритель, в самом нижнем этаже - подкритическая размножающая мишень.

1. Ускоритель-драйвер ЛУЭ-200

Физическое обоснование ускорителя разработано в Институте ядерной физики СО РАН [1,2]. Проектные параметры ПРЕН по выходу нейтронов определяют среднюю мощность пучка электронов ≥ 10 кВт, что при длительности импульса 250 нс, значении тока электронов в импульсе $\sim 1,5$ А и частоте следования импульсов 150 Гц определяет энергию электронов ~ 200 МэВ. Ограничения по высоте помещений определяют темп набора энергии в ускоряющих секциях, который должен составлять не менее 35 МэВ/м.

Ускоритель состоит из электронной пушки, группирователя, двух ускоряющих секций, источников питания СВЧ-мощности 10 см диапазона, фокусирующей системы (включая канал транспортировки пучка к мишени), вакуумной системы, систем диагностики, контроля и управления. Пушка, группирователь и первая секция размещаются в верхнем этаже, вторая секция – этажом ниже. Ускоренный пучок транспортируется в нижний этаж к мишени. Пучки нейтронов из мишени по специальным каналам направляются к экспериментальным установкам.

Электронная пушка представляет собой диодную систему (катод-анод) с полым заземленным анодом и изолированным накальным экранированным катодом, на который подается импульсное напряжение. Параметры пучка электронов на выходе электронной пушки:

энергия электронов	- 200 кэВ.
максимальный ток пучка в импульсе	- 3,5–4,0 А.
длительность импульса тока пучка	- 250 нс.
поперечный размер пучка	- $r = 4$ мм.
эмиттанс пучка (не более)	- $\leq 0,01\pi$ см. рад.
энергетический разброс	- ≤ 2 кэВ.

Ускоряющая система ЛУЭ-200 состоит из группирователя и двух ускоряющих секций на бегущей волне (рис.2), в каждую из которых подается СВЧ-мощность от независимых клистронных усилителей.

Технические характеристики группирователя приведены в табл.1.

На СВЧ-группирователь подается часть мощности от основного питающего СВЧ-фидера первой секции. Амплитуда и фаза СВЧ-мощности, подаваемой на группирователь, регулируются аттенюатором и фазовращателем.

Таблица 1. Технические характеристики группирователя

Рабочая частота	2856,45 Гц
Вид колебаний	$2\pi/3$
Количество ячеек	4
Полная длина	243 мм
Фазовая скорость волны	0,7
Входная импульсная мощность	110 кВт
Собственная добротность на рабочей частоте	3350
Эффективность группировки	60%

Технические характеристики ускоряющей секции представлены в табл.2.

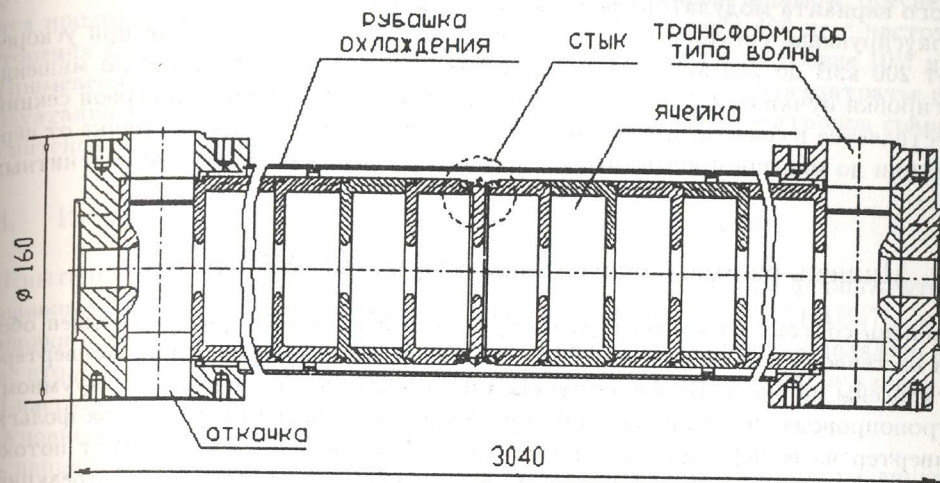


Рис. 2. Структура ускоряющей секции

Таблица 2. Технические характеристики ускоряющей секции

Рабочая частота	2855,05 МГц	При $T = 25^\circ$ (С)
Вид колебаний	$2\pi/3$	
Постоянная времени	1,35 мксек	
Групповая скорость	0,021 с	
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м	
Количество ячеек	83+2	Включая трансформаторы типа волны
Длина структуры	2,93 м	Включая трансформаторы типа волны
Время заполнения структуры	0,471 мкс	

Источниками СВЧ-мощности являются усилители на базе клистрона 5045 SLAC, способные формировать СВЧ-импульсы длительностью 3,5 мкс мощностью до 60 МВт. Для повышения импульсной СВЧ-мощности используется система SLED, состоящая из волноводного шелевого моста и двух высокодобротных цилиндрических резонаторов [1,3]. Системы SLED включаются в СВЧ-фидеры между клистронным и вводом в ускоряющую структуру секций и позволяют увеличивать амплитуду импульса СВЧ-мощности в 3–4 раза.

Импульсное питание клистронных усилителей осуществляется от модуляторов, формирующих высоковольтные импульсы катодного напряжения амплитудой 350 кВ длительностью 5 мкс по основанию. Модулятор М350 для клистрона 5045 SLAC разработан на базе модулятора М-250 ускорительной станции ОЛИВИН [4,5], использующего в качестве высоковольтных коммутаторов мощные водородные пиратроны

типа ТГН1-5000/50 (или ТГН1-2500/50). В настоящее время рассматривается возможность разработки и изготовления фирмой Puls-Plasmatechnik (Германия) резервного варианта модулятора повышенной надежности.

Фокусирующая система должна обеспечивать фокусировку пучка при ускорении от 200 кэВ до 200 МэВ и его проводку от конца второй секции до мишени. Фокусировка пучка от пушки до группирователя и при ускорении в первой секции осуществляется в соленоидальном магнитном поле. Транспортировка пучка от первой секции до мишени производится с помощью девяти квадрупольных магнитных линз.

2. Мишень размножающая подкритическая (МРП)

Мишень состоит из конвертера и окружающей конвертер размножающей оболочки из тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) [6]. Основные элементы конвертера представлены на рис.3. Пучок электронов поступает из ускорителя по вакуумному электропроводу, на конце которого установлена тонкая металлическая фольга, в конвертер из вольфрама (цилиндр $\varnothing 40$ мм, $L = 140$ мм), где рождает потоки тормозных γ -квантов и фотонейтронов, возникающих в результате $\gamma - n$ -реакций. Нейтроны размножаются в окружающей конвертер оболочке из 108 стержневых ($\varnothing 11.1$ мм, $L = 350$ мм) тепловыделяющих элементов, содержащих металлический ^{239}Pu высокого обогащения. Конвертер и оболочка образуют активную зону, работающую в режиме подкритической сборки с $k_{\text{эфф}} \approx 0,97$. Охлаждение конвертера и зоны обеспечивается продувкой гелия.

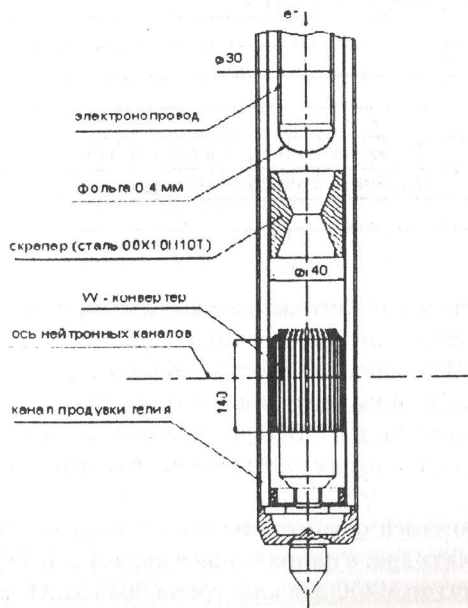


Рис. 3. Схема мишени-конвертера

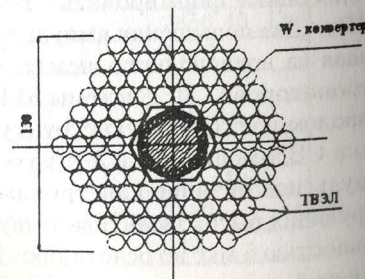


Рис. 4. Схема активной зоны МРП

Конструкция зоны с использованием экрана из диборида тантала (Ta^{10}B_2) позволяет получить время жизни нейтрона на один акт размножения ≤ 10 нс и не допустить возвращения замедленных нейтронов в зону. Таким образом, обеспечивается продолжительность импульса быстрых нейтронов около 400 нс с частотой повторения 150 Гц, что обеспечивает полный выход нейтронов на уровне 10^{15} н/с.

Применение размножающей мишени существенно снижает энергозатраты при эксплуатации источника по сравнению с другими источниками нейтронов сравнимой интенсивности.

3. Испытания опытного образца ускоряющей секции

Испытания опытного образца ускоряющей секции проведены на форинжекторе установки ВЭПН-5 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [7]. Схема установки приведена на рис.5 [8]. Особенностью схемы эксперимента являлось наличие второй, "пассивной" ускоряющей секции, структура которой нагружалась на СВЧ-нагрузку, но СВЧ-мощность при этом не подавалась.

Основные условия проведения испытаний:

- напряжение на пушке источника электронов – до 140 кВ, что при различных режимах накала катода позволяет формировать на выходе пушки пучок электронов с током от 1,5 до 5 А;
- напряжение на клистроне 5045 SLAC – до 345 кВ, что позволяет подавать на вход системы умножения мощности до 50 МВт импульсной СВЧ-мощности;
- частота повторений СВЧ-импульсов при работе с пучком – до 5 Гц;
- субгармонический группирователь не запитывался;
- регистрация пучка электронов:

- на выходе пушки – резистивным датчиком с сопротивлением $R = 2,4$ Ом;
- на входе в СВЧ-группирователь – люминофорным датчиком положения пучка;
- на выходе из магнитного 180° спектрометра – многопозиционным коллектором с размерами ламелей, соответствующими длинам полного поглощения электронов пучка.

Испытания секции проводились в двух режимах:

- с "коротким" пучком (длительность сгустка $\tau_b = 5$ нс много меньше времени заполнения секции $T_f = 465$ нс);
- с "длинным" пучком ($\tau_b = 240$ нс, что сравнимо со временем заполнения секции).

3.1. Эксперименты с "коротким" пучком

При ускорении "короткого" сгустка электронов с током 2,3 А длительностью ~ 5 нс получен устойчивый режим ускорения пучка до максимальной энергии 105 МэВ (средняя энергия – 100 МэВ). Ширина спектра на полувысоте составляет $\pm 2\%$. Средний темп ускорения достигает значений более 35 МэВ/м, а максимальное значение ускоряющего поля в первых ячейках секции достигает значений более 50 МВ/м.

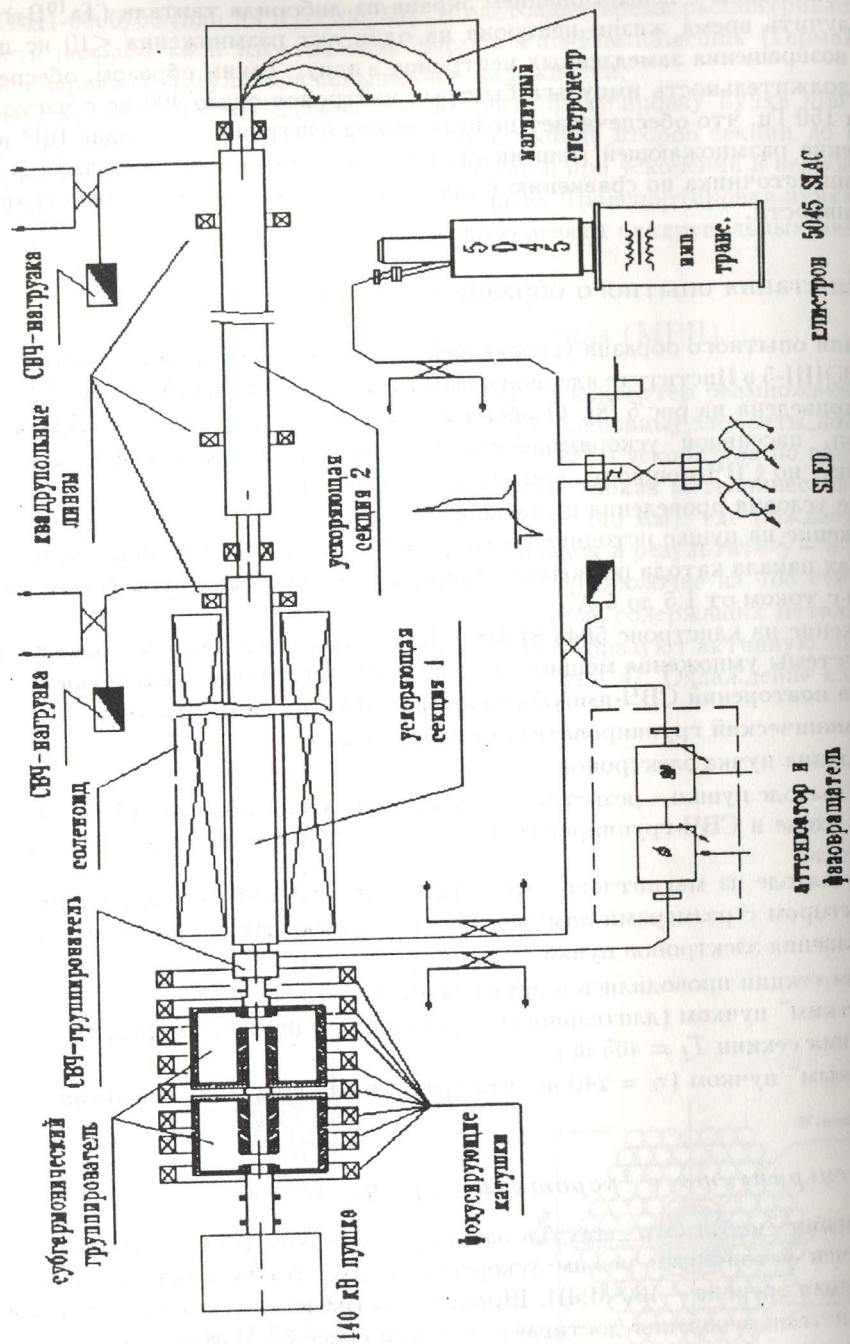


Рис. 5. Схема форинжектора установки ВЭПП-5

3.2. Эксперименты с "длинным" пучком

При работе с "длинным" пучком длительностью 240 нс ускоренный пучок, попадающий на спектрометр, имеет максимальную энергию в сгустке 105 МэВ и очень широкий энергетический спектр – до 70 МэВ в оптимальной рабочей точке (рис.6). При токе пушки 2,0 А ток пучка, эквивалентный заряду, измеренному на спектрометре, составляет около 1,0 А, а энергосодержание сгустка составляет ~ 16 Дж. В среднем при пролете пучка от пушки до первой ускоряющей секции теряется примерно 33% частиц (включая потери частиц при группировке в СВЧ-группирователе). При пролете от первой до второй секции потери пучка составляют примерно 12% и еще примерно 36% при выводе в спектрометр.

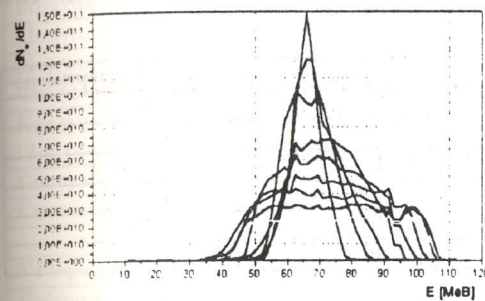


Рис. 6. Энергетический спектр пучка при варьировании времени включения пушки относительно импульса СВЧ-мощности

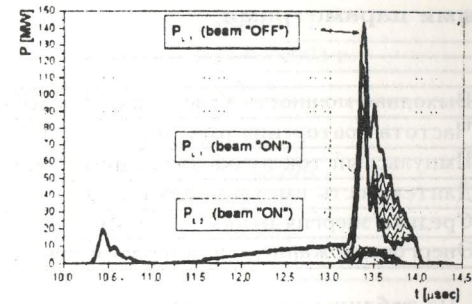


Рис. 7. СВЧ-мощность, поступающая в нагрузку:

- P_{L1} (beam "OFF") – нагрузка первой секции при отсутствии пучка.
- P_{L1} (beam "ON") – нагрузка первой секции при включенном пучке.
- $P_{L1,2}$ (beam "ON") – нагрузка второй секции при включенном пучке.

Анализируя возможные причины энергетических потерь и потерь частиц из пучка, можно выделить следующие:

1. Наличие второй, "пассивной" секции, которая отбирает у пучка значительную часть энергии и приводит к уширению выходного спектра ускоренных частиц.
2. СВЧ-группирователь заштывается СВЧ-мощностью от основного питающего волновода после системы умножения мощности SLED. Это приводит к тому, что за время длительности импульса тока СВЧ-мощность, поступающая в группирователь, меняется примерно в два раза, вследствие чего возникают дополнительные потери частиц во время группировки и уширение энергетического спектра ускоренных частиц.
3. Несовершенство фокусирующего канала в данной серии экспериментов.

Численным анализом сигналов СВЧ-мощности, поступающей в оконечные нагрузки ускоряющих секций (рис.7), можно учесть потери пучка во второй (пассивной) секции и оценить величину заряда пучка, проходящего через первую и вторую

секции. В результате такого анализа сопоставлением расчетов с результатами экспериментов показано, что при оптимальной настройке группирователя выходной мощности клистрона 50 МВт средний (в импульсе) ток пучка, ускоренного в первой секции, достигает 1,35 А, максимальная энергия частиц в сгустке достигает 100 МэВ при ширине спектра 30 МэВ или 90 МэВ при ширине спектра 10 МэВ.

3.3. Основные результаты испытаний

Сравнение обобщенных результатов испытаний с проектными параметрами в пересчете на одну (первую) ускоряющую секцию представлено в табл.3.

Таблица 3. Сравнение обобщенных результатов испытаний с проектными параметрами

	ЛУЭ-200 (проект)	Эксперимент
Выходная мощность клистрона, P_{kl} [МВт]	63	50
Частота повторения импульсов, F [Гц]	150	5
Импульсный ток пучка ускоренных частиц, I_0 [А]	1,5	1,35
Длительность импульса тока, τ_b [нс]	250	240
Средняя энергия пучка, E_b [МэВ]	105	100
Энергосодержание пучка в одном цикле, W_b [Дж]	40	30

Из таблицы 1 видно, что в серии экспериментов, проведенных в 2000 г., не были достигнуты проектные параметры ускорителя ЛУЭ-200. Полученные в экспериментах энергия и средний за импульс ток пучка ускоренных частиц меньше проектных, что, в основном, и определяет недобор по энергосодержанию пучка (~ 75% от проектного).

4. Текущее состояние работ по проекту ИРЕН

Состояние и перспективы работ по техническому проекту ЛУЭ-200 и комплектованию основных функциональных систем ускорителя и мишени представлены Таблицей 4.

Проект ИРЕН оптимизирован по стоимости сооружения и эксплуатации с реальными возможностями ОИЯИ. Существующие здания установки ЛУЭ-40 + ПБР-30, экспериментального зала и пучковая инфраструктура с измерительными павильонами будут использованы при создании и в работе на эксперимент нового источника. Достижение проектных параметров сделает ОИЯИ обладателем современного нейтронного источника для ядерной физики, уступающего из существующих только лучшему в мире источнику LANSCE в Лос-Аламосе.

График работ по проектированию, монтажу и наладке ускорителя предусматривает пуск первой очереди ускорителя в составе источника электронов и первой ускоряющей секции в конце 2003 года и вывод установки на полную мощность в 2004 году.

Таблица 4. Состояние и перспективы работ по техническому проекту ЛУЭ-200

Ускоритель ЛУЭ-200	
Утверждаемая часть рабочего проекта (ГСПИ)	1 кв. 2002 г.
Рабочий проект в полном объеме	конец 2002 г.
Источник электронов	в производстве
Группирователь	изготовлен, испытан прототип
Ускоряющие секции (1 + 2)	изготовлены, испытан прототип
SLED-1, SLED-2	изготовлены, испытан прототип
Клистрон 5045 SLAC для 1-й секции	получен
Клистрон 5045 SLAC для 2-й секции	планируется в 2002-2003 гг.
Модулятор - М 350 для 1-й секции	испытан
Модулятор - М 350 для 2-й секции	дорабатывается
Модуляторы Puls-Plasmatechnik вместо М350	планируются в 2003 г.
Фокусирующий соленоид (1-я ускоряющая секция)	в производстве
Квадруполи Q1-Q9 (2-я ускоряющая секция, канал транспортировки)	в производстве
Система термостабилизации	испытан прототип
Система контроля и управления	в разработке
Мишень размножающая подкритическая МРП	
Утверждаемая часть рабочего проекта	конец 2001 г.
Рабочий проект в полном объеме	2002 г.
ТВЭЛы	изготовлены
Активная зона МРП	производство в 2002-2003 гг.
Монтаж и наладка установки	
Демонтаж ЛУЭ-40	конец 2001 г.
Демонтаж активной зоны ПБР-30	конец 2002 г.
Подготовка инфраструктуры здания установки	2002 г.
Монтаж ЛУЭ-200	2002-2003 г.
Монтаж МРП	2003 г.
Пуск первой очереди ЛУЭ-200	конец 2003 г.

Литература

1. А.Н. Скрипский, Н.С. Диканский, А.В. Новохатский и др. Линейный ускоритель электронов для интенсивного источника резонансных нейтронов (ИРЕН). Отчет о научно-исследовательской работе. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1993.
2. A. Novokhatsky et al. Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN). - In Proceedings of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory, p.197. D1. 9. 13-93-459, Dubna, JINR, 1994.
3. В.М. Павлов. Система умножения мощности SLED. - ИЯФ 97-94, Новосибирск 1997 г.

4. Г.М. Куперман и др. Импульсный модулятор М-350 для клистрона 5045 SLAC. Отчет о научно-исследовательской работе. РИМР, С-Петербург, 1995.
5. А.В. Андросов, В.К. Антропов, А.М. Долгов и др. – ОИЯИ, Р9-96-515, Дубна, 1996.
6. В.Д. Ананьев, В.Л. Аксенов, А.А. Беляков и др. Опыт эксплуатации исследовательского реактора-бустера ИБР-30 и проект его модернизации – создание нового импульсного источника нейтронов ИРЕН. – Труды XII ежегодной конференции Ядерного общества России. НИИАР, Дмитровград, 25-29 июня 2001 г. (в печати).
7. М.С. Авиллов, А.В. Александров, О.Ю. Баженов и др. Форинжектор для электрон-позитронных фабрик. – Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ, 25-27 октября 1994 г. Том 3, стр.23-28. Протвино, 1995 г.
8. П.В. Логачев, В.М. Павлов, А.Р. Фролов, С.М. Гуров, А.П. Сумбаев, В.А. Швец, В.В. Кобец, А.С. Каюков. Испытания опытного образца ускоряющей секции для ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Научный отчет ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 2001 г.