

P9-2017-77

Е. А. Голубков, В. В. Кобец, В. Ф. Минашкин,
К. И. Михайлов, А. Н. Репкин, А. П. Сумбаев,
К. В. Удовиченко, В. Н. Швецов

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДКИ
ВТОРОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ
УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200 УСТАНОВКИ **ИРЕН**

Голубков Е. А. и др.

P9-2017-77

Первые результаты наладки второй ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН

Представлены первые результаты запуска и наладки второй ускоряющей секции линейного ускорителя электронов с бегущей волной 10-см диапазона ($f = 2856$ МГц) — драйвера установки ИРЕН (источника фотонейтронов ЛНФ ОИЯИ). Приведены основные параметры ускоряющей системы, параметры источников СВЧ-мощности, модуляторов, ускоренного пучка и нейтронных потоков.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Golubkov E. A. et al.

P9-2017-77

First Results of Startup of the Second Accelerating Section of the LUE-200 Linac of the IREN Facility

The first results of startup and adjustment of the second accelerating section of the electron linear accelerator with an S-band traveling wave ($f = 2856$ MHz) — the driver of the IREN facility (a neutron source of JINR FLNP) — are discussed. Key parameters of the accelerating system, RF power sources, modulators, accelerated beam, and neutron fluxes are presented.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1,2] сообщалось о запуске первой очереди ускорителя ЛУЭ-200 — драйвера источника фотонейтронов ИРЕН — и о планах дальнейшего развития ускорителя. Линейный ускоритель электронов с ускоряющей структурой на бегущей электромагнитной волне 10-см диапазона ($f = 2856$ МГц), подробно представленный в работе [2], вводился в строй поэтапно. На первом этапе введена первая очередь в составе одной ускоряющей секции. Планами развития ускорителя до второй очереди [3] предусматривалось включение в ускоряющую систему ускорителя второй ускоряющей секции со вторым клистроном с собственным модулятором. Целью развития ускорителя является повышение мощности пучка электронов и, как следствие, увеличение выхода нейтронных потоков источника ИРЕН, используемого для проведения исследований в области нейтронной ядерной физики и прикладных исследований.

Структурная схема ускорителя представлена на рис. 1. Ускоряющая система ЛУЭ-200 состоит из двух трехметровых ускоряющих секций с постоянным импедансом УС1 и УС2, запитанных от собственных клистронов КЛ1 и КЛ2 соответственно через системы компрессии СВЧ-мощности SLED, и группирователя, запитанного от СВЧ-тракта первой секции через ответвитель с аттенуатором и фазовращателем. Особенностью второй очереди ускорителя является использование для питания клистронов двух новых модуляторов с импульсной мощностью 180 МВт, способных работать со средней мощностью 180 кВт. Оба модулятора (М1, М2), несмотря на различие клистронов, выполнены по одинаковой схеме с разрядом двух параллельно соединенных формирующих линий на первичную обмотку высоковольтного импульсного трансформатора клистрона. Описание модуляторов представлено в работе [4].

1. ИТОГИ РАБОТЫ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ

Основные результаты наладки первой очереди ускорителя представлены в работе [3]. Первая очередь ускорителя отработала на эксперимент несколько тысяч часов при частоте циклов 10–25 Гц с током пучка 1,5–2,0 А длитель-

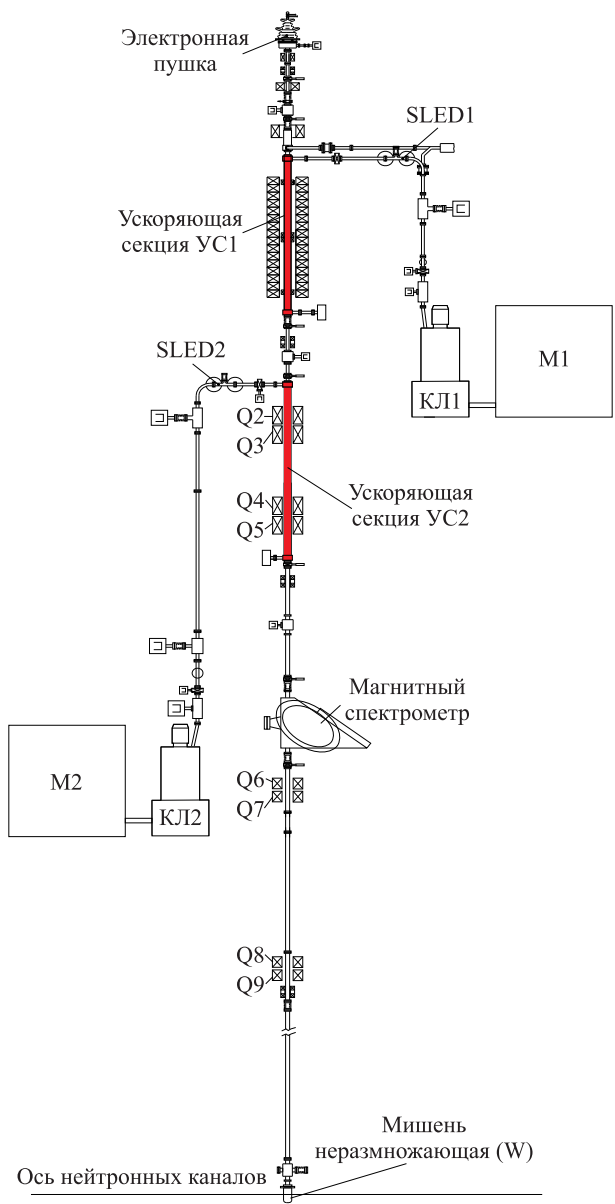


Рис. 1. Структурная схема ускорителя в составе второй очереди: SLED1 и SLED2 — системы компрессии СВЧ-мощности первой и второй секций; КЛ1, КЛ2 — клистроны первой и второй секций; M1 и M2 — модуляторы; Q2–Q9 — квадрупольные линзы

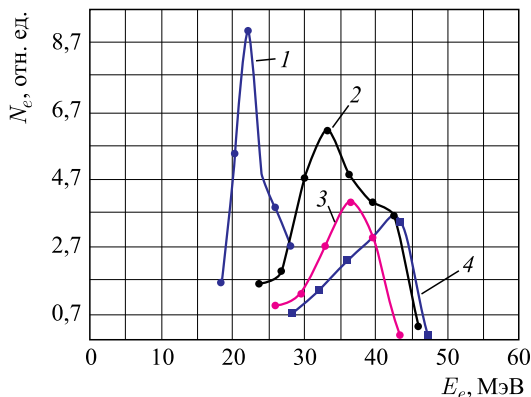


Рис. 2. Спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона TH2129 Thomson, при различных токах пучка $I_{п}$ и различных уровнях мощности возбуждения. Кривые 1 и 2 — $I_{п} = 2$ А, кривые 3 и 4 — $I_{п} = 1$ А

ностью 100 нс. Максимальные значения интегрального выхода источника нейтронов, полученные при частоте циклов 25 Гц, близки к $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 представлены энергетические спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона TH2129 Thomson с мощностью 17 МВт, при различных токах пучка $I_{п}$ в секции (1 и 2 А) и различных уровнях мощности возбуждения, измеренные магнитным спектрометром, представленным в работе [5]. Спектры 1 и 3 измерены при выходной мощности задающего СВЧ-генератора 100 мВт, спектры 2 и 4 — при 164 и 180 мВт соответственно. Из рисунка видно, что положение максимума спектра энергий при увеличении тока пучка смещается в область меньших энергий, а максимальное значение энергии электронов не превышает 45–46 МэВ.

В краткосрочном сеансе работы первой очереди (первой секции) ускорителя с клистроном E3730A Toshiba с частотой циклов 5 Гц при СВЧ-мощности, отбираемой от клистрона ≈ 40 МВт, максимальные энергии частиц достигали значений 50–55 МэВ.

Как уже отмечалось в работе [3], основными проблемами, снижающими эффективность работы первой очереди ускорителя, являются потери пучка в ускоряющих структурах группирователя и первой секции, а также подгрузка ускоряющего поля бегущей волны ускоряемым пучком [6, 7]. Результатом таких проблем для ускорителя как драйвера источника нейтронов в целом являются снижение мощности пучка и выхода нейтронных потоков.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДКИ ВТОРОЙ СЕКЦИИ

Вторая ускоряющая секция является полным аналогом первой ускоряющей секции. Установка второй секции сопровождалась установкой второго СВЧ-фидера, подводящего СВЧ-мощность от клистрона КЛ2, вместе с системой умножения СВЧ-мощности SLED2.

Фокусировка пучка от пушки до входа в группирователь осуществляется короткими соленоидальными магнитными линзами. В группирователе и в первой ускоряющей секции пучок транспортируется непрерывным соленоидальным магнитным полем, сформированным коротким соленоидом в области группирователя, и длинным соленоидом, в который первая ускоряющая секция «погружена» практически по всей длине. Для транспортировки пучка от выхода первой ускоряющей секции до мишени используется фокусировка дублетами широкоапертурных квадрупольных линз Q2–Q3 и Q4–Q5 в области второй ускоряющей секции и дублетами квадрупольных линз Q6–Q7 и Q8–Q9 для транспортировки пучка от второй секции к мишени.

При установке второй ускоряющей секции на ускоритель изменена схема питания секций клистронами. Клистрон TH2129 Thomson установлен для питания второй секции, а к первой секции подключен клистрон E3730A Toshiba. Также внесены изменения и в схему системы СВЧ-возбуждения [8]. После установки и наладки второй ускоряющей секции процесс СВЧ-тренировки первой секции и ее СВЧ-тракта проведен заново. После предварительной СВЧ-тренировки второй секции с СВЧ-трактом достигнуты следующие уровни СВЧ-мощности на клистронах: 30 МВт на клистроне КЛ1 (E3730A Toshiba) и 17 МВт на клистроне КЛ2 (TH2129 Thomson). Произведена проводка пучка с током 1,0–1,2 А по тракту до магнитного спектрометра и до мишени. Как и при работе первой очереди, длительность тока пучка составляла около 100 нс.

На рис. 3 представлены спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200, при различных токах пучка электронной пушки $I_{\text{эл}}$: 1 — $I_{\text{эл}} = 3,5$ А, 2 — $I_{\text{эл}} = 1,2$ А. Следует отметить, что, в отличие от рис. 2, на рис. 3 указаны не токи пучка в секции, а токи пучка, полученные от электронной пушки. С учетом потерь по тракту ускорителя ток пучка на мишени при этом не превышал 1,2 и 0,5 А.

Сравнивая спектры пучка первой очереди (рис. 2) и первые спектры, измеренные при ускорении в двух секциях (рис. 3), можно отметить увеличение энергии ускоренного пучка: положение максимума спектра сдвигается до 52–54 МэВ, а значения максимальной энергии электронов достигают 60 МэВ. В сравнении спектров пучков с различными величинами тока также заметно общее снижение энергии ускоренных электронов при увеличении тока пучка, что, по всей видимости, можно объяснить подгрузкой ускоряющего СВЧ-поля кулоновским зарядом ускоряемого пучка.

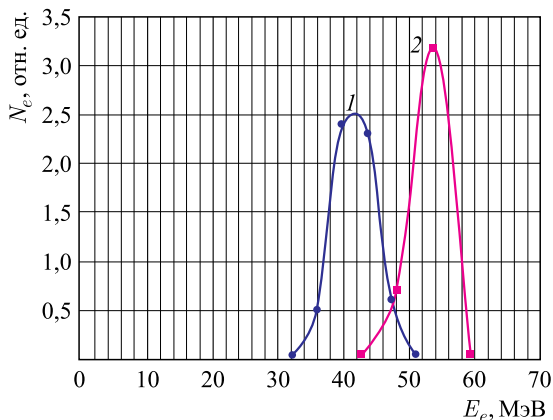


Рис. 3. Спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200, при различных токах пучка электронной пушки $I_{эл}$: 1 — $I_{эл} = 3,5$ А, 2 — $I_{эл} = 1,2$ А

Сравнительные параметры 1-й и 2-й очередей ускорителя ЛУЭ-200

Параметр	1-я очередь	2-я очередь	
	1 секция	1-я секция	2-я секция
Количество ускоряющих секций	1 секция	2 секции	
Тип клистрона — источника СВЧ-мощности ускоряющих секций	ТН2129 Thomson	Е3730А Toshiba	ТН2129 Thomson
Импульсная мощность клистрона номинальная, МВт	20	50	20
Импульсная мощность клистрона реализованная, МВт	17	30	17
Максимальная энергия электронов (верхняя граница спектра), МэВ	42	60	
Средний ток пучка в импульсе, А	1,5	1,5	
Длительность импульса тока, нс	100	100	
Частота циклов, Гц	25	50	
Средняя мощность пучка, кВт	0,13	0,41	

Сравнение параметров электронных пучков первой очереди и пучков, ускоренных в двух секциях, представлено в таблице.

Для дальнейшего повышения энергии ускоряемых электронов необходимо повышение выходной мощности клистронов, ограниченное развитием в ускоряющих структурах и СВЧ-трактах мультипакторных явлений и СВЧ-пробоев. Планируется продолжение СВЧ-тренировки ускоряющих структур

и СВЧ-трактов, связывающих структуры с клистронами, а также усиление мер защиты клистронов от воздействия перенапряжений в области выходных СВЧ-окон.

На достигнутых параметрах пучка электронов проведено несколько сеансов работы ускорителя по генерации нейтронов при частоте циклов 50 Гц. Оценки интегрального выхода нейтронов из W-мишени, произведенные по измерению плотности потока нейтронов штатными детекторами установки ИРЕН, показывают увеличение интегрального выхода нейтронов по сравнению с первой очередью в 3–4 раза. Результаты первых экспериментов, выполненных на нейтронных пучках импульсного источника нейтронов ИРЕН после установки второй секции ускорителя ЛУЭ-200, представлены в работе [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ускорителе ЛУЭ-200 установки ИРЕН дан старт нового этапа развития, связанного с монтажом и наладкой второй ускоряющей секции. Проведены первые измерения параметров пучков электронов, ускоренных в двух секциях. В новых экспериментах, выполненных на пучках нейтронов после запуска второй секции ускорителя, подтверждена актуальность источника нейтронов ИРЕН как базовой установки Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sumbaev A., Shvetsov V.* Physical Startup of the First Stage of the IREN Facility // JINR News. 2009. No. 1. P. 9–13.
2. *Белозеров А. В. и др.* Физический пуск первой очереди установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 923–932.
3. *Бечер Ю., Голубков Е. А., Егоров В. А., Зайцева Ю. К., Замрий В. Н., Каюков А. С., Кобец В. В., Корокин А. Ж., Минашкин В. Ф., Павлов В. М., Пятаев В. Г., Репкин А. Н., Скрыпник А. В., Сумбаев А. П. и др.* Ускоритель ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Состояние и развитие // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1029–1039.
4. *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.
5. *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, St. Petersburg, Russia, THPSC051; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc051.pdf>

6. 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.
7. 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.
8. Mihailov K. I., Golubkov E. A., Kobets V. V., Repkin A. N., Sumbaev A. P. Upgrade of the RF System on the LUE-200 // Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, TUPSA019; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/tupsa019.pdf>
9. Панова Т. Д., Дмитриев А. Ю., Борзаков С. Б., Храшко К. Анализ содержания мышьяка и ртути в человеческих останках XVI и XVII вв. из некрополей Московского Кремля методом нейтронного активационного анализа на установке ИРЕН и реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 1(213). С. 117–124.

Получено 13 ноября 2017 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 15.01.2018.

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

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,76. Тираж 180 экз. Заказ № 59317.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/