

# О РОЛИ ТАЙМИНГА ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В УСКОРЯЮЩУЮ СТРУКТУРУ УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ КОМПРЕССИИ СВЧ-МОЩНОСТИ

И. С. Жиронкин<sup>a, 1</sup>, А. П. Сумбаев<sup>a</sup>, В. В. Кобец<sup>a</sup>, А. Е. Левичев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

<sup>b</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

Представлены результаты измерений энергетических характеристик пучка электронов при изменении времени инжекции пучка в ускоряющую структуру ускорителя ЛУЭ-200 — драйвера установки ИРЕН, импульсного источника фотонейтронов Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Показано, что при использовании системы компрессии СВЧ-мощности типа SLED выбор момента инжекции пучка в ускоряющую структуру является важным средством формирования и оптимизации режимов ускорения.

The results of measurements of the energy characteristics of the electron beam with a change in the time of beam injection into the accelerating structure of the LUE-200 accelerator — the driver of the IREN facility, a pulsed photoneutron source of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna), are presented. It is shown that when using a microwave power compression system of the SLED type, the choice of the moment of beam injection into the accelerating structure is an important means for forming and optimizing acceleration modes.

PACS: 29.27.Ac; 29.25.Dz; 29.20.Ej

## ВВЕДЕНИЕ

Системы компрессии СВЧ-мощности типа SLED [1] 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 импульса тока 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 инжекция 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) инжекция частиц пучка в структуру

---

<sup>1</sup>E-mail: jironkin@jinr.ru

происходит в течение промежутка времени, в котором величина ускоряющего поля может существенно измениться. В этом случае частицы, находящиеся в «голове» пучка и в его «хвосте», приобретают разную энергию, спектр энергий частиц пучка становится значительно шире, а конкретные энергетические характеристики пучка зависят от положения времени инжекции пучка относительно момента инверсии фазы СВЧ-мощности на входе в систему компрессии SLED. В целях настоящего сообщения 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. В работах [2, 3] проведены аналитические и экспериментальные исследования систем компрессии СВЧ-мощности типа SLED, используемых для питания ускоряющих структур на бегущей волне 10-см диапазона (частота 2856 МГц) с модой колебаний  $2\pi/3$  и постоянным импедансом, разработанных в ИЯФ им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН для линейных ускорителей электронов. Структуры данного типа работают в ускорительном комплексе ИЯФ (форинжектор ВЭПП5) [4] и в ускорителе ЛУЭ-200 Объединенного института ядерных исследований [5], а также в линейном ускорителе инжектора СКИФ [6].

В работе [7] измерены спектры энергии пучка при тайминге инжекции пучка на этапе стендового тестирования первой ускоряющей секции форинжектора ВЭПП5 Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. В этих измерениях продемонстрировано существование оптимума по времени инжекции, соответствующего максимальному энергосодержанию ускоренного пучка.

В данном сообщении в продолжение исследований, выполненных в [8], рассматриваются вопросы эффективности работы ускоряющей системы линейного ускорителя ЛУЭ-200, использующей для повышения уровня инжектированной в ускоряющую структуру СВЧ-мощности системы компрессии типа SLED и ее оптимизации для различных режимов ускорения пучка.

## **УСКОРИТЕЛЬ ЛУЭ-200. ОСОБЕННОСТИ СХЕМЫ УСКОРЕНИЯ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ**

Драйвер импульсного источника нейтронов ИРЕН [5] ускоритель ЛУЭ-200 обладает набором параметров, которые обеспечивают ускорение сильноточного пучка с длительностью 100–200 нс ускоряющей системой, запитанной от источников СВЧ-мощности через системы SLED. Структурная схема ЛУЭ-200 представлена на рис. 1. Ускоритель состоит из электронной пушки, группирователя, двух ускоряющих секций на бегущей волне 10-см диапазона (2856 МГц) с постоянным импедансом [4], запитанных от клистронов КЛ1 (E37340 Canon) и КЛ2 (TH2129 Thomson). Источником электронов ускорителя является двухэлектродная пушка с питанием катода импульсным напряжением 200 кВ с током пучка 3–4 А длительностью 200 нс на полувысоте импульса. В вакуумированные волноводные фидеры питания ускорительных секций СВЧ-мощностью включены системы компрессии SLED1 и SLED2 соответственно.

Для измерения энергии частиц пучка используется магнитный спектрометр [9], который состоит из поворотного магнита, вакуумной камеры и позиционно-чувствительного детектора.

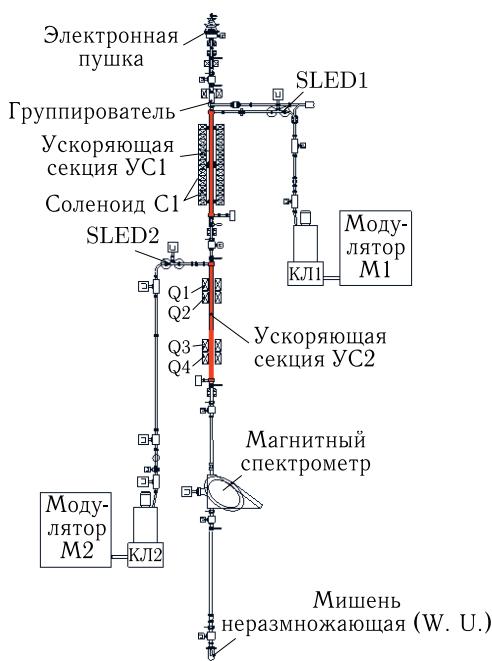


Рис. 1. Структурная схема ускорителя ЛУЭ-200. КЛ1, КЛ2 — клистроны; М1, М2 — модуляторы; SLED1, SLED2 — системы компрессии СВЧ-мощности; Q1—Q4 — квадруполя

При включенном магнитном поле пучок после прохождения анализирующего магнитного поля выводится из вакуумной камеры через тонкую фольгу и регистрируется детектором — коллектором, состоящим из свинцовых ламелей полного поглощения, установленных «в линейку».

При выключенном магнитном поле спектрометра пучок по вакуумированному электроноводу проводится до мишени. В качестве материала нейтроноприводящей неразмножающей мишени используется сплав ВНЖ-90 на основе вольфрама. Нейтроны в мишени рождаются в результате двухступенчатого процесса. Вначале ускоренные электроны тормозятся в мишени, рождая гамма-кванты. Затем в результате взаимодействия высокoenергетических гамма-квантов с ядрами вольфрама в реакциях  $^{40}\text{W}(\gamma, n)^{41}\text{W}$  рождаются нейтроны.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока пучка, измеренные поясами Роговского в контрольных точках ускорительного тракта. На рис. 3 представлена схема ускоряющей системы ЛУЭ-200 вместе со схемой СВЧ-возбуждения клистронов.

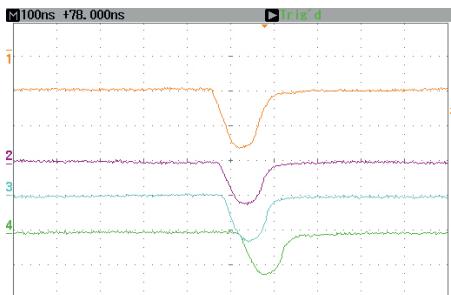


Рис. 2. Осциллограммы тока пучка, измеренные в контрольных точках ускорительного тракта: 1 — после первой ускоряющей секции; 2 — после второй ускоряющей секции; 3 — после магнитного спектрометра; 4 — перед мишенью. Разворотка осциллографа — 100 нс/дел., чувствительность датчиков 1 А/В

Клистроны формируют для ускоряющих секций импульсы СВЧ-мощности со следующими параметрами: уровень выходной мощности первого клистрона — 35 МВт, уровень выходной мощности второго клистрона — 20 МВт. Длительность СВЧ-импульса клистрона (3,5 мкс) должна превышать время заполнения резонаторов SLED СВЧ-мощностью падающей волны, которое составляет 3 мкс. По истечении этого времени фазовращателями  $\Phi 180^\circ$  в генераторе рабочей частоты 2856 МГц (см. рис. 3) производится переворот фазы СВЧ-возбуждения на  $180^\circ$  и системы SLED начинают

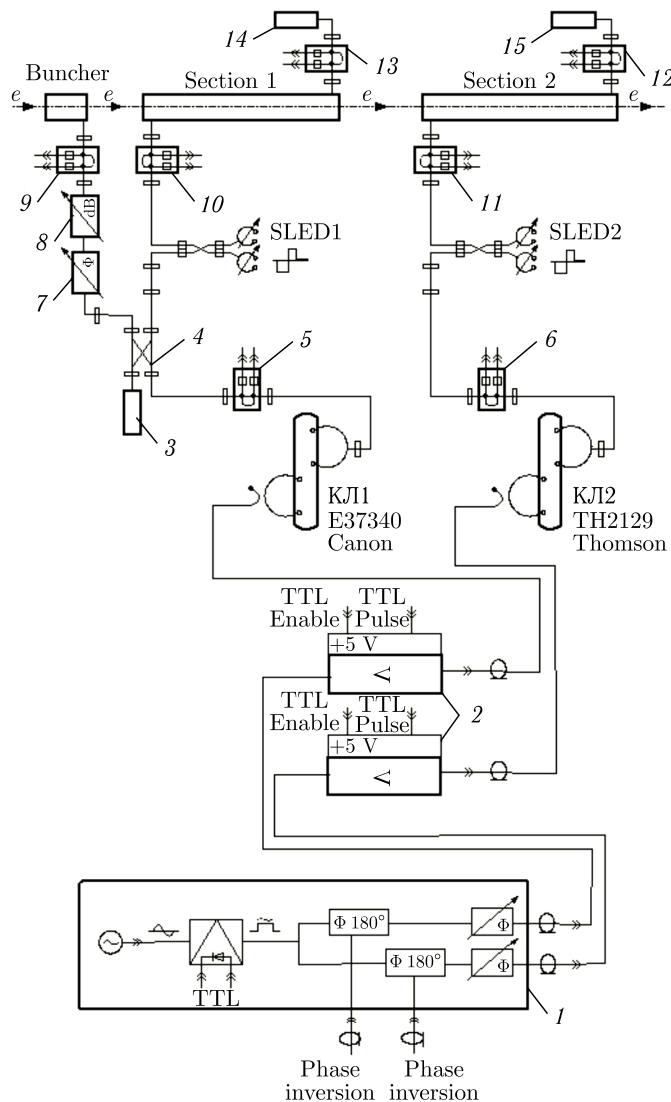


Рис. 3. Схема ускоряющей системы ЛУЭ-200 со схемой возбуждения клистронов КЛ1 и КЛ2. SLED1, SLED2 — системы компрессии СВЧ-мощности; 1 — двухканальный генератор рабочей частоты 2856 МГц с переворотом фазы в каналах; 2 — предусилители СВЧ-мощности возбуждения клистронов; 3, 14, 15 — оконечные высокочастотные нагрузки; 4 — направленный ответвитель; 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 — измерительные ответвители

излучать в ускоряющие секции СВЧ-мощность увеличенного уровня с коэффициентом усиления, который равен отношению уровня СВЧ-мощности отраженной от резонаторов системы SLED волны к уровню мощности падающей волны [2, 3].

На рис. 4 представлены осциллограммы огибающих СВЧ-мощности, измеренные ответвителями, установленными на выходе ускоряющих секций перед оконечной

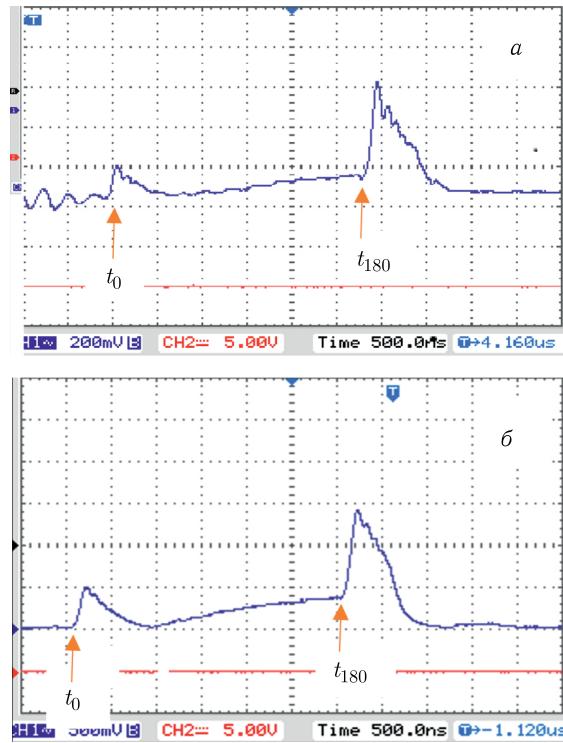


Рис. 4. Осциллографмы огибающих СВЧ-мощности на выходе ускоряющих секций при работе без пучка: а) у первой секции; б) у второй секции.  $t_0$  — начало подачи СВЧ-мощности в ускоряющую секцию,  $t_{180}$  — включение переворота фазы СВЧ-возбуждения кластронов

СВЧ-нагрузкой. Из рис. 4 видно, что для ускорителя ЛУЭ-200 коэффициенты усиления мощности для обеих секций примерно равны и достигают  $\approx 3$ .

Для эффективного использования СВЧ-мощности, запасенной в ускоряющей секции, инжекция пучка в секцию, как правило, производится после полного заполнения секции импульсом СВЧ-мощности  $t_{in} > T_f = L/\bar{V}_{rp}$ , где  $T_f = 0,476$  мкс — время заполнения секции СВЧ-мощностью,  $L$  — длина ускоряющей секции, групповая скорость СВЧ-волны в секции  $V_{rp} = 0,021c$ ,  $c$  — скорость света. В случае использования системы компрессии мощности SLED инжекция пучка производится после переворота фазы в системе возбуждения.

В работе [10] аналитически показано, что в силу того, что длительность импульса тока пучка ( $\approx 100$  нс) соизмерима с длительностью фронта нарастания СВЧ-мощности в секции после переворота СВЧ-фазы на входе в SLED ( $\approx 40$  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. 5 представлен расчетный набор энергии частицы при пролете одной ускоряющей секции, запитанной от генераторов — кластронов с разной мощностью (17, 30 и 67 МВт) при использовании системы SLED с коэффициентом усиления мощ-

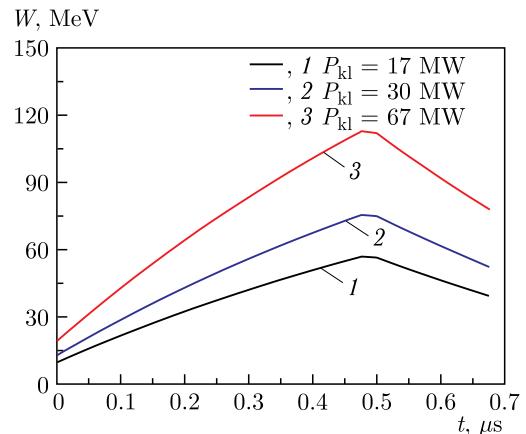


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Расчетный набор энергии частицы при пролете одной ускоряющей секции, запитанной от генераторов — кlyстронов с разной мощностью при использовании системы SLED с коэффициентом усиления мощности 3 [10]

ности 3 [10]. Из рисунка видно, что максимальный набор энергии в любом случае происходит при инжекции через  $\approx 0,47$  мкс после переворота фазы.

Для конфигурации кlyстронов, реализованной на ускорителе (мощность от первого кlyстрона  $\approx 30$  МВт, от второго кlyстрона  $\approx 17$  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 [10], показывают, что для пучка с током 1,0–1,5 А можно получить максимальную энергию частиц  $\approx 130$ –135 МэВ и  $\approx 90$ –96 МэВ в максимуме спектра.

## ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТАЙМИНГА

В процессе тайминга инжекции пучка на ускорителе за исходную точку (0) было принято время инжекции, соответствующее оптимальной настройке ускорителя (с максимальным выходом нейтронов) в конце длительного цикла. Шаг изменения времени инжекции пучка в первую ускоряющую секцию выбирался исходя из ширины импульса тока пучка в основании после прохождения первой ускоряющей секции и принимался равным 0,15 мкс.

Для оценки влияния настройки ускорителя на выход нейтронов использовался «нейтронный монитор», основанный на пластиковом сцинтилляторе в комбинации с микропикельным лавинным фотодиодом, который размещался в мишленном зале и регистрировал как нейтроны, так и гамма-кванты, рожденные в мишени. Монитор не является прибором измерения абсолютного числа нейтронов, но служит для фиксации относительного изменения уровня выхода нейтронов при изменении настройки ускорителя.

Результаты измерений основных параметров ускорителя в процессе эксперимента представлены в таблице и на рис. 6–8.

На рис. 6 представлен спектр энергий пучка в «оптимальной настройке» при проведении тайминга инжекции пучка с током 1,25 А.

Можно заметить, что отклонение времени инжекции от исходной точки (0) буквально в несколько шагов от оптимума приводит к нулевому прохождению пучка по

**Основные параметры ускорителя при изменении времени инжекции пучка в первую ускоряющую секцию**

Параметр	Смещение времени инжекции, нс						
	-450	-300	-150	0	+150	+300	+450
Амплитуда тока на выходе второй секции, А	0	0,37	1,25	1,25	1,1	1,3	0
Показания «нейтронного монитора», имп./мин.	0	3328	5335	6330	4768	3772	0
Максимальная энергия электронов, МэВ	0	51	77	94	95	68	0
Энергия максимума спектра, МэВ	0	51	72	90	91	68	0
Ширина спектра на половине высоты, МэВ	—	2	8	8	17	3	—

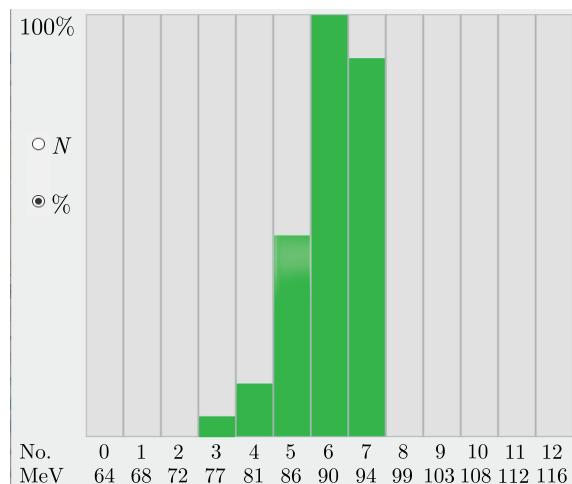


Рис. 6. Спектр энергий пучка в «оптимальной настройке» при проведении тайминга инжекций пучка с током 1,25 А

ускорительному тракту. Несмотря на то, что амплитуда тока пучка на выходе второй секции в итерации со смещением времени инжекции +0,3 мкс становится немного больше, форма импульса тока значительно искажается и становится меньше по интегралу частиц.

На рис. 7 представлен спектр энергии пучка, ускоренного в двух секциях при времени инжекции -300. Несмотря на то, что прохождение пучка через ускоритель снизилось (всего 0,37 А), такая настройка пучка может представлять интерес для пользователей в качестве источника электронов с узким энергетическим спектром.

На рис. 8 представлен спектр энергий пучка, полученный в результате комплексной настройки ускорителя, включающей выбор времени инжекции и подбор частоты задающего генератора СВЧ-возбуждения клистронов [8] с целью получения максимальной энергии при сохранении адекватного уровня прохождения пучка (1,3 А на мишени).

Из полученных данных можно сделать вывод о корректном выборе времени инжекции пучка 0, продуктивном с точки зрения выхода нейтронов, о специфических

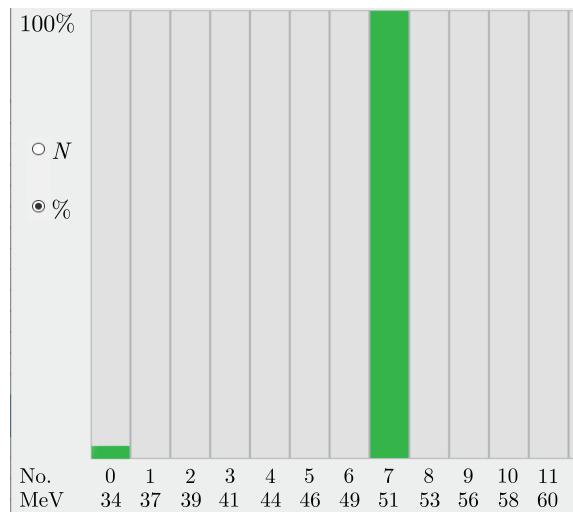


Рис. 7. Спектр пучка, ускоренного в двух секциях в режиме «до включения компрессии СВЧ-мощности» SLED.  $I_b = 0,37 \text{ A}$

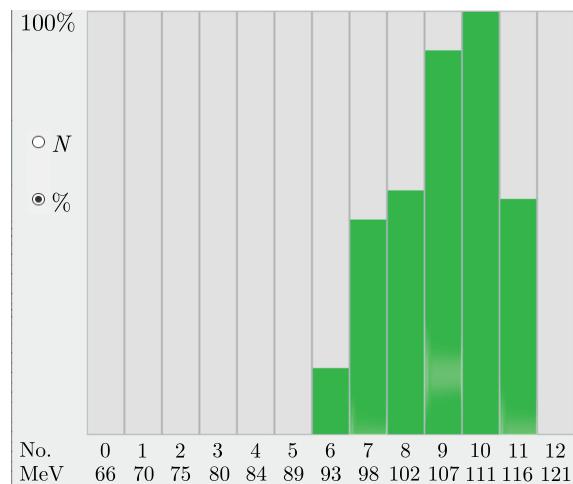


Рис. 8. Спектр пучка, ускоренного в двух секциях в режиме «включения компрессии СВЧ-мощности».  $I_b = 1,3 \text{ A}$

граничных случаях, которые позволяют получить узкий спектр ускоренного пучка (см. рис. 7). Представляется возможным в случае комбинации разных подходов к настройке ускорителя (изменение мощности СВЧ, ширины импульса инжектируемого пучка, времени инжекции) получение больших средних энергий и максимального выхода нейtronов при сохранении низкого энергетического разброса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ускорителе ЛУЭ-200 — драйвере источника фотонейтронов ADS-типа — ускоряются пучки, длительность импульса которых примерно равна 1/5—1/10 постоянной времени спада огибающей СВЧ-мощности. В этом случае «голова» и «хвост» пучка ускоряются в полях, отличающихся для «головных» и «хвостовых» частиц, что влияет

как на форму импульса тока ускоренного пучка, в первую очередь на амплитуду (т. е. с потерей частиц), так и на энергетический спектр пучка. В результате тайминга инжекции пучка в ускоряющую систему в совокупности с согласованием собственных частот компонентов СВЧ-системы ускорителя получены энергетические характеристики пучка, близкие к расчетным для реализованной конфигурации СВЧ-системы.

Для ускорителя ЛУЭ-200 главным параметром пучка ускоренных электронов является его мощность, определяемая величинами энергии и тока пучка. Выбор момента инжекции пучка в такую систему становится удобным средством изменения и оптимизации режимов ускорения и зависит от целевого использования ускорителя ЛУЭ-200, либо как драйвера источника фотонейtronов, либо как источника сильно-точного пучка электронов для прикладных целей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farkas Z. D., Hogg H. A., Loew G. A., Wilson P. B.* SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy // Proc. 9th Intern. Conf. on High Energy Accel. (SLAC-PUB-1453), SLAC, Stanford, CA, May 1974. P. 576–586.
2. Павлов В. М. Система умножения мощности SLED. Сообщ. ИЯФ 97-94. Новосибирск, 1997.
3. Мальцева М. В., Павлов В. М., Самойлов С. Л., Андрианов А. В., Пивоваров И. Л. Изменение резонаторов системы умножения мощности типа SLED // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12, № 4. С. 20–29.
4. Avilov M. S., Akimov V. E., Aleksandrov A. V. et al. Test of Accelerating Section for VEPP-5 Preinjector. Tech. Rep. BUDKER-INP-2000-50. Novosibirsk, 2000.
5. Sumbaev A., Kobets V., Shvetsov V., Dikansky N., Logatchov P. LUE-200 Accelerator – A Photoneutron Generator for the Pulsed Neutron Source IREN // J. Instrum. 2020. V. 15. P. T11006.
6. Levichev A., Grishina K., Samoilov S., Arsentieva M., Chekmenev D., Ma Xiaochao, Meshkov O., Pivovarov I., Nikiforov D., Barnyakov A. Results of Manufacturing and Operation of the First Accelerating Structures for the Linear Accelerator of the SKIF Injector Based on a Disk-Loaded Waveguide // J. Instrum. 2023. V. 18. P. T07001.
7. Кобец В. В., Мешков И. Н., Сумбаев А. П., Фурман В. И., Швец В. А., Логачёв П. В., Павлов В. М., Фролов А. Р., Гуров С. М. Проект ИРЕН: статус и первые результаты // Тр. IV Науч. семинара памяти В. П. Саранцева, Дубна, 26–28 сентября 2001 г. Дубна, 2002. С. 150–160.
8. Levichev A. E., Arsentyeva 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.
9. Sumbaev A. P., Tarantin N. I., Shokin V. I. The Magnetic Energy Analyzer for Electron Beam of LUE-200 Linac of IREN Facility // Proc. RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. THPSC051.
10. 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. ИЯФ 2020-06. Новосибирск, 2020.

Получено 28 октября 2024 г.