

P9-2025-16

А. П. Сумбаев, Е. А. Голубков, И. С. Жиронкин,
А. С. Каюков, В. В. Кобец, К. И. Михайлов,
И. Д. Пономарёв, А. Н. Репкин, К. В. Удовиченко,
В. Н. Швецов

УСКОРИТЕЛЬ ЛУЭ-200. СОСТОЯНИЕ,
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ

Ускоритель ЛУЭ-200.

Состояние, возможности и проблемы развития

Сообщается о статусе ускорительной установки Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) — драйвера интенсивного импульсного источника резонансных нейтронов. Представлены общая схема линейного ускорителя электронов и особенности его базовых систем. ЛУЭ-200 состоит из двух ускоряющих секций на бегущей волне с рабочей частотой 2856 МГц с системами компрессии СВЧ-мощности SLED-типа. Импульсный ток пучка на выходе ускорителя достигает 2 А с длительностью импульса 80–120 нс. При средней энергии частиц пучка 90–110 МэВ и частоте циклов ускорения 50 Гц средняя мощность пучка достигает 0,95–1,0 кВт. Интегральный поток нейтронов (в тепловом и резонансном энергетическом диапазоне) от неразмножающей W-мишени достигает значений $\sim 1,06 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Обсуждаются возможности дальнейшего развития ускорителя.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка и в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Accelerator LUE-200.

Status, Capabilities and Development Problems

The article reports on the status of the accelerator facility of the Laboratory of Neutron Physics (LNP) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna) — the driver of an intense pulsed source of resonant neutrons. The general scheme of the linear electron accelerator and the features of its basic systems are presented. LUE-200 consists of two accelerating sections on a traveling wave with an operating frequency of 2856 MHz with SLED-type microwave power compression systems. The pulsed beam current at the accelerator output reaches 2 A with a pulse duration of 80–120 ns. With an average beam particle energy of 90–110 MeV and an acceleration cycle frequency of 50 Hz, the average beam power reaches 0.95–1.0 kW. The integral neutron flux (in the thermal and resonance energy range) from a non-multiplying W-target reaches values of $\sim 1.06 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$. The possibilities of further development of the accelerator are discussed.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics and Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Созданная в Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований научная школа по нейтронной ядерной физике [1] добилась общепризнанных результатов в исследовании свойств нейтрона, в изучении эффектов нарушения симметрии фундаментальных взаимодействий нейтронов с ядрами, структуры возбужденных компаунд-состояний тяжелых ядер, образованных после захвата резонансных нейтронов, а также механизмов ядерного деления и альфа-, гамма- и протонного распада этих состояний. Эти успехи в значительной степени обусловлены наличием и использованием в ЛНФ собственных импульсных источников нейтронов. В 1960 г. в ЛНФ ОИЯИ был запущен первый в мире реактор периодического действия ИБР, основанный на принципе механической модуляции реактивности, с длительностью импульса нейтронов до 80 мкс. С тех пор Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ фактически постоянно занималась не только физическими исследованиями в области нейтронной физики, но и созданием новых интенсивных импульсных источников нейтронов, их модификацией и развитием как профильных базовых установок.

С целью сокращения длительности импульса нейтронных пучков в 1964 г. реактор периодического действия ИБР был реконструирован в нейтронный источник бустерного типа — комбинацию модернизированного реактора ИБР и электронного ускорителя — микротрона на 30 МэВ. Электронный пучок микротрона в урановой мишени генерировал тормозные гамма-кванты, которые затем производили фотонейтроны. Подкритическая сборка размножала первичные потоки нейтронов в 100–200 раз. Длительность импульса нейтронов при этом сократилась до 3–4 мкс.

После успешной работы в течение нескольких лет в 1968 г. реактор ИБР был остановлен. И реактор, и микротрон были демонтированы, а в 1969 г. реактор периодического действия с вариацией реактивности ИБР был реконструирован в нейтронный источник бустерного типа ИБР-30 — комбинацию модернизированного реактора с вращающейся частью активной зоны и генератора первичных фотонейтронов — линейного ускорителя на бегущей волне с пучком электронов с энергией до 35 МэВ. Линейный ускоритель электронов, известный как ЛУЭ-40, введен в строй в марте 1970 г. и проработал более 30 лет.

До 1988 г. нейтронный источник ИБР-30 работал в режиме импульсного реактора и в режиме импульсного бустера, а с 1988 г. только в режиме бустера. Импульс пучка электронов ускорителя был сфазирован с модуляцией реактивности активной зоны (от $\kappa_{эф} = 0,944$ между импульсами

до $\kappa_{\text{эф}} = 0,995$ в импульсе быстрых нейтронов). При использовании урановых вкладышей во вращающейся части активной зоны с коэффициентом размножения нейтронов бустером, равным 200, источник обеспечивал интенсивность генерации нейтронов до $5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ в импульсах длительностью 4,5 мкс с частотой 100 Гц.

К концу тридцатилетнего периода эксплуатации нейтронный источник ЛУЭ-40 + ИБР30 выработал свои ресурсы механической и радиационной стойкости и был остановлен в 2001 г., но уже в 1989–1991 гг. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ началось обсуждение предложений по новому источнику, условно названному НИВР — нейтронный источник высокого разрешения (в английской транскрипции HRNS). При выработке концепции нового источника нейтронов с учетом опыта работы ЛНФ с электронными ускорителями был определен вариант бустера с драйвером — линейным электронным ускорителем на бегущей волне дециметрового диапазона.

В окончательном виде проектное предложение нового источника, концепция которого являлась прямым развитием идеи бустерного источника нейтронов ЛУЭ-40 + ИБР30, было сформулировано в сообщении ОИЯИ в 1992 г. [2]. В нем была представлена новая ядерная установка — источник нейтронов с энергией в области резонансных нейтронов (от тепловых до быстрых), базирующийся на подкритической сборке без модуляции реактивности активной зоны с внешней инжекцией фотонейтронов, образованных гамма-квантами, возникающими при торможении электронного пучка линейного ускорителя в мишени-конвертере. Основное предназначение нового источника — обеспечение импульсными потоками нейтронов времяпролетных (TOF — Time Of Flight) спектрометров высокого разрешения.

В новый источник предлагалось включить:

- «размножающую» мишень — выполненный из тяжелого материала $e-\gamma-n$ конвертер, окруженный бланкетом с быстрой глубоко подкритической плутониевой сборкой, размножающей нейтроны за счет деления ядер плутония, инициированного фотонейтронами, что, по оценкам, позволяло обеспечить получение короткого импульса быстрых нейтронов (до 0,43 мкс) со средней интенсивностью до $9 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$.

- драйвер источника нейтронов — современный электронный линейный ускоритель с параметрами:

- энергия — более 60 МэВ;
- ток пучка в импульсе — 1,5 А;
- цикличность ≤ 200 Гц;
- длительность импульса $\leq 0,3$ мкс;
- средняя мощность ≈ 10 кВт.

Новая установка получила название ИРЕН (Источник резонансных нейтронов) [2] и проектировалась, в первую очередь, для нейтронных спектрометров по времени пролета с развитой сетью экспериментальных нейтронных каналов. *При сокращении длительности импульса нейтронов в десять раз в проект ИРЕН заложено улучшение «качества»*

нейтронных спектрометров (отношение потока нейтронов к квадрату длительности импульса) более, чем на два порядка. Достижение проектных параметров позволяло Объединенному институту ядерных исследований стать обладателем современного нейтронного источника для ядерной и прикладной физики с параметрами, близкими для лучших мировых источников нейтронов.

В табл. 1 приведены характеристики импульсных источников нейтронов Лаборатории нейтронной физики этого типа вместе с новым источником. Целевое направление развития этих источников состояло в сокращении длительности импульса нейтронных потоков. При этом не обязательным, но желательным условием его развития было сохранение средней интенсивности потока нейтронов.

Таблица 1. **Характеристики ряда импульсных источников нейтронов ЛНФ ОИЯИ**

Параметр	ИБР	ИБР + микротрон	ИБР-30 (линак ЛУЭ-40 + ИБР)	Проект ИРЕН (линак ЛУЭ-200 + размножающая мишень)
Длительность нейтронного импульса, мкс	36	3–4	4,5	0,4
Частота циклов, Гц	8–80	50	100	150
Коэффициент размножения нейтронов в активной зоне	400	200	от 200 до нескольких тысяч в режиме реактора	32,7
Средняя интенсивность (в 4 π -пространстве), с ⁻¹	—	—	5 · 10 ¹⁴	9 · 10 ¹⁴

После анализа нескольких проектных предложений Ученым советом ОИЯИ было одобрено концептуальное предложение Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН [3] о разработке физобоснования линейного ускорителя для установки ИРЕН.

Решение о создании установки ИРЕН было принято Ученым советом ОИЯИ в 1994 г. после получения от Института ядерной физики Сибирского отделения РАН гарантий на изготовление и поставку в ОИЯИ двух ускоряющих секций и приобретение Объединенным институтом клистрона 5045 SLAC для питания ускоряющих секций СВЧ-мощностью. При этом предполагалось, что на первом этапе создания ускоритель будет состоять из одной ускоряющей секции, запитываемой от одного клистрона с использованием системы компрессии СВЧ-мощности. Развитие установки до двухсекционного ускорителя с полной проектной мощностью предполага-

лось осуществить позднее, после приобретения второго клистрона 5045 SLAC, обладающего высокой коммерческой стоимостью. Как следует из проектного предложения, первоначально установка ИРЕН планировалась как источник бустерного типа, однако в связи с тем, что в процессе проек-

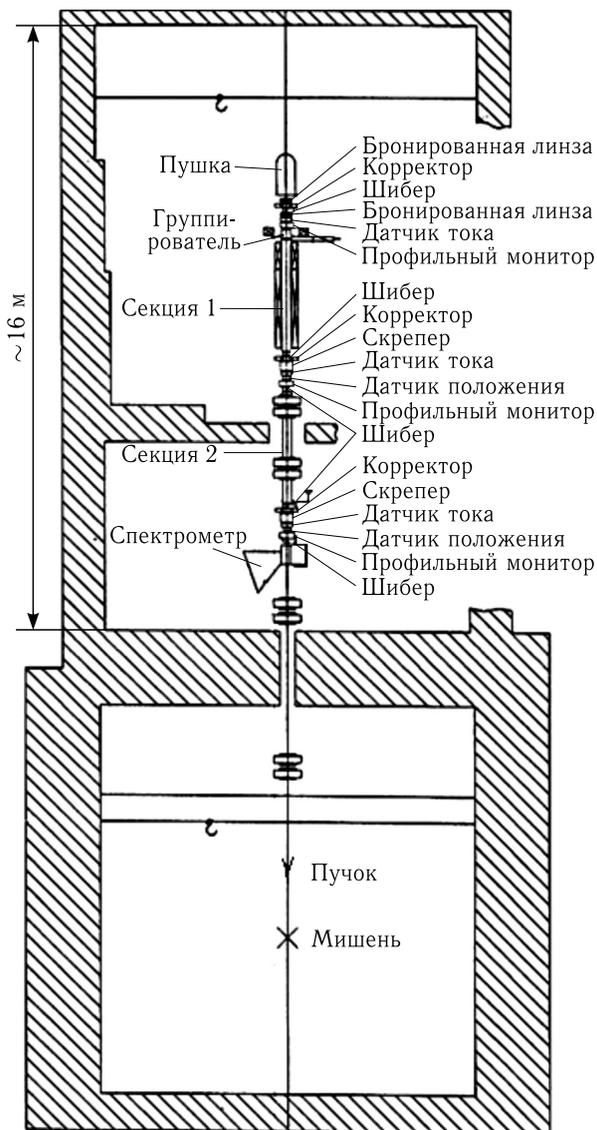


Рис. 1. Общая схема ускорителя ЛУЭ-200 [3]

тирования из-за административных и финансовых проблем разработчикам проекта пришлось отказаться от использования активной зоны и от статуса ядерной установки вообще, установка ИРЕН перешла в разряд источников, генерирующих нейтроны на основе фотоядерной реакции, инициированной тормозными гамма-квантами пучка электронов от ускорителя, т. е. в разряд так называемых установок ADS (Accelerator Driving System).

При разработке технических заданий на проектирование комплекса оборудования ускорителя предложены решения по общей компоновке и размещению вертикально ориентированного ускорителя в верхних этажах здания существовавшего ранее источника ЛУЭ-40 + ИБР-30 (рис. 1).

Для обеспечения указанных требований структура ускорителя разбита на модули, содержащие отдельные узлы или компоненты ускорительного тракта:

- источник электронов — электронная пушка (ЭП); включает в себя пушку, два фокусирующих магнита (МЛ1 и МЛ2) и магнит-корректор траектории пучка (КИЭ);

- участок формирования пучка — промежуток между пушкой и группирователем, включает в себя магнитную линзу (МЛЗ) и диагностический бокс № 1;

- ускоряющий модуль № 1, включает в себя первую ускоряющую структуру, группирователь, фокусирующий соленоид ускоряющей секции (С1) и соленоидальную катушку группирователя (КГ), два корректора траектории пучка (КС1 и КС2), смонтированные внутри соленоида С1;

- промежуточный участок № 1, включает в себя корректор траектории пучка (КЗ) и диагностический бокс № 2;

- ускоряющий модуль № 2, включает в себя вторую ускоряющую структуру и смонтированные на ней две пары квадрупольных линз (Q2-Q3, Q4-Q5);

- промежуточный участок № 2, включает в себя магнит-корректор траектории пучка К4 и диагностический бокс № 3;

- участок магнитного спектрометра, включает в себя участок электропровода с вакуумной камерой магнитного спектрометра, помещенной внутри зазора ярма магнита спектрометра и диагностический бокс № 4;

- канал транспортировки пучка от спектрометра до мишени — участок электропровода со смонтированными на нем двумя парами квадрупольных линз (Q6-Q7, Q8-Q9) и корректор траектории пучка К5;

- мишень, включает в себя диагностический бокс № 5 с выпускным патрубком с окном, закрытым мембраной из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, и контейнер с мишенью — W-конвертером, охлаждаемым дистиллированной водой.

Сформированные модули смонтированы в верхнем ускорительном зале на установленной вертикально несущей ферме, а в нижнем ускорительном зале — на вертикальных колоннах-опорах, выполненных из толстостенных нержавеющей труб (рис. 2, 3).

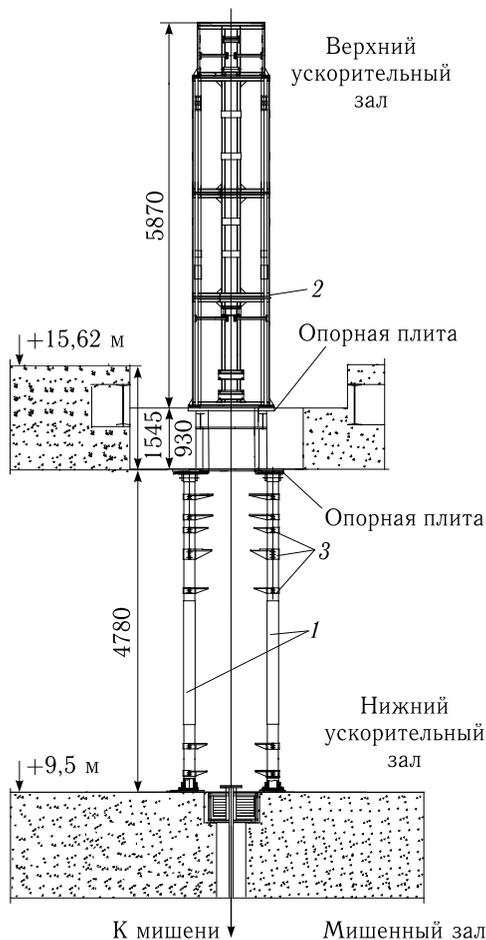


Рис. 2. Общая компоновка несущих конструкций ускорителя: 1 — опорные колонны для нижних модулей; 2 — несущая ферма для модулей верхнего этажа; 3 — кронштейны для монтажа оборудования

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Ускоряющая система ЛУЭ-200 базируется на разработанных и изготовленных в ИЯФ секциях на бегущей волне дециметрового диапазона (2856 МГц) с модой колебаний $2\pi/3$ и постоянным импедансом [4, 5]. Секции представляют собой круглые диафрагмированные волноводы, состоящие из 83 резонаторных ячеек и двух согласующих трансформаторов типа СВЧ-волны — преобразователей основной моды волноводного тракта Н10 в ускоряющую моду Е01 бегущей вдоль секции электромагнитной волны. Характеристики секции представлены в табл. 2.



Рис. 3. Общая компоновка ускорителя. Вид снизу

Таблица 2. **Параметры ускоряющей секции**

Рабочая частота, МГц	2855,05
Внутренний диаметр ячейки $2b$, мм	83,75
Диаметр пролетного отверстия $2a$, мм	25,9
Толщина диафрагмы, мм	4
Период, мм	34,99
Коэффициент перенапряжения	1,7
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Относительная фазовая скорость волны β_{ϕ}	1
Относительная групповая скорость волны $\beta_{гр}$	0,021
Длина секции L , м	2,93
Полное число ячеек с двумя ТТВ	85
Собственная добротность Q_0	13200
Шунтовое сопротивление R_{sh} , МОм/м	51
Время заполнения секции $T_f = L/v_{гр}$, мкс	0,465

Схема ускоряющей системы, предложенная Институтом ядерной физики в физобосновании [3], реализована на ускорителе с изменениями в части подключения группирователя к питанию СВЧ-мощностью (рис. 4). В схеме предусмотрено питание каждой из ускоряющих секций клистрономы, каждый из которых запитывается от собственного модулято-

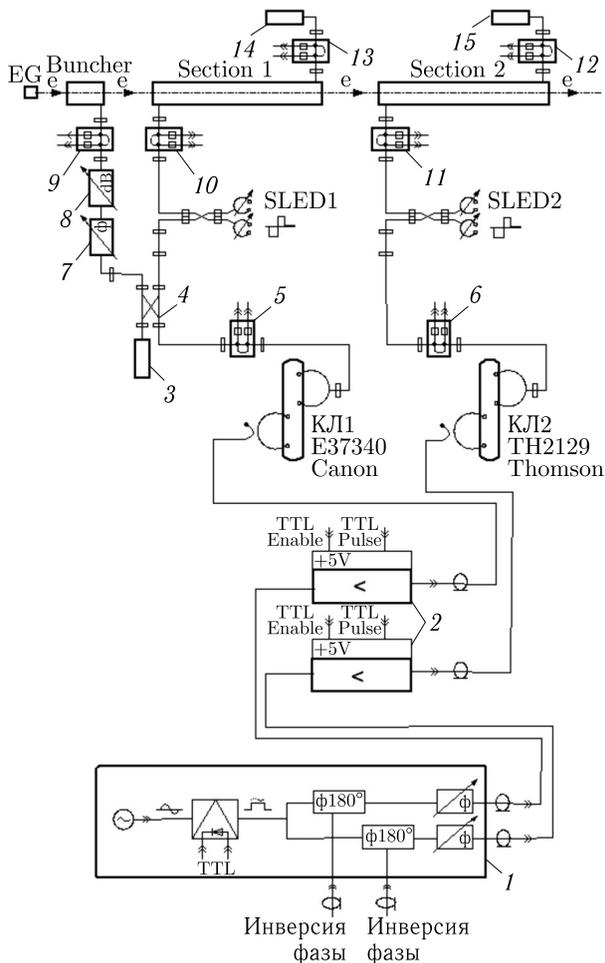


Рис. 4. Схема ускоряющей системы ЛУЭ-200 со схемой возбуждения клистронов КЛ1 и КЛ2. EG — электронная пушка, SLED1 и SLED2 — системы компрессии СВЧ-мощности. 1 — двухканальный генератор рабочей частоты 2856 МГц с переворотом фазы в каналах, 2 — предусилители СВЧ-мощности возбуждения клистронов, 3, 14, 15 — оконечные высокочастотные нагрузки, 4 — направленный ответвитель, 5, 6, 9-13 — измерительные ответвители, 7 — фазовращатель, 8 — аттенюатор

ра. Возбуждение клистронов синхронизировано от единого генератора — синтезатора частоты 2856 МГц. В СВЧ-тракты, питающие ускоряющие секции, включены системы компрессии СВЧ-мощности типа SLED [6, 7], состоящие из двух накопительных резонаторов и 3-децибельного шелевого моста. Питание группирователя предусмотрено ответвлением от СВЧ-тракта первой ускоряющей секции (перед SLED1) части СВЧ-мощности первого клистрона через волноводный направленный ответвитель (НО) с ослаблением 17 дБ и дополнительную цепочку с фазовращателем Φ ($0-350^\circ$) и регулятором мощности — аттенюатором dB ($0-22$ дБ).

Для группировки пучка в физобосновании ускорителя в ИЯФ предложен группирователь на стоячей волне с экспоненциально нарастающим полем в структуре с большими потерями, состоящей из четырех ячеек, геометрия которых повторяет геометрию ячеек ускоряющей секции [8]. Группирователь стыкуется непосредственно с ускоряющей секцией без пространства дрейфа, поэтому темп ускорения в нем в соответствии с [8] должен превышать 20 МэВ/м, а СВЧ-мощность, подаваемая на группирователь, должна составлять около 110 кВт.

СВЧ-СТАНЦИИ

В 2007 г. из-за повреждения клистрона 5045 SLAC при монтаже ускорителя ЛУЭ-200 и отсутствия в ОИЯИ второго аналогичного клистрона было принято решение об адаптации ускоряющей системы в составе одной секции под имеющиеся в наличии в ОИЯИ клистроны TH2129 Thomson с максимальной выходной импульсной мощностью 20 МВт. В связи этим были проанализированы [9] возможности построения СВЧ-станций на базе источников СВЧ-мощности — клистронов дециметрового диапазона разной мощности 5045 SLAC, TH2129 Thomson, E 3730A Toshiba, E37340 Canon (табл. 3):

По результатам анализа можно заключить следующее.

— Показано, что снижение СВЧ-мощности, поступающей от источника, приводит не только к снижению энергосодержания ускоренного пучка в импульсе и снижению его средней мощности, но и к трансформации его энергетического спектра со сдвигом в область меньших энергий и увеличением ширины спектра.

— Определено, что замена клистрона 5045 SLAC на клистрон TH2129 Thomson на ускорителе допустима в целях получения пучков электронов, способных создавать потоки нейтронов, представляющие интерес для постановки на ИРЕН спектрометрических экспериментов, основанных на методе времени пролета. Замена клистрона 5045 на клистрон E3730A Toshiba целесообразна для работы ускорителя в режимах с частотой циклов до 50 Гц.

— Сформулирован вывод о том, что при разработке модулятора для ЛУЭ-200 следует обеспечить «гибкий» вариант схемы с возможностью реформатирования модулятора с адаптацией к альтернативному клистроноу с иным входным импедансом.

Таблица 3. Параметры клистронов 10-см диапазона (2856 МГц): 5045 SLAC, TH2129 Thomson, E3730A Toshiba, E37340 Canon

Параметр	5045 SLAC (США)	TH2129 Thomson (Франция)	E3730A Toshiba (Япония)	E37340 Canon (Япония)
Максимальная СВЧ-мощность на выходе (имп./средн.)	63 МВт/40 кВт	20 МВт/30 кВт	50 МВт/10 кВт	50 МВт/27 кВт
Количество СВЧ-выводов	1 вывод +2 СВЧ-окна	1 вывод + одно СВЧ-окно	1 вывод +1 СВЧ-окно	2 вывода +2 СВЧ-окна
Тип катода	Металло-пористый	Оксидный	Металло-пористый	Металло-пористый
Используемый импульсный трансформатор	PS-238-220-00 SLAC	PS-238-220-00 SLAC	VT-61169 Toshiba	VT-61187 Toshiba
Коэффициент трансформации импульсного трансформатора	1 : 15	1 : 15	1 : 15	1 : 15
Индуктивность первичной обмотки импульсного трансформатора	$L_{\mu} = 0,36$ мГн $L_S = 3,5$ мкГн	$L_{\mu} = 0,36$ мГн $L_S = 3,5$ мкГн	$L_{\mu} = 0,92$ мГн $L_S = 2,4$ мкГн	$L_{\mu} = 1,33$ мГн $L_S = 2,84$ мкГн
Габариты (максимальные размеры)	0,9 × 0,9 м Высота 2,2 м	1320 мм, Ø200 мм	1360 мм, Ø300 мм	1610 × 400 мм

МОДУЛЯТОРЫ

Схема генераторов высоковольтного импульсного питания усилителей СВЧ-мощности — клистронов выбрана на основе анализа различных вариантов, использующих формирование и передачу рабочего импульса напряжения на клистроне при разряде тиратронами формирующих линий (ФЛ) на первичную обмотку высоковольтных импульсных трансформаторов, питающих клистроны (рис. 5). Аналитическими оценками и программными расчетами (Pspice) определены параметры ФЛ для клистронов S-диапазона (2856 МГц), выбраны основные компоненты схемы модулятора: высоковольтные зарядные устройства инверторного типа (CCPS, Dawonsys, Корея), тиратроны CX1836A (E2V, England), конденсаторы GA 37574M (General Atomics, USA).

По итогам расчетных и экспериментальных исследований, выполненных на стенде и на ускорителе, запущены два модулятора под условным наименованием «Модулятор 180 МВт/180 кВт», изготовленные компанией Dawonsys (Корея) [10].

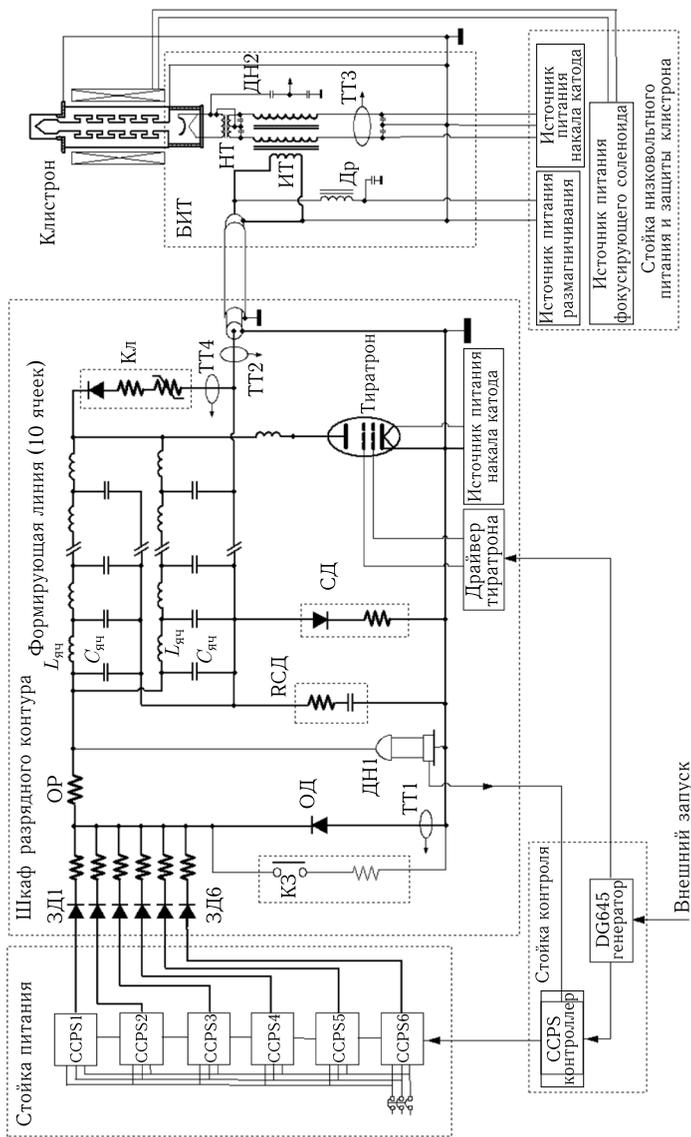


Рис. 5. Принципиальная схема модулятора 180 МВт/180 кВт: ЗД1–ЗД6 — защитные диоды; ОР — «обратный» резистор; ОД — «обратный» диод; С_{яч} — конденсаторы ячеек; L_{яч} — индукторы ячеек; ИТ — высоковольтный импульсный трансформатор; БИТ — бак (танк) высоковольтного импульсного трансформатора; НТ — накальный трансформатор; Др — дроссель цепи размагничивания сердечника ИТ; КЗ — короткозамыкатель с гасящим резистором; ТТ1–ТТ4 — измерительные трансформаторы тока; ДН1–ДН2 — высоковольтные измерительные делители напряжения; РСД — R-C демпфер; Кл — цепочка клиперного диода ФЛ; СД — цепочка срезающего диода (снаббер); DG645 — генератор задержанных импульсов

Стойка питания включает шесть включенных параллельно высоковольтных источников питания инверторного типа ССРС1–ССРС6 мощностью по 30 кВт. Суммарная средняя мощность стойки составляет $6 \times 30 = 180$ кВт, а пиковая зарядная способность стойки составляет $37,5 \text{ кДж/с} \times 6 = 225 \text{ кДж/с}$.

Работа схемы поясняется рис. 6, а, на котором представлены эпюры зарядного напряжения на ФЛ и зарядного тока на протяжении двух циклов зарядки–разрядки ФЛ, где период следования циклов $T_{\text{ц}} = t_{\text{зар}} + t_{\text{ст}} + t_{\text{з}}$ включает в себя: $t_{\text{зар}}$ — время зарядки ФЛ; $t_{\text{ст}}$ — время, необходимое для стабилизации высокого напряжения ($\sim 0,5\text{--}1,0$ мс), а время задержки следующего цикла $t_{\text{з}}$ определяется, в основном, величиной минимального времени, необходимого для закрытия тиратронов ($\geq 0,1$ мс).

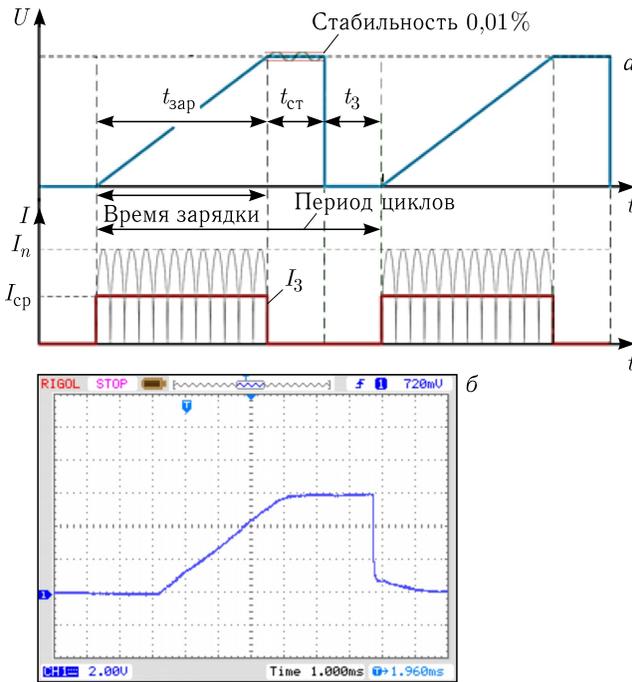


Рис. 6. а — эпюры зарядного напряжения ($U_{\text{фл}}$) и зарядного тока ($I_{\text{з}}$) модулятора «180 МВт/180 кВт» в течение двух циклов; б — осциллограмма измеряемого зарядного напряжения $U_{\text{фл}}$; развертка — 2,5 мс/дел.

Время зарядки ФЛ $t_{\text{зар}}$ определяется возможностями источников ССРС и величиной суммарной емкости ФЛ. Суммарная емкость двух параллельных ФЛ из 10 ячеек составляет $C_{\Sigma} = 50 \text{ нФ} \times 10 \times 2 = 1,0 \text{ мкФ}$. Эта емкость должна заряжаться до $U_{\text{фл}} = 47 \text{ кВ}$. В одном цикле зарядки в ФЛ запасается энергия $(C(U_{\text{фл}})^2/2)$ Дж за время $t_{\text{зар}}$, которое будет

определяться как

$$t_{\text{зар}} = \frac{0,5CU_{\text{фл}}^2 \text{ (Дж)}}{225 \text{ (кДж/с)}} = 4,9 \text{ мс.}$$

Следовательно, минимальный период следования циклов составляет $T_{\text{мин}} \approx \approx 4,9 + 0,1 + 0,5 = 5,5 \text{ мс}$. Таким образом, выбранная схема модулятора и зарядное устройство способны обеспечивать импульсным напряжением питание клистрона с частотой циклов до 150 Гц ($T_{\text{ц}} = 6,67 \text{ мс} \geq T_{\text{мин}}$). На рис. 7 и 8 представлены результаты тестирования схемы на стенде и на ускорителе.

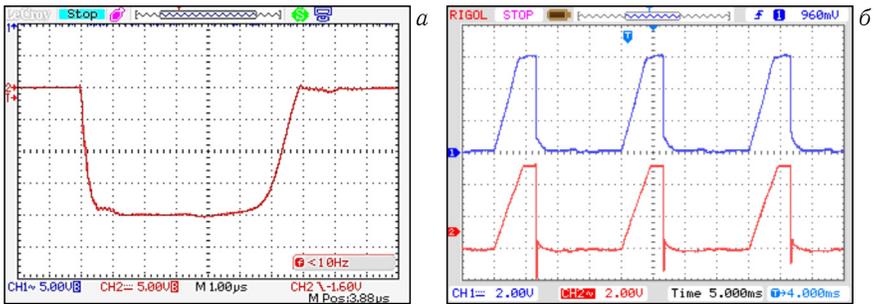


Рис. 7. Результаты тестирования схемы модулятора: *а* — напряжение на активной согласованной нагрузке при работе модулятора на стенде; *б* — зарядное напряжение на ФЛ при работе на ускорителе с частотой 50 Гц

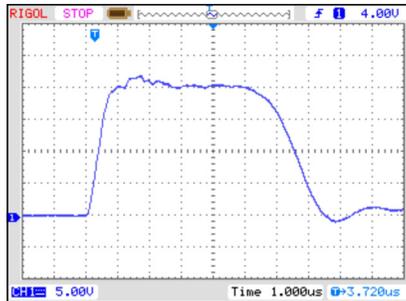


Рис. 8. Осциллограмма тока пучка клистрона

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

Основные требования к источнику электронов ускорителя ЛУЭ-200 сформулированы в физобосновании ЛУЭ-200: энергия электронов — 200 кэВ, максимальный ток пучка в импульсе — 10 А, длительность тока пука — 250 нс, эмиттанс $\leq 0,01\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$. Эти требования определены для устойчивого захвата частиц пучка в процесс группировки и дальнейшего ускорения в регулярных секциях [3].

На ЛУЭ-200 использована имевшаяся в наличии в ЛНФ импульсная двухэлектродная электронная пушка от ускорителя ЛИУ-30 (совместная разработка НИИЭФА и ЛНФ ОИЯИ, 1980 г.) на 200 кВ с катодной ножкой от клистрона КИУ-12, на которой смонтирован катодный узел серийной электронной лампы ГС-34 [11].

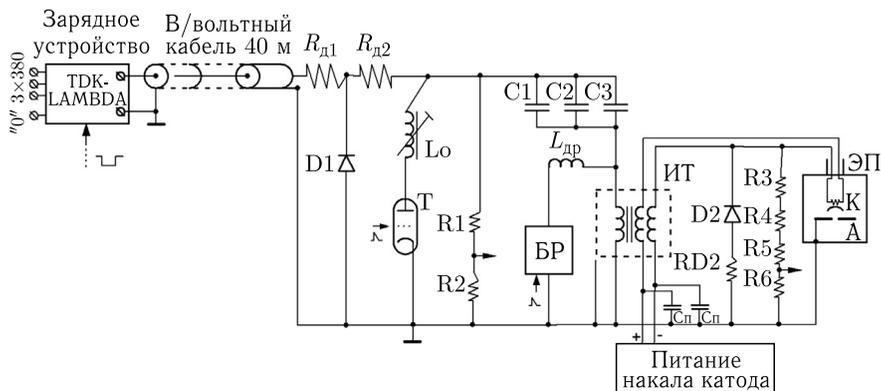


Рис. 9. Схема модулятора двухэлектродной электронной пушки с повышающим импульсным трансформатором 50/250 кВ: ЭП — электронная пушка; К — катод, А — анод; ИТ — высоковольтный импульсный трансформатор (50/250 кВ); Т — тиратрон ТГИ1-2500/50; БР — блок импульсного размагничивания; Д1 — защитный диод; Д2 — в/в-диод, срезающий послеимпульсы обратной полярности; $R_{д1}$, $R_{д2}$ — защитные резисторы (ТВО-60), $K_d = 10000$; R1/R2 — высоковольтный делитель напряжения $(R3 + R4 + R5)/R6$ — высоковольтный делитель напряжения (R3, R4, R5 — резисторы С5-40, 6,8 кОм, R6 = 6,8 Ом), $K_d = 3000$; C1–C3 — накопительные конденсаторы (1,2 нФ, 5 нФ, 10 нФ, 50 кВ); C4, C5 — проходные конденсаторы; L₀ — ферритовый обостритель — дроссель насыщения; L_{др} — защитный дроссель

Схема импульсного модулятора, питающего пушку высоким импульсным напряжением, представлена на рис. 9. Высоковольтный импульс напряжения (до 250 кВ) подается на катод электронной пушки при разряде тиратроном накопительной емкости на первичную обмотку импульсного трансформатора. Длительность импульса напряжения регулируется в пределах 200–350 нс (по основанию) выбором величины емкости и количеством конденсаторов C1–C3. Анодом электронной пушки служит стенка вакуумной анодной камеры пушки с отверстием $\varnothing 43$ мм, закрытым сеткой из нержавеющей стали с размерами ячейки 2×2 мм.

В качестве зарядного устройства для модулятора при работе с частотой циклов до 50 Гц используется инверторный источник питания TDK-Lambda 402L ($U_{\text{вых}} = 0-50$ кВ, $I_{\text{ср}} = 0,2$ А, $P_{\text{вых}} = 5$ кВт пиковая и $P_{\text{вых}} = 4$ кВт средняя). Осциллограммы, иллюстрирующие работу зарядного устройства, представлены на рис. 10.

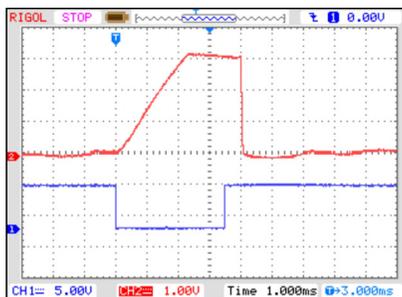


Рис. 10. Осциллограммы работы зарядного устройства. Нижний луч — сигнал снятия запрета запуска зарядки, верхний — напряжение на накопительной емкости модулятора пушки. Развертка осциллографа — 1 мс/дел.

Пушка обеспечивает импульсный ток пучка ускорителя до 4 А с длительностью импульса 100–300 нс по основанию с частотой циклов до 150 Гц. Работоспособность пушки определяется ресурсом катода и зависит от вакуумных условий и режима накала катода.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитную систему ускорителя образует комплекс электромагнитов, формирующих магнитные поля сопровождения пучка при ускорении и транспортировке пучка, система электромагнитов, корректирующих траекторию пучка, и система источников питания электромагнитов. Структура магнитной системы представлена на рис.11 в составе канала соленоидальной фокусировки, канала жесткой фокусировки, корректирующих магнитов и магнита спектрометра.

Соленоидальный канал. Формирование и фокусировка пучка на участке от катода пушки до входа в группирователь осуществляется короткими соленоидальными магнитными линзами МЛ1, МЛ2, МЛ3. В группирователе и в первой ускоряющей секции транспортировка пучка осуществляется непрерывным нарастающим магнитным полем соленоидальной катушки КГ и далее полем соленоида С1. Физическим обоснованием ускорителя ЛУЭ-200 [3] для магнитного сопровождения пучка при ускорении в первой ускоряющей секции предложена комбинация двух соленоидов со встречными продольными полями. Величина и распределение магнитного поля в соленоидах оценивались на основе численного моделирования пучка частиц,двигающихся в канале с постоянным ускорением, имеющих энергию $E_b = 200$ кэВ на входе и $E_b \sim 100$ МэВ на выходе ускоряющей секции. Магнитное поле «подхватывает» пучок на входе в группирователь, затем поле плавно нарастает и сопровождает пучок по всей длине ускоряющей структуры.

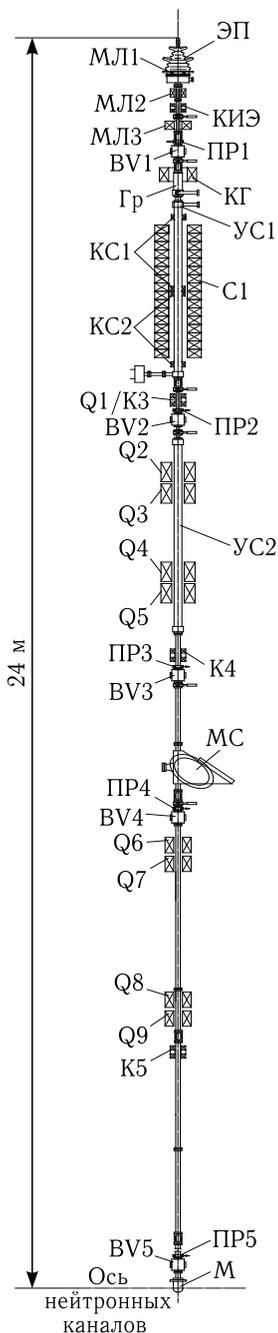


Рис. 11. Структура магнитной системы ускорителя с элементами ускоряющей системы и системы диагностики пучка: ЭП — электронная пушка; Гр — СВЧ-группирователь; УС1 — первая ускоряющая секция; УС2 — вторая ускоряющая секция; ВВ1, ВВ2, ВВ3, ВВ4, ВВ5 — бимбьюеры (датчики положения пучка); ПР1, ПР2, ПР3, ПР4, ПР5 — пояса Роговского; МЛ1, МЛ2, МЛ3 — короткие соленоидальные линзы; КГ — катушка группирователя, короткий соленоид; С1 — фокусирующий соленоид первой секции; КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5 — магниты коррекции траектории пучка; Q1 — первая квадрупольная линза*; Q2/Q3, Q4/Q5 — дублиты широкоапертурных квадрупольных линз; Q6/Q7, Q8/Q9 — дублиты квадрупольных линз; МС — магнитный спектрометр; М — мишень

*И в расчетах, и в эксперименте установлена полная неэффективность линзы Q1. В процессе эксплуатации линза демонтирована с ускорителя и исключена из магнитной системы.

Система двух соленоидов со встречными продольными полями предлагалась для компенсации азимутального «закручивания» пучка при входе в краевое поле первого соленоида.

Эффективность решений, предложенных в [3], проверялась в экспериментах на первой ускоряющей секции форинжектора ускорительного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН [12, 13] и в расчетах динамики пучка электронов в ускорительном тракте ЛУЭ-200 [14, 15]. В соленоиде первой ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5 соотношение компонент магнитного поля на оси B_{\perp}/B_{\parallel} составляет $(5-7) \cdot 10^{-2}$. Отмечено, что при улучшении указанного качества поля соленоида можно дополнительно снизить его максимальную величину, сохранив при этом поперечную устойчивость пучка. В расчетах [14, 15] установлено, что для успешной транспортировки пучка ЛУЭ-200 в ускоряющей структуре с фокусирующими соленоидами можно отказаться от переполюсовки сопровождающего магнитного поля. По итогам проводки пучка через ускоряющую секцию и в расчетах, и в эксперименте сформулирован вывод о том, что кроме величины сопровождающего поля существенное значение имеет его качество, характеризуемое отношением поперечной компоненты магнитного поля B_{\perp} на оси ускоряющей системы к продольной компоненте B_{\parallel} .

В результате было предложено решение [16] о разработке новой конструкции соленоида первой ускоряющей секции без переполюсовки магнитного поля. Фокусирующий соленоид с многослойной обмоткой возбуждения, состоящей из 16 катушек, разработан, изготовлен и исследован на специализированном стенде [17], а затем установлен и исследован на штатном месте на ускорителе (рис. 12). Параметры фокусирующего соленоида первой секции представлены в табл. 4.

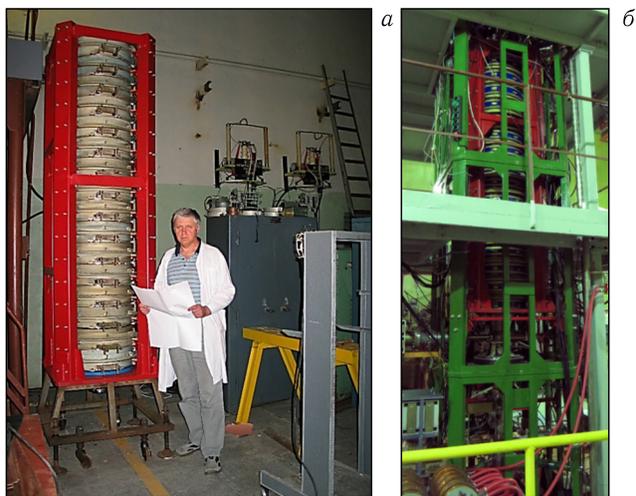


Рис. 12. Общий вид соленоида первой ускоряющей секции: *а* — на стенде при контрольной сборке, *б* — на ускорителе

Таблица 4. Параметры фокусирующего соленоида первой секции

Число катушек (секций)	16
Число витков в катушке	100
Сечение токонесущей медной шины (трубки), мм	$12,5 \times 12,5$ \varnothing канала 7,5
Размеры катушки «по меди»: внутренний диаметр, мм наружный диаметр, мм длина катушки по оси, мм	260 530 146
Номинальный ток, А	300
Максимальный ток, А	400
Максимальные измеренные значения поля B_z , Тл, в центре соленоида: при $I_c = 100$ А при $I_c = 200$ А	0,08 0,16
Максимальное отношение $B_r \text{ max}/B_z \text{ max}$: на оси в апертуре $\varnothing 7$ мм в апертуре $\varnothing 14$ мм	$\pm 5 \times 10^{-3}$ $\pm 15 \times 10^{-3}$ $\pm 25 \times 10^{-3}$
Длина соленоида, мм	2700
Вес отдельной катушки, кг	130
Вес сборки, кг	2700

Жесткофокусирующий канал. Для транспортировки пучка от выхода первой ускоряющей секции до мишени установлен жесткофокусирующий канал квадрупольных линз: Q1 — на выходе из первой секции, вдоль второй ускоряющей секции — дублиты широкоапертурных одностипных



Рис. 13. Дублет линз Q2/Q3



Рис. 14. Дублет линз Q6/Q7

Таблица 5. **Параметры квадруполей и их положение в FD-канале транспортировки пучка**

Квадруполь	Длина «по железу» l , см	Физическая апертура \varnothing , мм	Рабочая апертура \varnothing , мм	Базовый градиент, Гс/см	Число витков в катушке	Базовый ток обмоток, А	Положение относительно конца первой секции, см
Q1	10	40	2	160	90 А · витков		32
Q2	20	160	30	300	50	180	119
Q3	20	160	30	300	50	180	149
Q4	20	160	30	300	50	180	296
Q5	20	160	30	300	50	180	328
Q6	20	60	30	300	82	22	700
Q7	20	60	30	300	82	22	742
Q8	20	60	30	300	82	22	1111
Q9	20	60	30	300	82	22	1151

квадрупольных линз Q2/Q3 (рис. 13), Q4/Q5 и дублеты квадрупольных однотипных линз Q6/Q7 (рис. 14), Q8/Q9 при транспортировке пучка от выхода второй секции до мишени. Параметры квадрупольных линз представлены в табл. 5.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная система ускорителя ЛУЭ-200 состоит из объемов ускорительного тракта совместно с установленными на них высоковакуумными агрегатами, вакуумными шиберами, вентилями и вакуумными сенсорами. В состав вакуумных объемов ускоряющих модулей включены объемы СВЧ-трактов — медные прогреваемые волноводы сечением 72×34 мм с резонаторами системы компрессии СВЧ-мощности (SLED) и измерительными направленными ответвителями. Требуемое разрежение остаточного газа в ускорительном тракте и, в первую очередь, в ускоряющих структурах составляет $\leq 10^{-8}$ Торр. Предел разрежения определяется десорбцией со стенок вакуумных объемов. Повышенная скорость газоотделения со стенок волноводного тракта, умножителя СВЧ-мощности и ускоряющей структуры обусловлена воздействием СВЧ-поля высокой напряженности и попаданием части электронов на стенки ускоряющих структур и электропровода. Необходимое для работы ускорителя разрежение в ускорительном тракте и в СВЧ-фидерах обеспечивается магниторазрядными агрегатами NM1–NM21, установленными в соответствии со схемой на рис. 15.

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В качестве систем контроля и управления ускорителя ЛУЭ-200 (далее СКУ) разработан комплекс электронного, компьютерного и сетевого оборудования, включающий:

- систему синхронизации (синхронизатор);
- систему блокировки, защиты и сигнализации (СБС);
- систему диагностики пучка, включая магнитный спектрометр;
- систему контроля и управления СВЧ-системой;
- систему управления источниками питания магнитной системы;
- систему контроля и управления вакуумной системой;
- аппаратуру контроля и управления системами охлаждения и термо-стабилизации.

СКУ построена как централизованная система управления. Схема системы представлена на рис. 16. Основной базой данных является Citadel-сервер среды LabView. Для повышения надежности и внешнего мониторинга создается резервная база данных Prometheus. В качестве датчиков и органов управления используются сенсоры (измерители разряжения, датчики температуры и протока охлаждающего дистиллята), блоки питания насосов вакуумной системы, блоки питания магнитов, блоки управления приводами диагностических постов и другие. Управление и мониторинг происходит с одного компьютера, на котором расположена база данных,

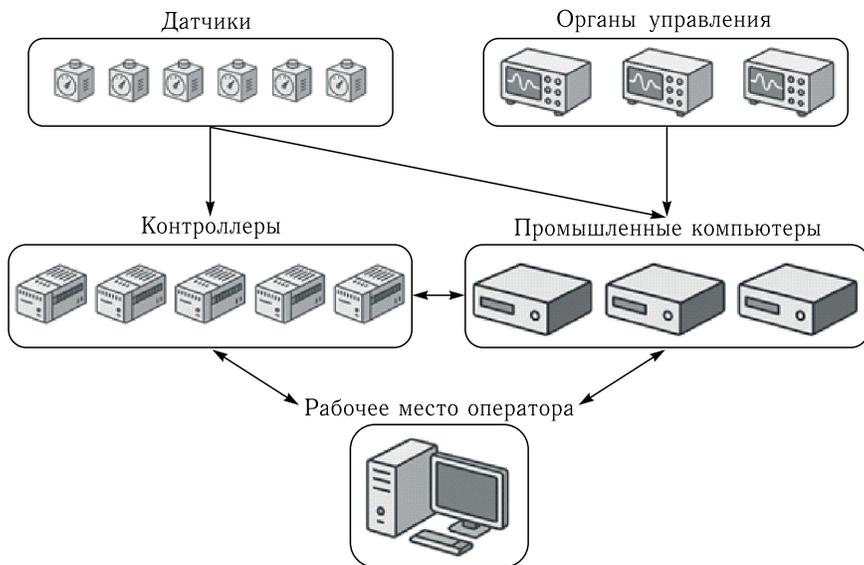


Рис. 16. Схема системы управления

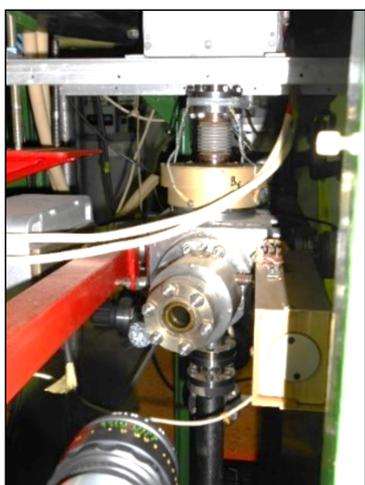
однако исторически сложилось, что контроль и управление некоторыми источниками питания системы фокусировки и системой термостатирования происходит через отдельные промышленные компьютеры.

Все данные, получаемые промышленными компьютерами и контроллерами, хранятся и обрабатываются на Citadel-сервере. Информация, получаемая с датчиков и органов управления, собирается как контроллерами РЛК210 и модулями МВ210 по дискретным и аналоговым входам, так и промышленными компьютерами по интерфейсам RS232/485, CAN и Ethernet.

Система синхронизации (синхронизатор). Система построена на базе двух стандартных генераторов DG645, один из каналов первого генератора выполняет роль задающего генератора, остальные каналы первого и второго генераторов выполняют роль генераторов задержанных импульсов. Кроме того, в системе синхронизации используются усилители-формирователи и быстрые ключи для формирования стартовых импульсов для силовых и измерительных систем ускорителя.

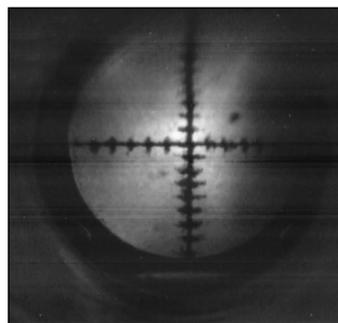
Для системы предварительного возбуждения клистронов — усилителей СВЧ-мощности в систему синхронизации ускорителя интегрирован двухканальный генератор — синтезатор рабочей (ускоряющей) частоты в диапазоне 2855–2872 МГц (рис. 4). В нем для обеспечения работы системы SLED в двух выходных каналах рабочей частоты синтезатора предусмотрена возможность переворота фазы на 180° относительно опорного сигнала.

Система диагностики пучка. Диагностический комплекс ускорителя ЛУЭ-200 образуют 5 диагностических постов № 1–5 (рис. 17, а), магнитный спектрометр МС — измеритель энергетических характеристик пучка



а

Камера 1
19:34:34 21.01.2009



б

Рис. 17. а) Общий вид диагностического поста с бимбьюером, б) изображение пучка, полученное с люминофорного экрана CCD-камерой, установленной на BV5. Диаметр экрана — 20 мм

и термопарный датчик контроля положения пучка, установленный перед вводом пучка в конвертер мишени. В комплект каждого диагностического поста входит стандартный набор средств диагностики: СМ (Current Monitor) + ВРМ (Beam Position Monitor). Расстановка диагностических постов на ускорителе представлена на схеме вакуумной системы (рис. 15). Расстановка поясов Роговского ПР1–ПР5 на ускорителе представлена на рис. 11.

В качестве мониторов тока пучка использованы магнитоиндукционные датчики — пояса Роговского (ПР), разработанные по схеме трансформаторов тока. В качестве датчиков положения пучка используются бимбьюеры ВV1–ВV5 — вводимые на пучок люминофорные экраны, наблюдаемые ССD-видеокамерами, установленными снаружи вакуумных объемов (на атмосфере). Ввод-вывод люминофорных экранов в пучок/из пучка внутри диагностического поста осуществляются с помощью пневматических или электромеханических манипуляторов.

Неразрушающий пучок термопарный датчик контроля положения пучка установлен в атмосфере ниже доньшка выпускного патрубка непосредственно перед вводом пучка в мишень. Чувствительными элементами датчика являются четыре термопары, установленные в плоскости, ортогональной оси пучка, на периферии области, занимаемой пучком. Дифференциал температур термопар, расположенных диаметрально по окружности, близкой к наружной границе сечения пучка, свидетельствует об отклонении пучка от оси. Информация о температурах термопар представляется в цифровом виде на операторском пульте и контролируется системой СБС. В случае, если дифференциал температур превышает заданное пороговое значение, выработывается команда для системы синхронизации на прерывание пучка (отключение запуска электронной пушки), сопровождаемая световыми и звуковыми АLARM-сигналами.

Анализатор энергии пучка — магнитный спектрометр. В качестве анализатора энергий частиц на ускорителе ЛУЭ-200 использована конструкция статического магнитного анализатора с совмещенными функциями спектрометра и спектрографа [19] с поворотом пучка на угол, близкий к 90° . Внешний вид магнита анализатора представлен на рис. 18.

В режиме спектрометра изменением уровня магнитного поля анализатор перестраивается для приема вдоль главной магнитооптической оси частиц с энергиями E_0 от 10 до 140 МэВ. В режиме спектрографа при фиксированном уровне поля, соответствующем энергии электронов E_0 , анализатор имеет возможность одновременно регистрировать частицы в диапазоне энергий $E_0 \pm 0,5E_0$. Таким образом, весь диапазон энергий частиц пучка, усваиваемых анализатором, составляет 0–210 МэВ. Диспергированные по энергиям частицы регистрируются позиционно-чувствительным коллектором со свинцовыми ламелями полного поглощения.

Основная погрешность измерений энергии анализатором $\Delta E/E$ оценивается как отношение величины шага ламельной линейки ΔL к радиусу траектории частиц $R_{л}$, попавших на конкретную ламель, т. е.



Рис. 18. Магнит спектрометра, установленный на ускорителе

$\varepsilon_{\text{л}} = \Delta E/E = \pm \Delta L/2R_{\text{л}}$. При объединении ламелей в группы (по $n = 2, = 3, = 4$ ламели) разрешающая способность детектора ухудшается и зависит от количества ламелей, объединенных в одну группу: $\varepsilon = n\varepsilon_{\text{л}}$. В измерениях энергии пучка ускорителя использовались группы по 4 ламели и по 2 ламели; разрешающая способность при этом была не хуже $\approx \pm 5\%$.

Система термостабилизации. Предназначена для обеспечения заданного температурного режима компонентов ускоряющей системы (ускоряющие секции, группирователь, резонаторы системы SLED), для которых температура и отклонение температуры от заданного значения являются факторами настройки ускоряющей системы, влияющими на качество пучка электронов на выходе ускорителя, таких его параметров, как средняя энергия частиц пучка и энергетический разброс.

Как известно, ширина полосы пропускания СВЧ-резонатора Δf определяется как $2\Delta f = f_c/Q$, где f_c — собственная частота резонатора, а Q — его добротность. При отличии частоты задающего СВЧ-генератора от f_c на половину полосы пропускания ускоряющее напряжение на оси отдельной ячейки ускоряющей секции может снижаться до $U = 0,7U_{\text{макс}}$. В случае же ускоряющей секции ее следует рассматривать как цепочку ячеек-резонаторов с малой связью. При паспортной добротности секции $Q = 1,32 \times 10^4$ ширина полосы пропускания ускоряющей секции ЛУЭ-200 составляет $2\Delta f_c \sim 0,5\text{--}0,6$ МГц, 50%-му уменьшению энергии, приобретаемой частицей при частоте генератора, на краю полосы пропускания секции соответствует вид колебания $\theta_{50\%} = 121,3^\circ$ при частоте $f_{50\%} = 2856,15$ МГц. Разница частот от рабочей 2855,5 МГц составляет $\Delta f = 0,65$ МГц, но при этом фаза ускоряющего поля в секции тоже изменится на $\Delta\varphi \approx 20^\circ$. При величине коэффициента температурного «ухода» собственной частоты

секции $k_t = 0,05 \text{ МГц}/^\circ\text{С}$ такие изменения могут произойти уже при изменении температуры ускоряющей секции на 5°С .

Еще более критично влияние температуры для резонаторов системы компрессии SLED. При добротности резонаторов $Q = 8,62 \cdot 10^4$ ширина полосы пропускания резонаторов $2\Delta f_p = 0,0331 \text{ МГц}$, $\Delta f_p = 0,01655 \text{ МГц}$. Уход температуры резонаторов на 1°С приведет к сдвигу собственной частоты резонаторов f_p на $0,045696 \text{ МГц}$, т.е. уход собственной частоты резонаторов при изменении их температуры на один градус будет почти в 2,76 раза больше Δf_p , что приведет к существенному снижению мощности, излучаемой из резонатора в нагрузку. Фаза СВЧ-поля в резонаторах при этом также «уйдет» на $\Delta\varphi \approx 50^\circ$. Исходя из этого, требования к стабильности температуры компонентов ускоряющей системы формулируются как $\Delta t \leq \Delta f_p/k_t$ для ускоряющей секции $\Delta t \leq \pm 2,0^\circ\text{С}$ и для резонаторов системы SLED $\Delta t \leq \pm 0,33^\circ\text{С}$.

С учетом сформулированных требований для системы термостабилизации ускоряющих секций используется техническое решение в виде двухконтурной схемы, обеспечивающей отбор излишних тепловыделений, регулирование рабочей температуры секций и резонаторов системы SLED в диапазоне $35\text{--}38^\circ\text{С}$. Управление схемой контроллера компании Eurotherm позволяет адаптировать систему для нескольких режимов работы, регулирование рабочей температуры и ее стабилизацию с точностью не хуже $0,2^\circ\text{С}$ [20]. На рис. 19 представлены результаты измерения температуры воды, охлаждающей ускоряющие секции, в процессе термостабилизации.

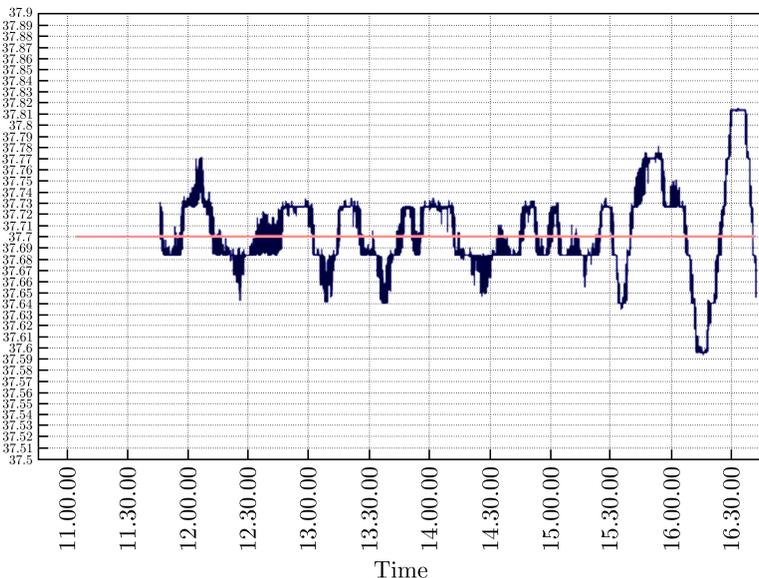


Рис. 19. Результаты измерений температуры воды, охлаждающей ускоряющие секции, в процессе термостабилизации около температуры $37,7^\circ\text{С}$

На рис. 20 представлены результаты синхронных измерений температуры воды, охлаждающей ускоряющие секции, запитанные по воде совместно с резонаторами SLEDов (нижний трек), интенсивности нейтронного потока из мишени источника (верхний трек) и температуры W-конвертера мишени (средний трек). На рисунке заметны корреляции колебаний измеряемых величин, из которых первичными является температура ускоряющих структур, а колебания выхода нейтронов и температура мишенного W-конвертера являются следствием колебаний температуры секций и SLEDов.

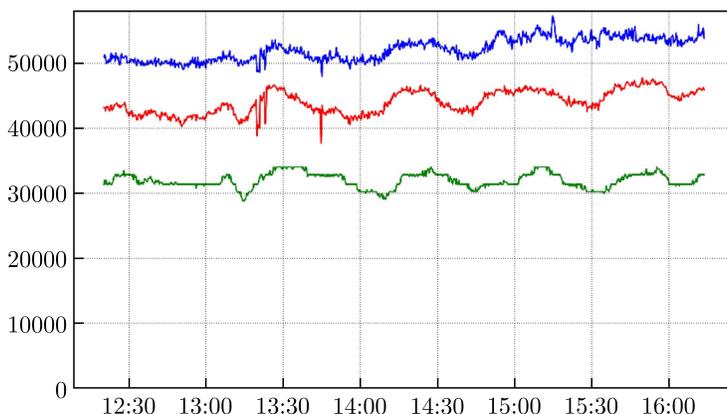


Рис. 20. Результаты синхронных измерений температуры воды, охлаждающей ускоряющие секции, интенсивности нейтронных потоков и температуры конвертера мишени

Для термостабилизации и выбора рабочей температуры резонаторов SLED планируется использовать отдельные термостаты с точностью установки и поддержания температуры не хуже $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

ТЕСТИРОВАНИЕ ГОЛОВНЫХ ОБРАЗЦОВ УСКОРЯЮЩИХ СЕКЦИЙ

Монтаж и наладка ускорителя в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ осуществлены после проведения в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН тестирования головных образцов ускоряющих секций и поставки двух ускоряющих секций в ОИЯИ. Общий и главный итог тестирования состоял в том, что в тестовых экспериментах впервые подтверждена принципиальная возможность получения в ускоряющих секциях, разработанных и изготовленных в ИЯФ СО РАН, пучков электронов с зарядом до 200 нК, ускоренных до энергий 80–90 МэВ [12, 21, 22].

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК 1-Й ОЧЕРЕДИ ЛУЭ-200

В конце 2008 г. монтаж ускорителя ЛУЭ-200 в объеме одной секции, запитанной от одного клистрона ТН2129, был завершен (рис.21), пучок электронов с импульсным током 0,3–0,4 А, длительностью 100–150 нс ускорен до энергии 20 МэВ [23]. В начале 2009 г. был смонтирован электроновод от ускорителя до штатной неразмножающей мишени, затем настройкой ускоряющей системы и последовательной настройкой систем формирования и транспортировки пучка осуществлена проводка пучка на мишень.



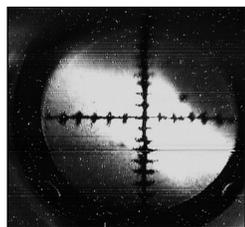
Рис. 21. Общий вид первой очереди ускорителя ЛУЭ-200

В процессе проводки пучка электронов состояние пучка контролировалось бимбьюерами и поясами Роговского (ПР). «Автографы» пучка, полученные с диагностического поста № 5 (перед мишенью) при настройке дублета квадрупольных линз Q4/Q5, представлены на рис. 22.

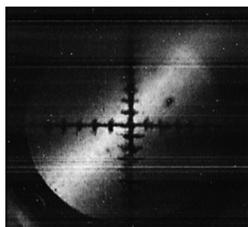
На рис. 23, 24 представлены осциллограммы импульсов тока пучка, полученных с поясов Роговского, установленных вдоль ускорительного тракта.

Прохождение пучка через первую секцию + группирователь составило $\approx 50\%$, прохождение пучка от конца первой ускоряющей секции до ми-

Камера 1
19:19:23 19.02.2009



Камера 1
19:09:22 21.01.2009



Камера 1
19:34:34 21.01.2009

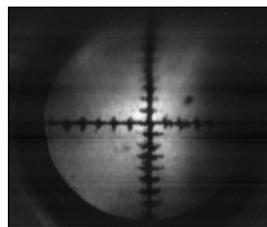


Рис. 22. Изменения «автографа» пучка на бимбьюере № 5 (перед мишенью) при настройке дублета квадруполей Q4/Q5: а) линза Q4 включена, Q5 выключена; б) линза Q4 выключена, Q5 включена; в) включены линзы Q4 и Q5

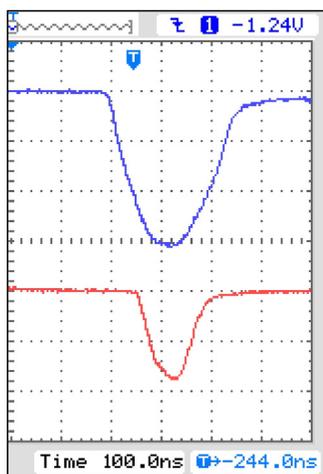


Рис. 23. Осциллограммы с поясов Роговского: после пушки — верхний луч, после первой секции — нижний луч. 1 А/дел., 100 нс/дел.

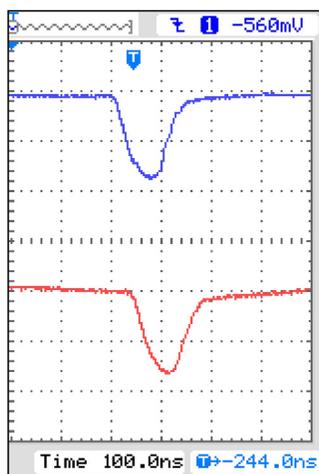


Рис. 24. Осциллограммы с поясов Роговского: после спектрометра — верхний луч, перед мишенью — нижний луч. 1 А/дел., 100 нс/дел.

шени составляло около 95 %, а общее прохождение пучка от пушки до мишени составляет немного более 40 %. В 2009 г. ток пучка ускоренных электронов повышен до 2,4 А с длительностью импульса до 100 нс на полувысоте при частоте циклов 25 Гц, а при подключении системы компрессии СВЧ-мощности энергия пучка повышена до 30–35 МэВ [24].

На рис. 25 представлены энергетические спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона TH2129 Thomson при выходной мощности клистрона 17 МВт при различных токах пучка I_n в секции (1А и 2А) и различных уровнях мощности возбуждения клистрона. При увеличении тока ускоренного пучка ширина спектра увеличивается, а положение максимума спектра смещается в область более

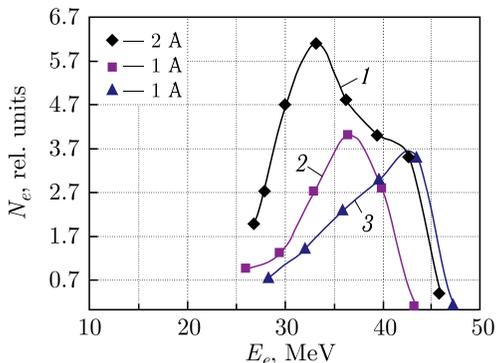


Рис. 25. Спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона TH2129 Thomson, при различных токах пучка I_n и различных уровнях мощности возбуждения. Кривая 1 — $I_n = 2$ А, кривые 2 и 3: $I_n = 1$ А при различных уровнях мощности возбуждения клистрона

низких энергий; максимальное значение энергии ускоренных электронов не превышало значений 45–46 МэВ. Результатом запуска и наладки ускорителя стала регистрация фотонейтронов, генерированных ускоренным пучком в неразмножающей W-мишени, установленной в мишенном зале.

После запуска и наладки ускорителя в экспериментальном зале установки ИРЕН на пролетной базе длиной 10 м проведены измерения времяпролетных и энергетических спектров нейтронов, генерированных электронным пучком (рис. 26), сделаны оценки выхода нейтронов, которые

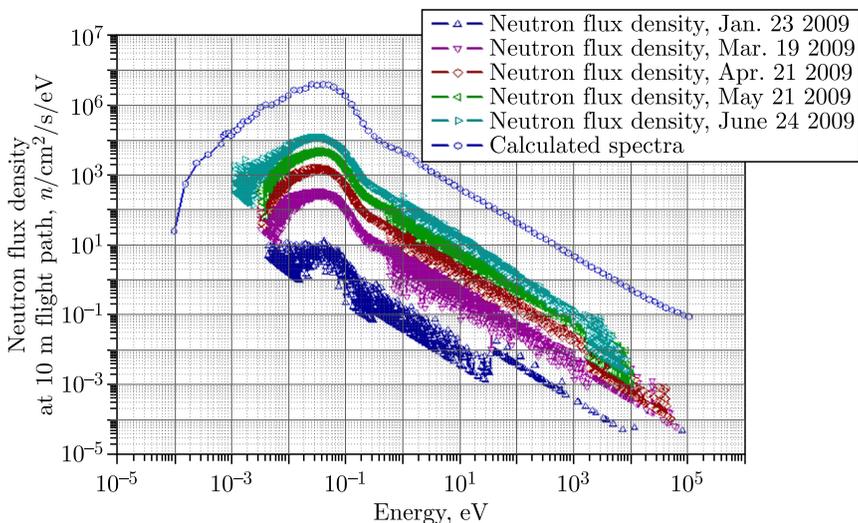


Рис. 26. Спектры энергий нейтронных пучков, полученных в процессе отладки первой очереди ускорителя в первой половине 2009 г.

хорошо совпали с расчетными значениями. В декабре 2009 г. осуществлен режим ускорения пучка электронов на частоте циклов 50 Гц с током пучка 1,5 А, длительностью импульса 100 нс. Интегральный поток нейтронов от мишени (в 4π -пространство) в оптимальных настройках достигал $(2,6-3,0) \cdot 10^{11} \text{с}^{-1}$ [24, 25].

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК 2-Й ОЧЕРЕДИ ЛУЭ-200

Первая очередь ускорителя отработала на эксперимент несколько тысяч часов, после чего в соответствии с планами развития ускорителя до второй очереди произведено включение в ускоряющую систему ускорителя второй ускоряющей секции со вторым клистроном с собственным модулятором. Возможность реализации этих планов появилась после приобретения ОИЯИ нового мощного клистрона E3730A Toshiba. При установке на ускоритель второй ускоряющей секции изменена схема питания секций клистрономы. Первая (верхняя) секция запитана от клистрона E3730A (позже вместо клистрона E3730A Toshiba установлен клистрон E37340 Saipon). Для питания второй (нижней) секции установлен клистрон TH2129 Thomson (рис. 27). После предварительной СВЧ-тренировки вто-



Рис. 27. Вторая очередь ЛУЭ-200. Вид нижней части ускорителя

рой секции с СВЧ-трактом достигнуты следующие уровни СВЧ-мощности: 30 МВт на клистроне КЛ1 (E37340 Canon) и 17 МВт на клистроне КЛ2 (ТН2129 Thomson), произведена проводка пучка с током 1,0–1,2 А по тракту до магнитного спектрометра, а затем до мишени. Как и при работе первой очереди, длительность тока пучка составляла около 100 нс. Топопрохождение пучка по тракту ускорителя сохранилось на прежнем уровне; основные потери пучка ($\approx 50\%$) приходятся на участок группирователь + первая ускоряющая секция. На рис. 28 представлены спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200 при различных токах пучка электронной пушки I_n [26].

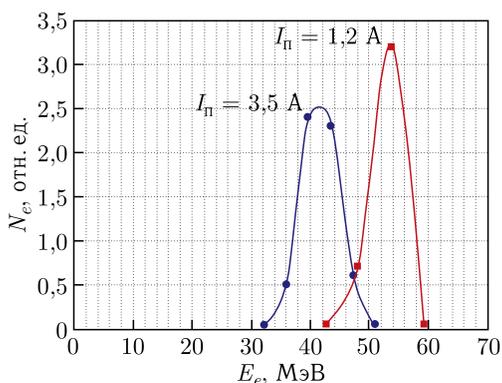


Рис. 28. Энергетические спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200, при различных токах пучка электронной пушки I_n : 3,5 и 1,2 А

Сравнение спектров нейтронных пучков источника ИРЕН, полученных при работе первой очереди ускорителя ЛУЭ-200 (2009 г.) и при работе второй очереди ЛУЭ-200 (декабрь 2016 г.), представлено на рис. 29. Оценки интегрального выхода нейтронов из W-мишени, произведенные по измерению плотности потока нейтронов штатными детекторами установки ИРЕН, показали увеличение интегрального выхода нейтронов по сравнению с выходом нейтронов в первой очереди в 2–3 раза.

На рис. 30 представлены энергетические спектры пучков электронов, ускоренных в двух секциях, измеренные после длительной «тренировки» ускоряющей и СВЧ-систем [27]. Рис. 30, а, б иллюстрируют как увеличение средней энергии пучка (до 60–64 МэВ) по сравнению со спектрами, представленными на рис. 28, так и смещение верхней границы энергетического спектра.

Измерениями, выполненными на предельно малых значениях тока пучка, при уровне СВЧ-мощности, отбираемой от клистронов, 35 МВт (Кл1) и 20 МВт (Кл2) установлено, что в ускоренном пучке регистрируются фрагменты, имеющие энергию более 100 МэВ (рис. 30, б). Сравнение проектных и измеренных параметров показывает, что измеренная энергия

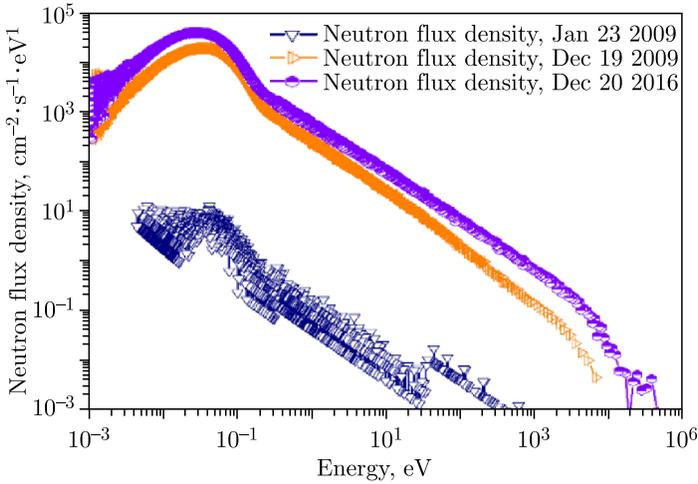


Рис. 29. Спектры нейтронных пучков источника ИРЕН при работе 1-й очереди ЛУЭ-200 и при работе 2-й очереди ЛУЭ-200 (декабрь 2016 г.)

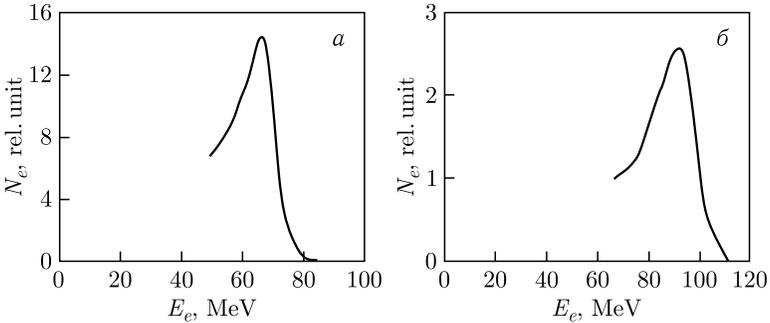


Рис. 30. Энергетические спектры пучков, ускоренных в двух секциях, измеренные после длительной «тренировки» ускоряющей и СВЧ-систем

пучка и в 1-й и 2-й очереди ускорителя оказывается почти на 25 % ниже ожидаемой.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛУЭ-200

В связи с тем, что основное назначение ускорителя ЛУЭ-200 — продуцирование фотонейтронов, следует рассматривать его эффективность с точки зрения способности обеспечения заданных потоков нейтронов требуемой интенсивности. Для электронных драйверов источников ADS типа выход нейтронов из фотомишени обычно оценивается как

$$N_n \approx Y_n \cdot P_b, \tag{1}$$

где Y_n — выход фотонейтронов на единицу мощности пучка для конкретного материала мишени, средняя мощность пучка электронов

$$P_b = E_b \cdot I_b \cdot \tau_n \cdot f, \quad (2)$$

E_b — энергия частиц пучка, I_b — ток пучка, τ_n — длительность импульса тока пучка, а f — частота циклов ускорения.

На рис. 31 представлены расчетные зависимости выхода фотонейтронов от энергии электронов (на единицу мощности пучка) для толстых мишеней из различных материалов из работ [28, 29]. Из рисунка видно,

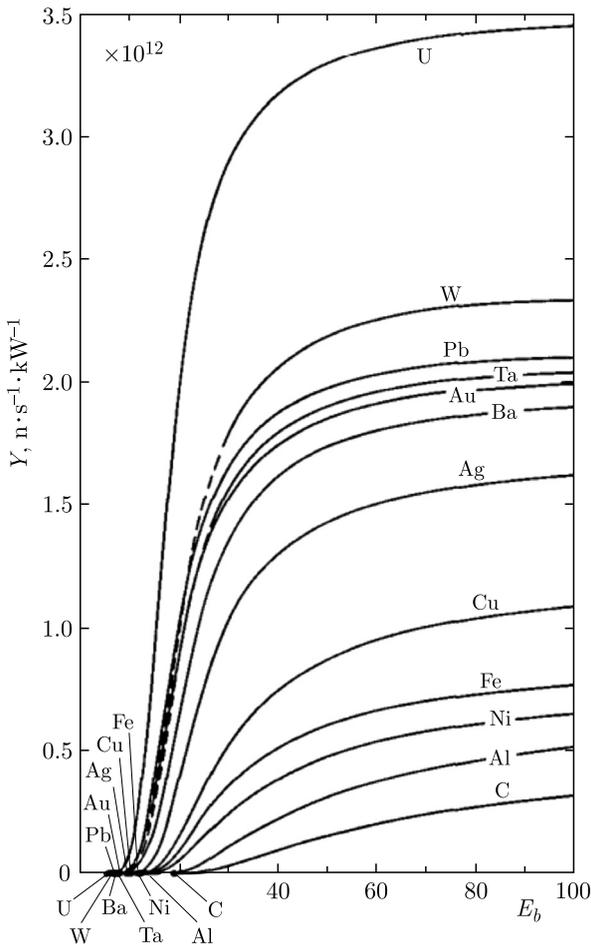


Рис. 31. Расчетные зависимости выхода фотонейтронов Y_n от энергии электронов E_b (на единицу мощности пучка) Y_n для толстых мишеней из различных материалов [28, 29]

что выход нейтронов из фотомишени до энергий электронов 20–40 МэВ растет весьма быстро, а после 60 МэВ замедляется, но все равно, в силу зависимости (2) остается практически линейным, что побуждает к поиску средств увеличения энергии пучка электронов драйвера или снятия ограничений на это увеличение. Из зависимостей (1) и (2) и рис. 7 следует, что повышения выхода нейтронов из фотомишени можно достичь, увеличивая вклад каждого из значимых членов выражений (1) и (2), а также заменой материала мишени на более тяжелый (например, W на U).

Наряду с работой на нейтронные пучки в период 2018–2024 гг. на ускорителе проведены как экспериментальные исследования факторов, влияющих на снижение энергии ускоренного пучка, так и аналитические и численные исследования механизмов их влияния на мощность пучка и определены некоторые ограничения этого влияния.

В численных экспериментах [30, 31] проведено исследование динамики пучка электронов в процессе группировки и захвата пучка в ускоряющее поле первой регулярной секции, выявлены особенности работы группирователя в ускоряющей системе ЛУЭ-200. Численное моделирование показало, что группирователь может оказывать существенное влияние на динамику пучка в ускорителе в целом, но используемый в ускорителе группирователь, изготовленный из нержавеющей стали 12X18H10T, не обеспечивает эффективного сжатия пучка по фазам и увеличения средней энергии сгустка до значения 4,0 МэВ, оптимального для перезахвата в режим ускорения регулярной секцией. Особенности использованного группирователя приводят к тому, что ширина энергетического спектра пучка на выходе остается не лучше, чем $\pm 20\%$ по основанию. Коэффициент токопрохождения в системе группирователь + 1-я ускоряющая секция составляет $\leq 70\%$. При ненулевом токе пучка фазовый размер пучка на выходе из группирователя близок к π , что не позволяет обеспечить эффективный перезахват пучка регулярной секцией. В результате общие потери пучка в группирователе вместе с первой секцией достигают 50%.

Среди факторов, ограничивающих энергетические и мощностные характеристики пучка ЛУЭ-200, рассмотрены подгрузка поля ускоряющей структуры пучком и ограничения, вызванные недостаточной электрической прочностью структуры [32–35]. В работе [32] проведены аналитические оценки набора энергии пучка E (МэВ) от длительности импульса тока при моделировании нагрузки ускоряющей структуры пучком с проектными параметрами (1,5 А, 250 нс). Результаты оценок представлены на рис. 32 для одной секции (кривые 1, 2) и для двух секций (кривые 3, 4). Незначительные различия между собой кривых 1 и 2 и кривых 3 и 4 объясняются использованием либо точных, либо упрощенных формул.

Общее заключение, полученное в расчетах, состоит в том, что потери энергии (точнее, «недобор» энергии) пучка в зависимости от длительности тока могут достигать 25% и более.

В работах [33–35] аналитическими расчетами показано, что значения «критических токов» электронного пучка для ускоряющих секций ЛУЭ-200 при использовании систем компрессии СВЧ-мощности находятся в диапа-

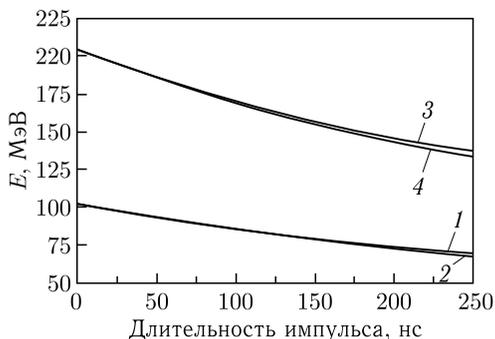


Рис. 32. Результаты расчета подгрузки структуры пучком с током 2 А в зависимости от длительности импульса тока

зоне 3,0–3,5 А. Таким образом, ускоренный пучок подгружает ускоряющие поля секций, но эта нагрузка не имеет подавляющего характера.

Результаты расчета нагрузки током пучка с длительностью 100 нс для ускоряющей структуры, запитанной от генераторов разной мощности (от клистронов трех типов), при трех значениях тока ускоренного пучка представлены на рис.33 [35]. Из этих расчетов следует, что пучок длительностью 100 нс подгружает ускоряющее поле таким образом, что даже при относительно высокой средней энергии частицы пучка обладают значительным разбросом по энергии. Следует отметить, что расчетные результаты качественно согласуются с результатами, полученными в измерениях энергетических спектров пучка ускорителя ЛУЭ-200 после первой ускоряющей секции при работе с клистроном TH2129 Thomson, работающим с импульсной мощностью 17 МВт с системой SLED [33].

Как отмечено в результатах измерений энергии, клистроны, использованные как в первой, так и во второй очереди ускорителя, работали с выходной мощностью ниже максимальной паспортной. Наиболее высокие показатели по энергии пучка были достигнуты при $P_{к.л1} = 35$ МВт,

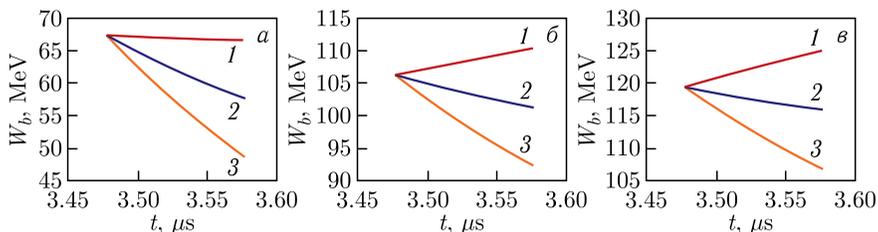


Рис. 33. Полная энергия пучка, получаемая пучком с длительностью 100 нс в ускоряющей структуре при разной мощности генератора (мощности клистрона) и разных токах пучка I_b : а) 20 МВт (TH2129 + SLED), б) 50 МВт (E3730A + SLED), в) 63 МВт (5045 SLAC + SLED; кривые: 1 – при токе $I_b = 1$ А, 2 – при токе $I_b = 2$ А, 3 – при токе $I_b = 3$ А

и $P_{кп2} = 20$ МВт. Это вынужденное ограничение объясняется недостаточной электрической прочностью ускоряющих структур по отношению к СВЧ-пробоям. Результаты аналитических и численных расчетов ускоряющих полей, формируемых в ускоряющих структурах ЛУЭ-200, выполненные для различных значений коэффициента усиления по мощности системы SLED и трех различных уровней первичной СВЧ-мощности, генерируемой клистрономы, представленные на рис. 34, показывают [35], что уровни напряженностей электрического поля на оси начальных участков ускоряющей структуры могут достигать 40 МВ/м и выше (для проектных параметров это 70 МВ/м и выше). При этом напряженности полей на поверхности структуры, оцененные с учетом паспортного коэффициента перенапряжения (отношение напряженности электрического поля на поверхности структуры к напряженности поля на ее оси = 1,7; табл. 2) могут приближаться к пределам электрической прочности структур, оцененным

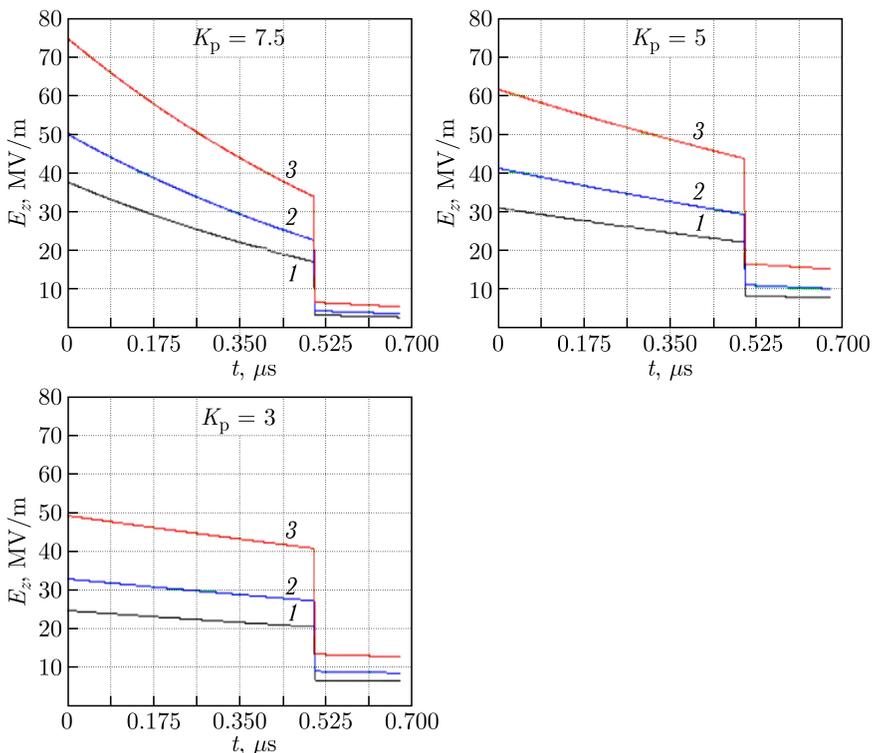


Рис. 34. Напряженности электрических полей на оси в начале ускоряющей структуры в зависимости от времени при $I_0 = 0$ для клистронов различной мощности. Слева направо: для коэффициента усиления по мощности системы SLED $K_p = 7,5$; $K_p = 5$, $K_p = 3$. Кривые 1 – мощность клистрона 17 МВт, кривые 2 – 30 МВт, кривые 3 – 67 МВт

по критерию Килпатрика для частоты 2856 МГц [36], и даже существенно превышать их, что может приводить к пробоям.

Несмотря на проведение нескольких длительных сеансов тренировки, достичь нужной электрической прочности ускоряющих структур не удалось. Следует признать, что установленные на ускорителе ЛУЭ-200 ускоряющие секции не обладают электрической прочностью, достаточной для получения среднего ускоряющего градиента, обеспечивающего достижение проектных параметров пучка ускорителя по энергии.

Влияние смещения рабочей частоты на эффективность ускоряющей структуры ЛУЭ-200. В работе [37] проведены аналитические оценки влияния ошибок изготовления ячеек ускоряющих структур ЛУЭ-200 или работы линейного ускорителя на частоте, отличной от собственной частоты ускоряющих структур, на величину набора энергии. Влияние рассогласования (отклонения) частот СВЧ-мощности, поступающей в структуру f , от собственной (резонансной) частоты структуры f_c , на величину набора энергии оценивалось в рамках следующих допущений: омические потери в стенках структуры отсутствуют (амплитуда ускоряющего поля вдоль структуры принимается постоянной), нагрузка ускоряющего поля током пучка незначительна.

На рис. 35 показана зависимость набираемой частицей энергии W относительно максимальной энергии, которую может набрать частица $W_{\max} = eE_0L$ при начальной фазе $\varphi_0 = 0^\circ$ (рис. 35, а) и при начальной фазе $\varphi_0 = 20^\circ$ (рис. 35, б). Здесь e — заряд электрона, L — длина секции, E_0 — амплитуда ускоряющего поля на оси структуры. Из рисунка видно, что расстройка $\Delta f/f_c = \pm 0,28 \cdot 10^{-3}$ (для рабочей частоты 2856 МГц соответствует $\pm 0,8$ МГц) приводит к недобору энергии на 70 % при фазе частицы $\varphi_0 = 0^\circ$ и на 97 % при фазе частицы $\varphi_0 = 20^\circ$.

При добротности резонаторов SLED $Q_p = 8,0 \cdot 10^4$ ширина полосы пропускания резонаторов $\Delta f_p \approx 0,04$ МГц, что значительно уже полосы пропускания ускоряющей секции, но с учетом возможностей подстройки собственной частоты резонаторов путем деформирования торцевой стенки

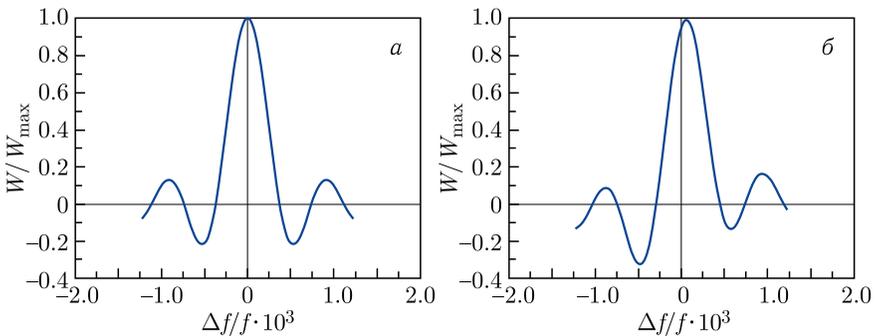


Рис. 35. Снижение энергии по отношению к максимальному значению при изменении частоты рабочего генератора и начальной фазе $\varphi_0 = 0^\circ$ (а) и $\varphi_0 = 20^\circ$ (б)

(4 МГц/мм) или изменением температуры целесообразнее выбрать оптимальной частоты задающего генератора производить посредством первоначального согласования с частотой ускоряющей секции с последующей подстройкой собственных частот резонаторов SLED под выбранную частоту генератора.

Роль тайминга инъекции пучка электронов в ускоряющую структуру ЛУЭ-200. Как известно, системы компрессии СВЧ-мощности типа SLED широко используются в ускорителях электронов на бегущей волне. Однако в подавляющем большинстве случаев их используют для питания СВЧ-мощностью структур, ускоряющих «короткие» пучки или даже отдельные сгустки, длительность которых сравнима с периодом колебаний ускоряющей СВЧ-волны, т.е. значительно меньше постоянной времени спада ступеньки огибающей СВЧ-мощности, распространяющейся в структуре после «включения» компрессии (переворота фазы СВЧ-мощности, вводимой в SLED). В этом случае инъекция частиц пучка в структуру производится в условиях мало изменяющейся величины ускоряющего поля, и удается сформировать узкий энергетический спектр ускоренного пучка. При увеличении длительности импульса тока сгустков (длительности импульса тока пучка) инъекция частиц пучка в структуру происходит в течение промежутка времени, в котором величина СВЧ-мощности, вводимой в ускоряющую структуру (а также величина ускоряющего поля), может существенно измениться.

На рис. 36 представлены осциллограммы огибающих СВЧ-мощности, измеренные ответвителями, установленными на выходе ускоряющих секций ЛУЭ-200 перед оконечной СВЧ-нагрузкой. Инъекция пучка производится после момента инверсии СВЧ-фазы (t_{180} на рис. 36). Из рисунка видно, что после включения инверсии происходит пикообразный подъем уровня вводимой в секции СВЧ-мощности в ≈ 3 раза, но длительность этого пика сравнима с длительностью импульса тока пучка (100 нс). В этом случае частицы, находящиеся в «голове» пучка и в его «хвосте»,

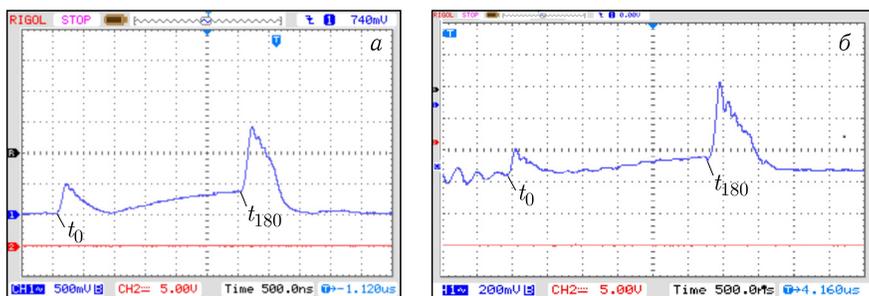


Рис. 36. Осциллограммы огибающих СВЧ-мощности на выходе ускоряющих секций при работе без пучка: *а*) у первой секции, *б*) у второй секции. t_0 — начало подачи СВЧ-мощности в ускоряющую секцию, t_{180} — включение переворота (инверсии) фазы СВЧ-возбуждения клистронов

приобретают разную энергию, спектр энергий частиц пучка становится значительно шире, а конкретные энергетические характеристики пучка зависят от положения момента инжекции пучка относительно момента инверсии фазы СВЧ-мощности на входе в систему компрессии SLED.

Таймингом инжекции пучка электронов в ускоряющую структуру названа процедура последовательного изменения времени инжекции ускоряемого пучка в ускоряющую структуру относительно момента инверсии фазы при вводе СВЧ-мощности в систему SLED. При тайминге инжекции пучка на этапе стендового тестирования ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5 ИЯФ им. Будкера СОРАН — головного образца ускоряющих секций, поставленных ИЯФ в ОИЯИ для ЛУЭ-200, продемонстрировано существование оптимума по времени инжекции относительно времени переворота фазы в системе SLED, соответствующего максимальному энергосодержанию ускоренного пучка.

В работе [35] аналитически показано, что в силу того, что длительность импульса тока пучка (≈ 100 нс) соизмерима с длительностью фронта нарастания СВЧ-мощности в секции после переворота СВЧ-фазы на входе в SLED (≈ 40 нс), существует некоторый диапазон времени инжекции пучка относительно момента переворота фазы, в котором ускорение пучка происходит в полях, соответствующих максимальным уровням СВЧ-мощности, передаваемой в ускоряющую секцию системой SLED. На рис. 37 представлен расчетный набор энергии частицы при пролете одной ускоряющей секции, запитанной от генераторов — клистронов с разной мощностью (17, 30 и 67 МВт) при использовании системы SLED с коэффициентом усиления мощности 3. Из рисунка видно, что максимальный набор энергии в любом случае происходит при инжекции через $\approx 0,47$ мкс после переворота фазы. Для конфигурации клистронов, реализованной на ускорителе (мощность от первого клистрона ≈ 30 МВт, от второго клистрона

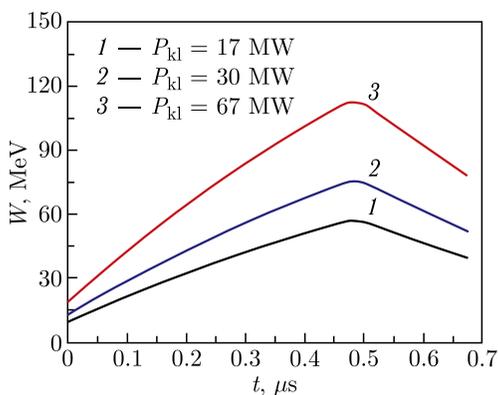


Рис. 37. Расчетный набор энергии частицы при пролете одной ускоряющей секции, запитанной от генераторов СВЧ-мощности — клистронов с разной мощностью при использовании системы SLED с коэффициентом усиления мощности 3 [35]

≈ 17 МВт), максимальная суммарная энергия, приобретаемая частицей в двух секциях, может составлять $\approx (77 + 58)$ МэВ = 130 МэВ.

Расчеты, выполненные с учетом подгрузки ускоряющего поля пучком [35], показывают, что для пучка с током 1,0–1,5 А и при коэффициенте усиления мощности 3 можно получить максимальную энергию частиц ~ 130 –135 МэВ, и ~ 90 –96 МэВ в максимуме спектра.

Измерениями, выполненными на ЛУЭ-200 [37], показано, что изменение времени инжекции пучка на $\pm 0,150$ мкс существенно изменяет положение максимума спектра энергий пучка (± 10 МэВ) и его ширину (с 8 до 17 МэВ), при больших отклонениях от «оптимального времени инжекции» форма импульса тока, проходящего ускоряющего структуры, так же, как и при тайминге в работе [38], значительно искажается, а наполнение пучка становится меньше по интегралу частиц.

На рис. 38 представлен спектр энергий пучка в «оптимальной настройке» ЛУЭ-200 при проведении тайминга инжекции пучка с током 1,25 А.

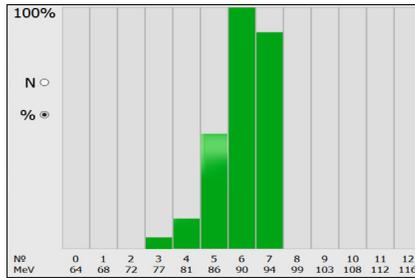


Рис. 38. Спектр энергий пучка в «оптимальной настройке» при проведении тайминга инжекции пучка с током 1,25 А

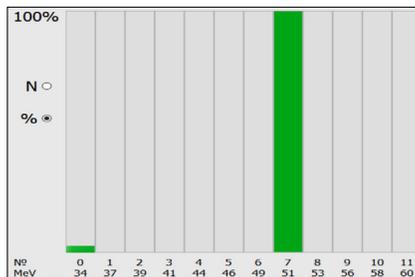


Рис. 39. Спектр пучка, ускоренного в двух секциях в режиме «до включения компрессии СВЧ-мощности SLED». $I_b = 0,37$ А

На рис. 39 представлен спектр энергий частиц пучка, ускоренного в двух секциях при времени инжекции 300 нс, фактически без компрессии СВЧ-мощности. Несмотря на то, что прохождение пучка через ускоритель снизилось (всего 0,37 А), такая настройка ускорителя может представлять

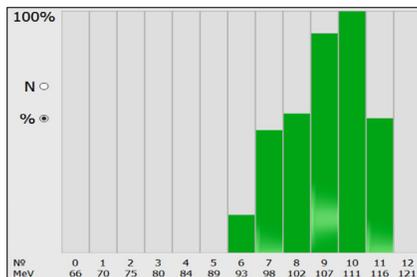


Рис. 40. Спектр пучка, ускоренного в двух секциях в режиме «включения компрессии СВЧ-мощности». $I_b = 1,3 \text{ A}$

интерес для пользователей в качестве источника электронов с узким энергетическим спектром.

На рис. 40 представлен спектр энергий пучка, полученного в результате комплексной настройки ускорителя, включающей подбор частоты задающего генератора СВЧ-возбуждения клистронов, согласование с ней собственной частоты резонаторов систем SLED и выбор времени инъекции [39] с целью получения максимальной энергии при сохранении адекватного уровня прохождения пучка (1,3 А на мишени).

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ПУЧКА

В качестве альтернативных способов повышения средней мощности пучка можно рассматривать увеличение длительности импульса тока пушки и повышение частоты циклов ускорения пучка. На рис. 41 представлены варианты увеличения длительности импульса тока пучка на мишени от 100 до 150 нс. Дальнейшее увеличение длительности импульса тока однозначно приведет к увеличению длительности импульса потоков нейтронов,

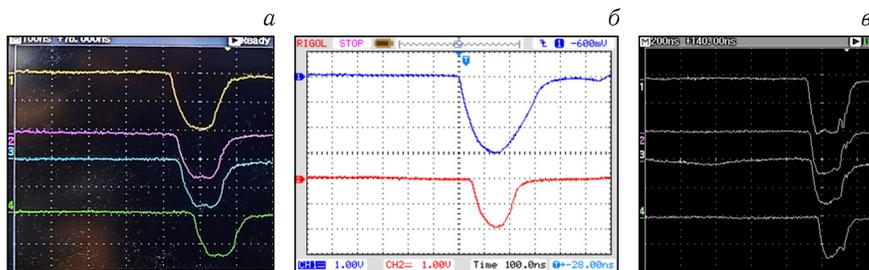


Рис. 41. Осциллограммы тока пучка с поясов Роговского: а) сверху вниз ПР2, ПР3, ПР4, ПР5, развертка осциллографа — 100 нс/дел.; б) ПР1 (луч 1 — ток пушки), ПР2 (луч 2 — ток пучка на мишени), развертка осциллографа — 100 нс/дел.; в) сверху вниз — ПР2, ПР3, ПР4, ПР5. Чувствительность — 1 А/дел., развертка осциллографа — 200 нс/дел.

что повлечет ухудшение разрешающей способности времяпролетных экспериментальных установок пользователей установки ИРЕН.

За счет повышения цикличности ускорителя можно увеличить мощность пучка электронов источника ИРЕН в 2–3 раза, однако такое повышение требует тщательной оценки ресурсов оборудования ускорителя, способности мишенного комплекса по отводу тепла (или даже его реконструкции), а также оценки защитных свойств биологической защиты ускорительных и мишенного залов установки ИРЕН.

В табл. 6 представлены текущие характеристики и параметры ускоренного пучка ускорителя ЛУЭ-200.

Таблица 6. Текущие параметры ускорителя ЛУЭ-200

Параметр	2 секции	
	1-я секция (1 клистрон)	2-я секция (1 клистрон)
Тип клистрона, мощность клистрона максимальная, МВт	E37340 Canon 50	ТН2129 Thomson 20
Реализованная мощность клистрона, МВт	30	17
Средняя/максимальная энергия электронов в спектре, МэВ	100/120	
Средний ток пучка в импульсе, А	1,8–1,9	
Длительность импульса тока, нс	120	
Частота циклов, Гц	50	
Средняя мощность пучка, кВт	0,97–1,0	

При текущих параметрах ускорителя ЛУЭ-200 величина интегрального потока нейтронов (в 4π -пространство), оцененная по измерению плотности потока нейтронов штатными детекторами установки ИРЕН, достигает $\approx 1,2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физический пуск ускорителя ЛУЭ-200 в полном составе осуществлен в 2017 г. В течение начальных этапов эксплуатации ускорителя ЛУЭ-200 частота задающего генератора для возбуждения клистронов — источников СВЧ-мощности ускоряющих секций устанавливалась на уровне 2855,7–2856,5 МГц и, скорее всего, отличалась от «оптимальной», что снижало эффективность передачи в пучок СВЧ-мощности и приводило к «недобору» энергии частицами ускоренного пучка. После системных поисков оптимальной частоты генератора, тщательной подстройки собственных частот резонаторов SLEDов и использования процедуры тайминга инжекции пучка удалось существенно увеличить энергию пучка на выходе ускорителя. Смещение спектра ускоренных частиц в сторону более

высоких энергий достигало ≈ 45 МэВ, максимальные значения энергии сместились в область ≈ 110 МэВ. Увеличение мощности пучка $\approx 40\%$, а выход нейтронов, измеренный штатными детекторами установки ИРЕН, оценивается величиной $\approx 1,2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Ускоритель ЛУЭ-200 был и остается интересным объектом исследования в силу своей уникальности. В Российской Федерации и странах-участницах ОИЯИ нет другого ускорителя на бегущей волне 2856 МГц с использованием системы SLED с током пучка 1–2 А при длительности импульса, соизмеримой с постоянной времени спада огибающей СВЧ-мощности после включения переворота фазы в системе SLED. Оборудование ускорителя допускает увеличение мощности пучка электронов и тем самым увеличение производительности установки ИРЕН, повышая ее привлекательность для пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк И. М. Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора ИБР // ЭЧАЯ. 1971. Т. 2, вып. 4. С. 805–860; http://www.info.jinr.ru/publish/Archive/PePan/1971-v2/v-2-4/pdf_obzory_v2p4/v2p4_01.pdf
2. Aksenov V. L., Dikansky N. S., Lomidse V. L. et al. Proposal for the Construction of the New Intense Resonance Neutron Source (IREN). JINR Preprint E3-92-110. Dubna, 1992.
3. Novokhatski A. V., Aleksandrov A. V., Avilov M. S. et al. Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. 27–29 April 1993, Dubna. JINR, D1,9,13-93-459. Dubna, 1994. P. 197–211.
4. Косарев А. Н., Куклин Д. Е., Новохатский А. В., Подлевских В. В., Шиянков С. В. Ускоряющая структура форинжектора инжекционного комплекса ВЭПП-5 // Proc. of the XV International Workshop on Charged Particle Linear Accelerators, Kharkov, September 16–21, 1997. Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. 1997. Iss. 2,3 (29, 30). P. 122–124.
5. Шиянков С. В. Основные системы и элементы форинжектора ВЭПП-5. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 01.04.20. ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Новосибирск, 2005. 15 с. На правах рукописи.
6. Farkas Z. D., Hogg H. A., Loew G. A., Wilson P. B. SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy // Proc. of the 9th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, SLAC, Stanford, CA, May, 1974. P. 576–586. SLAC-PUB-1453.
7. Павлов В. М. Система умножения мощности SLED. Препринт ИЯФ 97-94. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1997.
8. Павлов В. М. СВЧ — группирователь форинжектора ВЭПП-5. Препринт ИЯФ 2002-10. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2002.
9. Павлов В. М., Сумбаев А. П. Сравнительный анализ возможностей построения СВЧ-станция на базе мощных импульсных клистронов 10-см диапазона для ускоряющей системы ускорителя ЛУЭ-200. Отчет о НИР. ИЯФ СО РАН–ЛФВЭ ОИЯИ. Дубна, 2008.
10. 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(189). P. 1040–1044; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_2014_5/21_kim.pdf
11. Лампа ГС-34 (генераторный триод): [сайт] // URL: <https://rudatasheet.ru/tubes/gc-34/>.
 12. *Akimov V.E. et al.* Test of Accelerating Structure for VEPP-5 Preinjector. LINAC2000 Conference. Monterey, California. August 21–25, 2000. TUA21; https://www.researchgate.net/publication/279190373_Test_of_Accelerating_Structure_for_VEPP-5_Preinjector.
 13. *Dolya S.N., Furman W.I., Kobets V.V., Laziev E.M., Metelkin Yu.A., Shvets V.A., Soumbaev A.P.* Linac LUE200. First Testing Results. XX International Linac Conference LINAC2000. Monterey, California, U.S.A. August 21–25, 2000. TUE11; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/100/papers/TUE11.pdf>.
 14. *Александров В.С., Казаринов Н.Ю., Сумбаев А.П., Шевцов В.Ф.* Расчет динамики пучка электронов ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 3(120). С. 70–77; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_3_2004/12_alex.pdf.
 15. *Александров В.С., Казаринов Н.Ю., Мешков И.Н., Сумбаев А.П., Тузинов А.В., Шевцов В.Ф.* Влияние ошибок соленоидального магнитного поля первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 на динамику пучка электронов. Сообщение ОИЯИ Р9-2016-47. Дубна, 2016.
 16. *Сумбаев А.П., Кукарников С.И.* Фокусирующий соленоид первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200. Сообщение ОИЯИ Р9-2016-48. Дубна, 2016.
 17. *Калмыков А.В., Кукарников С.И., Лачинов В.М., Макоеев В.К., Сподарец В.К., Сумбаев А.П.* Стенд для моделирования и испытания магнитных элементов системы фокусировки и транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-49. Дубна, 2011.
 18. *Бурков И.В., Сумбаев А.П.* Разработка методики экспресс-оценки температурных полей на мембране выпускного окна ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4. С. 595–603.
 19. *Sumbaev A.P., Tarantin N.I., Shokin V.I.* The Magnetic Energy Analyzer for Electron Beam of LUE-200 Linac of IREN Facility // Proc. of RuPAC2016, November 21–25, 2016, St. Petersburg, Russia, THPSC051; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc051.pdf>.
 20. *Замрий В.Н., Сумбаев А.П.* Прецизионная термостабилизация секции ускорителя ЛУЭ-200. Сообщение ОИЯИ Р9-2013-10. Дубна: ОИЯИ, 2013.
 21. *Кобец В.В., Мешков И.Н., Сумбаев А.П., Фурман В.И., Швец В.А., Логачев П.В., Павлов В.М., Фролов А.Р., Гуров С.М.* Проект ИРЕН: Статус и первые результаты // Труды IV Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 26–28 сент. 2001 г. Дубна, 2002. С. 150–160.
 22. *Sumbaev A.P., Furman W.I., Kobets V.V., Meshkov I.N. et al.* LUE200 Linac. Full-Scale Testing of Accelerating Sections // Proc. of the XXI International LINAC Conference LINAC2002. August 19–23, 2002, Gyeongju, Korea. TU405. P. 311–313; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/102/PAPERS/TU405.PDF>; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_3_2005/01_anan.pdf
 23. *Sumbaev A., Shvetsov V.* Physical Startup of the First Stage of the IREN Facility. JINR News. 1/2009. Dubna, 2009. P. 9–13; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/News/News_1_2009.pdf.

24. *Belikov O. V., Belozero A. V., Becher Yu. et al.* Physical Startup of the First Stage of IREN Facility // Proc. of the XVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-17), Dubna, May 27–29, 2009. JINR E3-2010-36. Dubna, 2010. P. 10–16.
25. *Белозеров А.В., Бечер Ю., Булычева Ю.К., Замрий В.Н., Каюков А.С., Кобец В.В., Мешков И.Н., Минашкин В.Ф., Петров В.А., Пятаев В.Г., Седышев П.В., Скрыпник А.В., Сумбаев А.П., Уфимцев А.В., Шабратов В.Г., Швец В.А., Швецов В.Н., Фатеев А.А.* Физический пуск установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 923–932; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_7_2010/33-bel.pdf.
26. *Голубков Е.А., Кобец В.В., Минашкин В.Ф., Михайлов К.И., Репкин А.Н., Сумбаев А.П., Удовиченко К.В., Швецов В.Н.* Первые результаты наладки второй ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщение ОИЯИ Р9-2017-77. Дубна, 2017; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_2018_5/13_Grozdanov.pdf
27. *Sumbaev A., Kobets V., Shvetsov V., Dikansky N., Logatchov P.* LUE-200 Accelerator — A Photo-Neutron Generator for the Pulsed Neutron Source IREN // J. Instrum. 2020. JINST.15.T11006; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/11/T11006/pdf>
28. *Swanson W. P.* // IAEA Technical Report Ser. No. 188. Vienna, 1979, P. 87.
29. *Berman B. L., Fultz S. C.* Giant-Resonance Measurements with Monoenergetic Photons, Lawrence Livermore Laboratory, Rep. UCRL-75383 (1974); Rev. Mod. Phys. 1975. V. 47. P. 713.
30. *Бондаренко Т.В., Полозов С.М., Сумбаев А.П.* Расчет влияния нагрузки током ускоряющей структуры в ускорителе ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1432–1437.
31. *Bondarenko T. V., Butenko A. V., Polozov S. M., Kobets V. V., Sumbaev A. P.* Beam Dynamics Optimization and Future Plans for LUE-200 Linac Upgrade // Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), May 8–13, 2016, Busan, Korea. TUPOW021.
32. *Александров В.С., Казаринов Н.Ю., Сазонов М.Н., Сумбаев А.П., Шевцов В.Ф.* Моделирование нагрузки током пучка ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 3(126). С. 72–75; http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_3_2005/12_alek.pdf
33. *Sumbaev A. P., Varnyakov A. M., Levichev A. E.* On the Limits for the Accelerated Beam Current in the LUE-200 Linac of the IREN Facility. JINR Preprint E9-2019-4. Dubna, 2019.
34. *Сумбаев А.П., Барняков А.М., Левичев А.Е.* Анализ нагрузки током пучка ускоряющего поля ускорителя ЛУЭ-200 // Известия вузов. Физика. 2020. № 3. С. 152–156.
35. *Арсентьева М.В., Левичев А.Е., Барняков А.М., Бердников К.Н., Сумбаев А.П.* Моделирование динамики пучка ускорителя ЛУЭ-200. Ч. I: Аналитические расчеты. Сообщение ИЯФ СО РАН 2020-06. Новосибирск, 2020.
36. *Kilpatrick W. D.* Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC // Rev. Sci. Instrum. 1957. V. 28, No. 10. P. 824–826; *Boyd T. J., Jr.* Kilpatrick's Criterion. Los Alamos Group AT-1 Report AT-1:82-28, February 12, 1982.

37. *Levichev A. E., Arsenyeva M. V., Samoilov S. L., Zhironkin I. S., Mikhailov K. I., Sumbaev A. P., Kobets V. V.* On the Influence of the Operating Frequency Shift on the Efficiency of the Accelerating Structure of the LUE-200 Accelerator // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 3. P. 425–429.
38. *Valente P., Belli M., Buonomo B. et al.* Long Beam Pulses with SLED Compression in DАФNE LINAC. //C:/Users/User/Downloads/Long_beam_pulses_with_SLED_compression_in_DAPHNE_L%20(1).pdf.
39. *Жиронкин И. С., Сумбаев А. П., Кобец В. В., Левичев А. Е.* О роли тайминга инжекции пучка электронов в ускоряющую структуру ускорителя ЛУЭ-200 при использовании системы компрессии СВЧ-мощности // *Письма в ЭЧАЯ.* 2025. Т. 22, № 4.

Получено 5 марта 2025 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 20.05.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,54. Тираж 100 экз. Заказ № 61104.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/