

ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-5: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ

*К. Астрелина^{a,1}, А. Андрианов^a, В. Балакин^b, А. Барняков^a,
О. Беликов^a, Д. Беркаев^a, М. Блинов^a, Ю. Боймелштейн^a,
Д. Болховитянов^a, В. Борин^a, А. Бутаков^a, С. Васильев^a,
Ф. Еманов^c, Г. Карпов^a, А. Касаев^a, А. Кондаков^a, И. Кооп^a,
Н. Кот^a, Г. Куркин^a, Р. Лапик^a, Н. Лебедев^a, А. Левичев^a,
Ю. Мальцева^a, А. Мартыновский^a, П. Мартышкин^a,
О. Мешков^a, С. Мотыгин^a, А. Мурасев^a, В. Мусливец^a,
Д. Никифоров^a, А. Пилан^b, Ю. Роговский^c, С. Самойлов^a,
А. Трибендис^b, А. Фролов^a, А. Цыганов^a*

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

^b Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^c Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 — это источник электронных и позитронных пучков на основе линейных ускорителей и накопителя-охлаждителя. Комплекс успешно проработал три сезона, снабжая частицами коллайдеры ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. За это время существенно улучшена производительность установки и продемонстрирована максимальная скорость накопления позитронов $1,2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Для этого постоянно проводилась работа по настройке ускорителей, улучшению используемых технологических процессов, установлена новая 11-МГц ВЧ-станция. К следующему сезону запланирован переход на новую электронную пушку, у которой существенно увеличены максимальный ток и время жизни катода.

Injection Complex VEPP-5 (IC) is based on linear accelerators and damping ring and used as electron and positron beam source. IC has operated for 3 seasons supplying charged particle beams for VEPP-2000 and VEPP-4M colliders. Systematic optimization in accelerators adjustment, upgrade of technological processes, rf cavity replacement have resulted in significant increasing of IC efficiency and achieving the record positron storage rate of $1.2 \cdot 10^{10}$ particles per second. The electron gun upgrade will be performed before the next operating season. The new gun has the higher peak current and cathode lifetime.

PACS: 29.20.-c; 07.05.Tr; 29.27.Ac; 29.27.Bd

¹E-mail: K.V.Astreлина@inp.nsk.su

ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный комплекс [1] с 2016 г. снабжает пучками заряженных частиц коллайдеры ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М (рис. 1). В состав комплекса входят два линейных ускорителя, циклический накопитель-охладитель (НО) с перепускными каналами, в котором попеременно производится накопление электронных и позитронных пучков. По каналу К-500 пучки транспортируются на установки потребителей.

Комплекс начал работу в ноябре 2018 г. и проработал 5570 ч за сезон. Работы по настройке пучковой орбиты и оптимизации процедур переключения режимов позволили получить максимальный на данный момент темп накопления позитронов $1,2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, при частоте импульсов электронной пушки 12,5 Гц (табл. 1). Частота выпуска в канал К-500 в значительной мере определялась запросами и возможностями потребителей, при этом возможности выпускной системы ИК позволяют поднять частоту до 1–4 Гц.

На рис. 2 показано измеренное в течение сезона количество частиц в накопителе, инжектированное за один импульс электронной пушки, а также количество частиц на самой пушке. Наблюдается постепенное снижение производительности катода пушки, но во время работы ИК оно успешно компенсировалось оптимизацией настроек инжекции и орбиты НО.

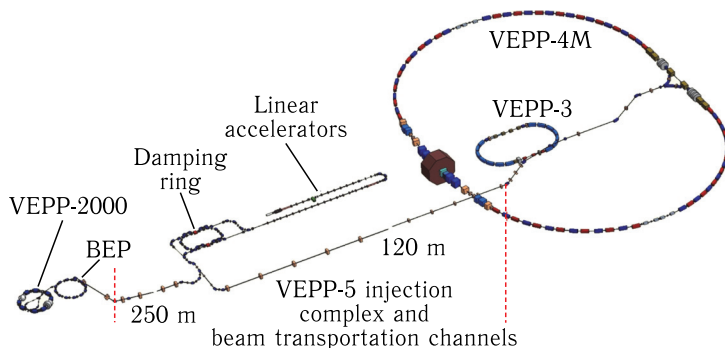


Рис. 1. Ускорительный комплекс ВЭПП-2000–ВЭПП-4М

Таблица 1. Основные параметры инжекционного комплекса в 2018–2019 гг.

Параметр	Значение
Энергия в НО, МэВ	390
Частота резонатора, МГц	11
Максимальная частота инжекции, Гц	12,5
Частота выпуска, Гц	0,25–0,3
Максимальная скорость накопления e^- , с^{-1}	$1,14 \cdot 10^{11}$
Максимальная скорость накопления e^+ , с^{-1}	$1,2 \cdot 10^{10}$
Эффективность перепуска в БЭП, %	~ 45
Эффективность перепуска в ВЭПП-3, %	~ 50

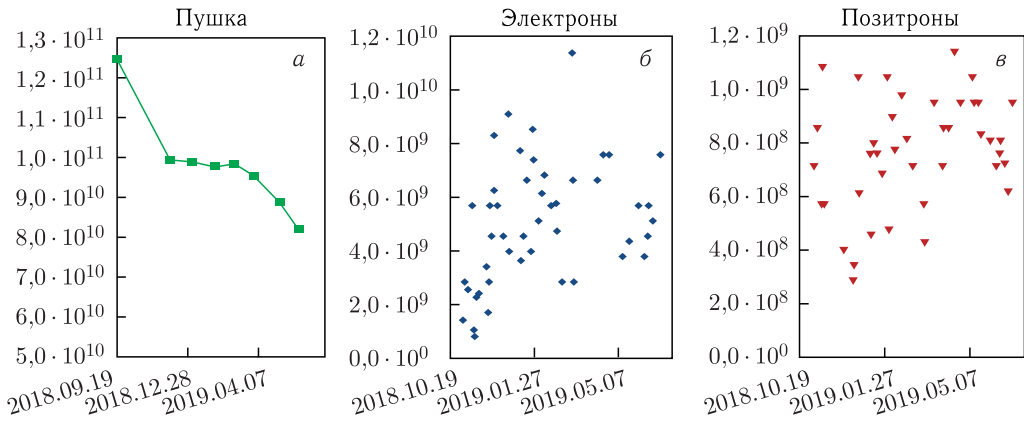


Рис. 2. Производительность инжекционного комплекса: а) количество частиц на электронной пушке за один импульс; б, в) количество электронов и позитронов, инжектированных в накопитель за один импульс

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ С НОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

После установки на кольце накопителя-охладителя нового резонатора первой гармоники с частотой 11 МГц были проведены исследования продольного движения пучка с помощью стрик-камеры и электронно-оптического диссектора. Измерения проводились при инжекции пучка в НО и при стационарном движении пучка в кольце на больших токах.

При исследовании процессов, происходящих с продольным распределением, было обнаружено, что пучок, состоящий из 16 сгустков после ускорения в форинжекторе, перегруппировывается в одиночный сгусток за 270 мкс, что значительно меньше, чем время радиационного затухания пучка (18 мс). Моделирование продольного движения пучка после инжекции показало значительное влияние импеданса кольца и связанных с ним коллективных эффектов. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

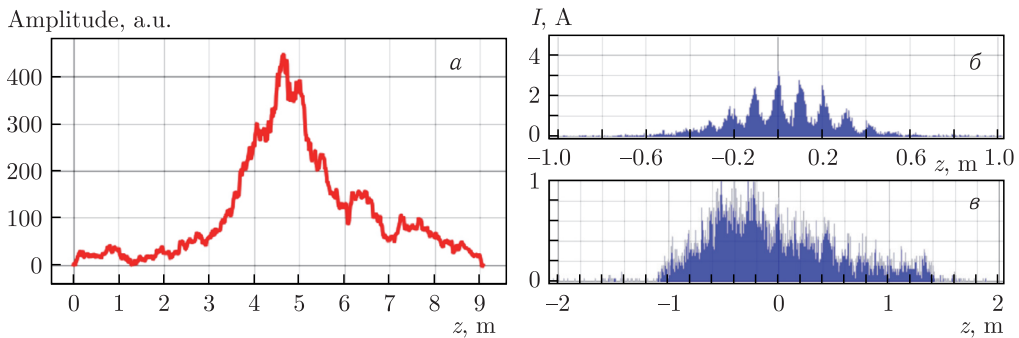


Рис. 3. Продольный профиль через 3200 оборотов: а) снятый стрик-камерой; б, в) полученный в результате моделирования (б — без учета импеданса связи, в — с учетом)

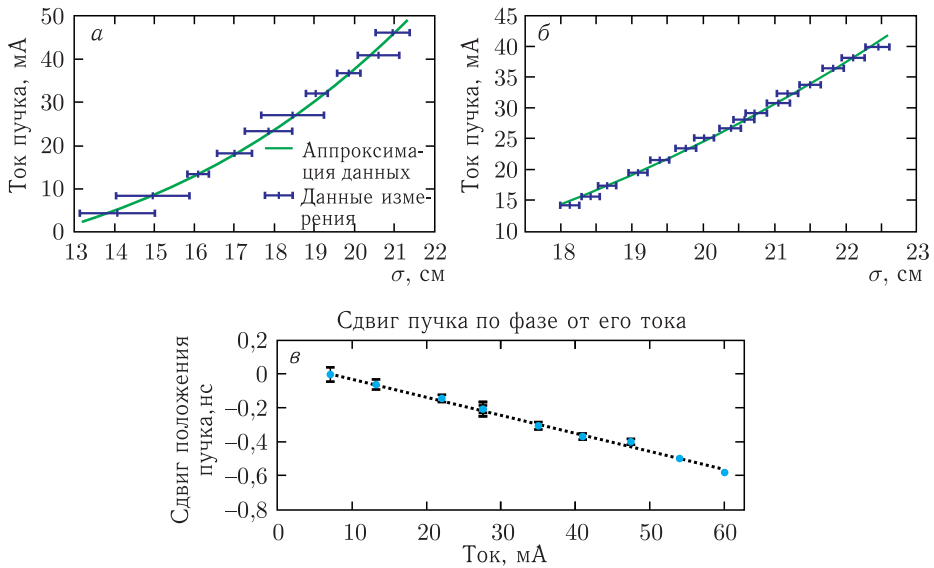


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной длины пучка от тока: *a*) измеренная стрик-камерой; *б*) измеренная диссектором; *в*) зависимость синхронной фазы от тока

Быстрая перегруппировка пучка в НО связана с возникновением микроволновой неустойчивости [2], которая в фазовом пространстве смешивает между собой отдельные сгустки. Пиковый ток инжектируемого сгустка (при среднем токе пучка при инжекции электронов 20 мА) составляет $\sim 1,8$ А и превышает пороговый ток возникновения неустойчивости, оценка которой по параметрам кольца дает величину 1,62 А. Таким образом, микроволновая неустойчивость определяет процессы, происходящие с пучком при инжекции.

Максимальный пиковый ток стационарного пучка в НО на рабочих режимах ниже порога микроволновой неустойчивости. При увеличении накопленного тока в кольце на форму пучка влияет искажение потенциальной ямы наведенными полями. Для исследования процессов удлинения пучка, искажения формы его профиля и смещения синхронной фазы были проведены измерения стрик-камерой и диссектором, определены значения действительной и мнимой частей продольного импеданса связи (рис. 4).

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ И КОРРЕКТИРОВКА ОРБИТЫ

В 2018 г. была произведена модернизация пикап-станций на кольце накопителя-охладителя и написано для них программное обеспечение. Ведется работа по созданию программных инструментов для калибровки модели кольца и оптимизации орбиты. Разработаны программы для измерения орбиты пучка в кольце, рабочей точки, дисперсионной функции и программа для снятия матриц отклика на изменение тока в дипольных и квадрупольных корректорах.

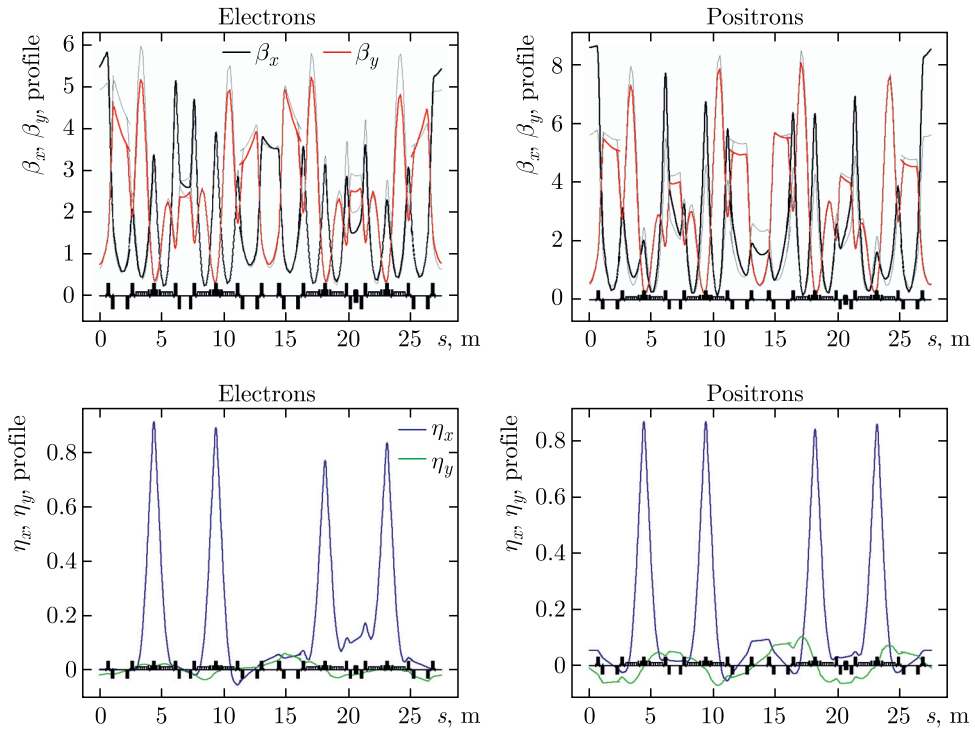


Рис. 5. Оптические функции НО после калибровки модели: бета-функции и дисперсия

На рис.5 показаны результаты калибровки модели для электронов и позитронов — функции, построенные на основе измерений матриц отклика орбиты на 16 пикапах с использованием дипольных корректоров.

ВОЗМОЖНЫЕ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ

1) Модернизация генераторов инфлекторов накопителя-охладителя. Одной из целей, способствующих улучшению производительности ИК, является повышение эффективности работы системы впуска-выпуска накопителя-охладителя. Минимизация потерь при перепусках возможна, если выполнен ряд требований к форме отклоняющих импульсов на впускных и выпускных инфлекторах. Наносекундные высоковольтные импульсы генератора инфлекторов должны иметь форму, близкую к прямо-

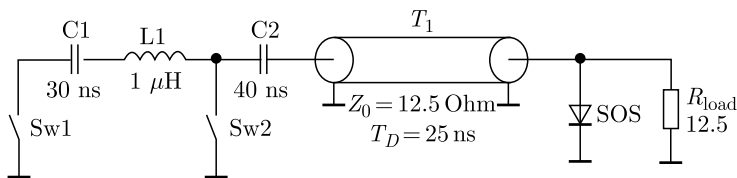


Рис. 6. Схема нового генератора

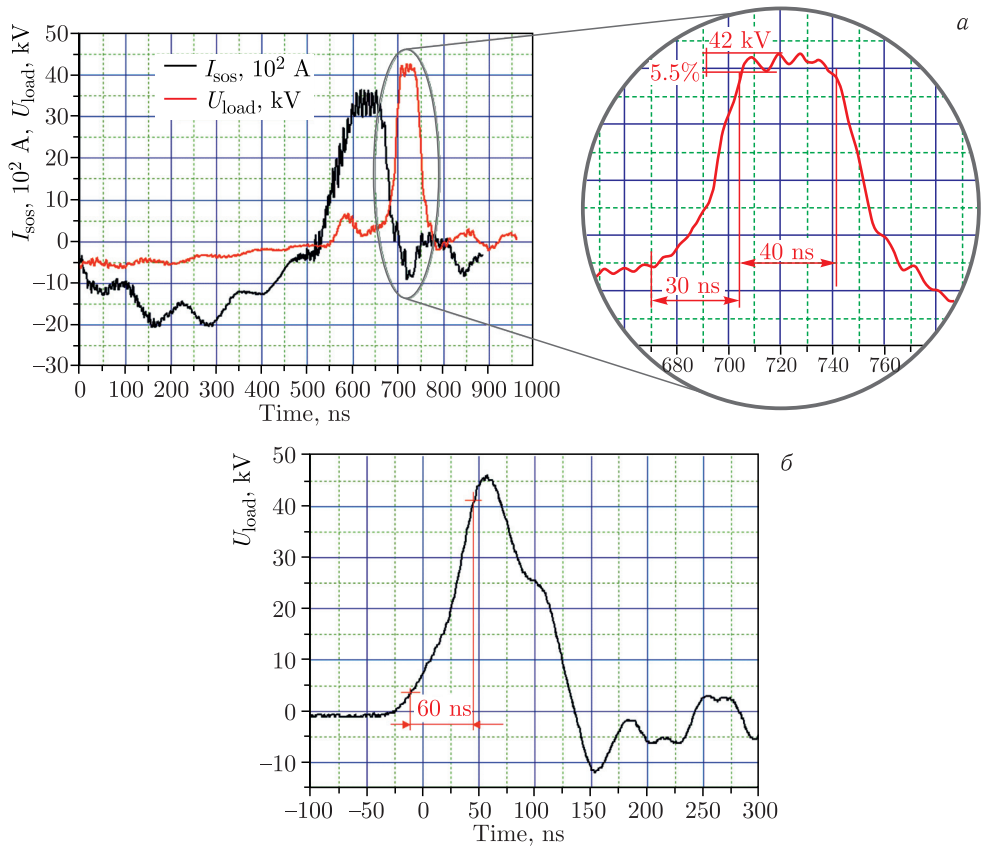


Рис. 7. Форма импульса с нового (а) и старого (б) генераторов

Таблица 2. Сравнительные параметры действующего и нового генератора

Параметр	Старый генератор	Новый генератор
Длина пластины, см	110	110
Волновое сопротивление пластины, Ом	50	50
Рабочая апертура, см		
вертикальная	2,4	2,4
горизонтальная	3,0	3,0
Форма импульса	Bell-shape	Rectangular
Напряжение на пластинах кикера (макс.), кВ	± 43	± 50
Ток в нагрузке инфлектора (макс.), кА	2	2
Частота инъекции (макс.), Гц	25	50
Частота экстракции, Гц	1–4	1–4
Нестабильность импульса (джиттер), нс	$\pm 1 - \pm 5$	< 2
Длительность фронтов, нс	80	< 50
Длительность полки (макс.), нс	5	20/92
Диапазон регулировки амплитуды выходного напряжения, %	10–100	10–100

угольной, и длительность по основанию менее периода оборота пучка в накопителе-охладителе, а также высокую временную стабильность (рис. 7, табл. 2). Используемые на ИК в настоящее время импульсные генераторы данным требованиям не удовлетворяют. Кроме того, требуют замены тиратроны, производство которых уже прекращено.

Разработана новая схема генератора прямоугольных импульсов для питания инфлекторов с использованием псевдоискровых тиратронов [3] и SOS-диода [4] и изготовлен прототип генератора (рис. 6).

2) Новая электронная пушка. Во время летней остановки 2019 г. была произведена замена катода электронной пушки инжектора. Измеренный заряд на новом катоде $27,3 \cdot 10^{10}$ электронов втрое больше значений прошлого сезона (см. рис. 2, а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжекционный комплекс продолжает работу по обеспечению пучками коллайдеров ИЯФ. Получен рекордный темп захвата позитронов в накопитель-охладитель $1,2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ за счет оптимизации настроек магнитной системы и совершенствования системы переключения режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maltseva Yu. I., Andrianov A. V., Astrelina K. V., Balakin V. V., Batrakov A. M., Belikov O. V., Berkaev D. E., Blinov M. F., Bolkhovityanov D., Butakov A., Bykov E. V., Dikansky N. S., Emanov F. A., Frolov A. R., Gambaryan V. V., Gorchakov K., Gusev Ye. A., Karnaev S. E., Karpov G. V., Kasaev A. S., Kenzhebulatov E., Kiselev V. A., Klushev S., Kondakov A. A., Koop I., Korenev I. E., Kot N. Kh., Kozak V. R., Krasnov A. A., Krutikhin S. A., Kuptsov I. V., Kurkin G. Y., Lebedev N. N., Levichev A. E., Logatchov P. V., Muraev A. A., Muslivets V., Nikiforov D. A., Novikov An. A., Ottmar A. V., Pavlenko A. V., Pivovarov I. L., Rashchenko V. V., Rogovsky Yu. A., Samoylov S. L., Sazonov N., Shwartz D. B., Skrinsky A. N., Starostenko A. A., Starostenko D. A., Tribendis A. G., Tsyganov A. S., Vasichev S. S., Vasiliev S., Yudin V. D., Zemlyansky I. M., Zhuravlev A. N. VEPP-5 Injection Complex Performance Improvement for Two Collider Operation // Proc. of RuPAC-2018; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUZMH02>.
2. Chao A. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. New Jersey: World Sci. Publ. Co. Pre. Ltd., 2013. 681 p.
3. Bochkov V. D., Dyagilev V. M., Korolev Yu. D., Ushich V. G. High-Power Low-Gas-Pressure Current Switches // Instr. Exp. Techn. 1998. V. 41, No. 5. P. 676–680.
4. Руккин С. Н. Генерирование мощных наносекундных импульсов на основе полупроводниковых прерывателей тока. Дис. . . д-ра техн. наук. 1998.