

СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Ф. А. Еманов^{a,1}, *А. В. Андрианов*^б, *К. В. Астрелина*^б, *В. В. Балакин*^а,
А. М. Барняков^б, *О. В. Беликов*^б, *Д. Е. Беркаев*^б, *М. Ф. Блинов*^б,
Ю. М. Боймельштейн^б, *Д. Ю. Болховитянов*^б, *Н. С. Диканский*^б,
А. Р. Фролов^б, *Г. В. Карпов*^б, *А. С. Касаев*^б, *А. А. Кондаков*^б,
И. В. Купцов^б, *И. А. Кооп*^б, *Г. Я. Куркин*^б, *Р. М. Лапик*^б, *Н. Н. Лебедев*^б,
А. Е. Левичев^б, *Ю. И. Мальцева*^б, *А. А. Мурасев*^б, *Д. А. Никифоров*^б,
А. В. Павленко^б, *В. В. Ращенко*^б, *С. Л. Самойлов*^б, *С. В. Васильев*^б,
И. М. Землянский^б, *Ю. А. Роговский*^а, *С. А. Крутихин*^б,
А. Ю. Мартыновский^б, *С. В. Мотыгин*^б, *А. М. Пилан*^б,
И. К. Седяров^б, *А. Г. Трибендис*^б

^а Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

С 2016 г. инжекционный комплекс ВЭПП-5 снабжает, через канал К-500, электронными и позитронными пучками два коллайдера: ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Инжекционный комплекс продемонстрировал возможность рутинной поддержки работы обоих. Тем не менее продолжается активная работа по улучшению производительности и стабильности установки. В статье представлено описание инжекционного комплекса, опыта его эксплуатации и перспективы.

Since 2016 VEPP-5 injection complex has been supplying VEPP-4M and VEPP-2000 colliders with electrons and positrons through K-500 beam transfer line. By now the injection complex has demonstrated the ability to support the operation of both colliders routinely. Nevertheless, work is continuing to improve stability and performance of the facility. Injection complex design, operation experience and prospects are presented.

PACS: 07.77.Ka; 07.05.Fb; 07.05.Dz

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СОРАН эксплуатируются два коллайдера: ВЭПП-2000 [1] и ВЭПП-4М [2–4], которые соединены с инжекционным комплексом (ИК) ВЭПП-5 [5, 6] транспортным каналом К-500 (рис. 1). В 2016 г. оба коллайдера были переключены на питание от инжекционного комплекса и в течение сезона 2016/2017 г. перешли к набору статистики.

¹E-mail: f.a.emanov@inp.nsk.su

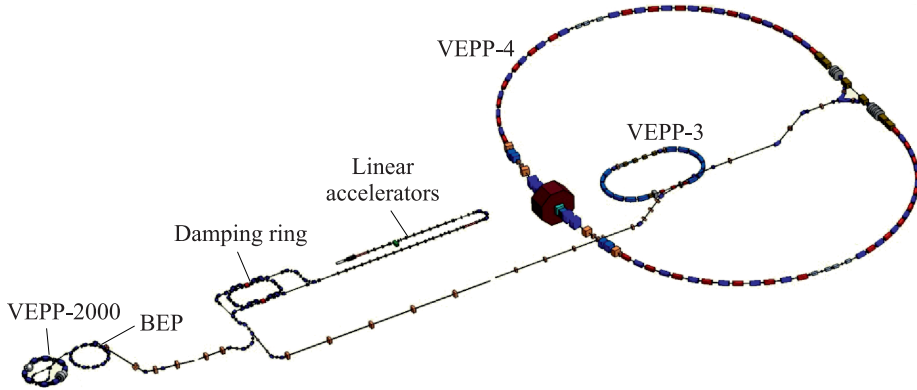


Рис. 1. Схема инжекционного комплекса с коллайдерами

В составе инжекционного комплекса электронный линейный ускоритель на энергию 270 МэВ, позитронный линейный ускоритель на энергию 510 МэВ, инжекционные каналы и накопитель-охладитель (НО). В накопителе-охладителе поочередно накапливаются электронные и позитронные пучки для последующего выпуска в К-500. Для этого применена однооборотная инжекция с предупреждением, т. е. в накопителе установлено по два кикера для каждого вида частиц. Максимальная частота повторения инъекций 50 Гц ограничивается 12,5 Гц из-за недостаточности охлаждения некоторых систем и необходимости усиления радиационной защиты. Достигнутые характеристики ИК приведены в таблице.

Параметры инжекционного комплекса

Параметр	Значение
Энергия (сезон 2016/2017), МэВ	385–420
Скорость накопления электронов, с	$2 \cdot 10^{10}$
Скорость накопления позитронов, с	$2 \cdot 10^9$
Частота повторения инъекций/выпуска, Гц	До 12,5 / до 1
Максимальное число электронов	До $1,2 \cdot 10^{11}$
Максимальное число позитронов	До $1,2 \cdot 10^{11}$

Пучок транспортируется потребителям по транспортному каналу К-500, длина ветвей которого ~ 250 м до ВЭПП-2000 и ~ 120 м до ВЭПП-3. Проектная энергия пучка в транспортных каналах 510 МэВ. К-500 состоит из пяти секций: спуска от накопителя-охладителя в туннель, регулярных FODO-структур в каждую сторону и подъемных частей к каждому из коллайдеров.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Для инжекционного комплекса можно выделить следующие основные технологические процессы: накопление, перепуск пучка, переключение вида частиц и переключение потребителей. Все перечисленные процессы или их подготовительные этапы реализованы путем загрузки режимов для нужного набора подсистем ускорителя.

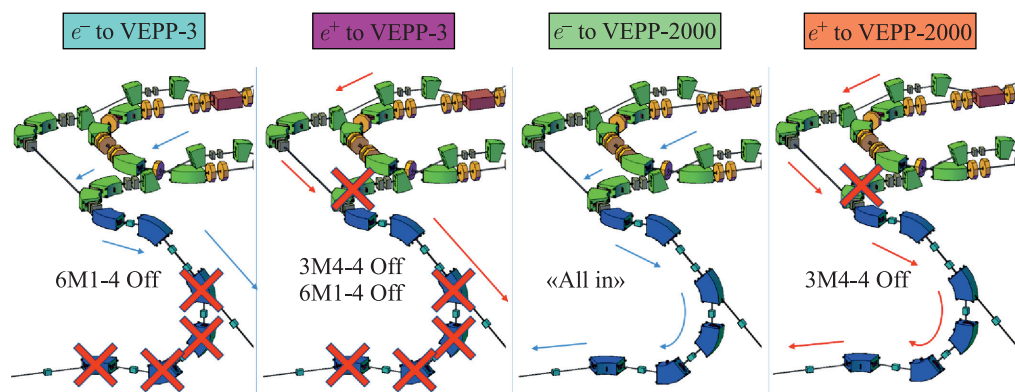


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Состояния К-500

Цикл инжекции-экстракции накопителя-охладителя состоит из нескольких инжекций и одной экстракции накопленного пучка и повторяется до заполнения потребителя. Переключение между накоплением и выпуском осуществляется загрузкой режима для системы кикеров. При этом в режиме для одной пары инфлекторов запуск второй пары замаскирован, т. е. используются четыре рабочих режима для кикеров. Для переключения между электронным и позитронным режимами комплекса требуется загрузить состояние магнитной системы линейных ускорителей, ВЧ-системы линейных ускорителей и им-

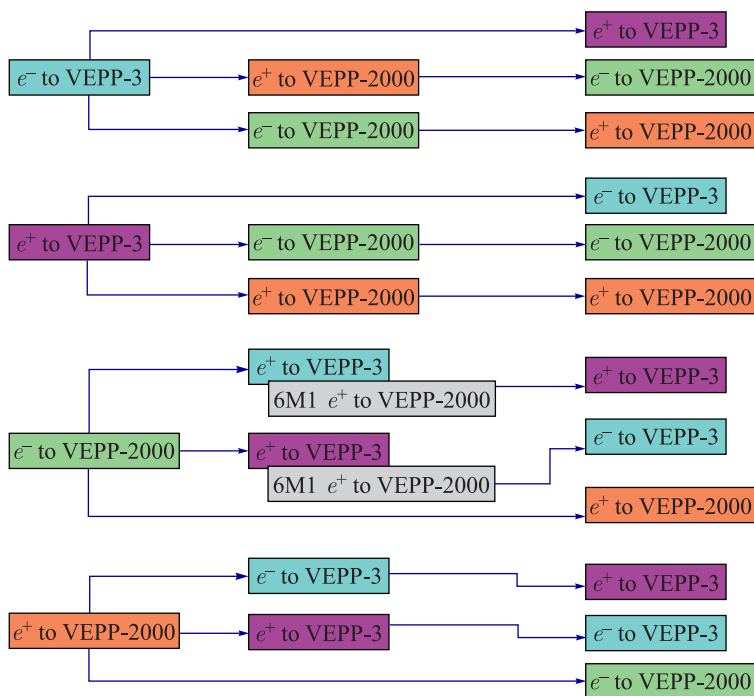


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Схема переходов между состояниями для К-500

пульсного магнита-концентратора, а изменять состояние впускных каналов и накопителя-охлаждителя может не потребоваться. С целью уменьшения времени переключения и упрощения процедуры переключения были подобраны режимы для электронов и позитронов, максимально близкие по энергии пучка в НО. При переходах между этими режимами не требуется менять задания медленных магнитов или магнитов со значительным гистерезисом. Это позволило получить время переключения между накоплением разных частиц около 5 с.

Для канала К-500 существует четыре рабочих режима по числу комбинаций потребителей и частиц (рис. 2). Эти режимы фактически показывают текущее направление работы комплекса, поэтому для них были предложены цветовые обозначения, как показано на рис. 2.

Для переключения между режимами К-500 требуется производить «циклирование» поворотных магнитов для достижения повторяемости магнитного поля. Схема переходов, обеспечивающая повторяемость, приведена на рис. 3. В сезоне 2016/2017 г. циклирование производилось последовательной загрузкой режимов с 30-с задержкой, т.е. время смены режима 30 с на шаг. К настоящему времени в программном обеспечении комплекса появилась возможность загрузки последовательностей значений с автоматическим контролем выполнения. При этом смена режима занимает примерно 26 с на шаг.

Описанные процедуры были реализованы в программном обеспечении инжекционного комплекса, в результате чего были получены приемлемые времена для основных операций и инжекционный комплекс перешел к регулярному снабжению коллайдеров электронными и позитронными пучками без необходимости существенной подстройки.

2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИК

В качестве зарядовой производительности инжекционного комплекса используется ток позитронов в НО, инжектируемый за один выстрел. Производительность по электронам во всех рабочих режимах достаточна для обеспечения работы потребителей, поэтому не рассматривается. Эта величина может существенно меняться в течение смены и зависит как от текущей ситуации на комплексе, так и от подготовки оператора. Для оценки возможностей комплекса были выбраны достигнутые значения, записанные операторами в журнал при нормальных условиях работы. Состояние катода электронной пушки — основной фактор, вызывающий снижение производительности комплекса. На рис. 4 приведено количество электронов на выходе пушки с момента смены катода и накапливаемый за один выстрел ток позитронов за сезон 2016/2017 г. В феврале 2017 г. на ИК вышел из строя корректор, заменить который не представлялось возможным, в результате чего производительность снизилась примерно на 30%. С учетом этого зарядовая производительность падала примерно вдвое медленнее, чем заряд на выходе пушки. Более тонкая и аккуратная настройка инжекционного комплекса в режиме ограниченных возможностей по коррекции траектории пучка в линейном ускорителе позитронов позволила до некоторой степени нивелировать снижение захвата позитронов в НО и завершить экспериментальный сезон с приемлемыми показателями эффективности ИК ВЭПП-5.

Ранее был рассмотрен ряд методов увеличения зарядовой производительности [6], из которых актуальны: перевод накопителя-охлаждителя с ВЧ-станции гармоника № 64 на резонатор первой гармоника с существенным уменьшением напряжения резонатора и его частоты с 700 до 10,94 МГц, а как следствие и упрощением и синхронизацией данной

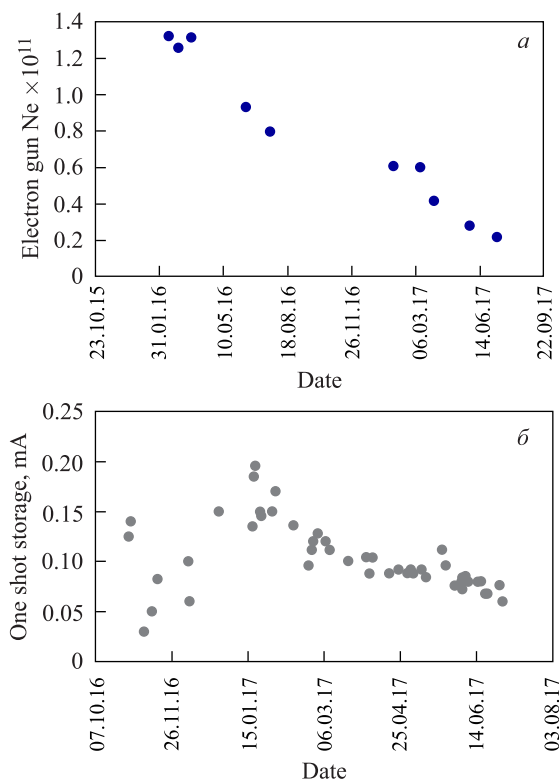


Рис. 4. Количество электронов на выходе пушки (а) и ток на выходе (б)

подсистемы ИК; удлинение импульса или увеличение тока пушки; повышение энергии линейного ускорителя позитронов до проектной; повышение частоты повторения линейных ускорителей. Был изготовлен и установлен на накопитель-охладитель резонатор первой гармоники. Резонатор 64-й гармоники с частотой 700 МГц с полупроводниковым усилителем на 20 кВт, установленный на накопителе-охладителе, позволял получать амплитуду напряжения резонатора около 300 кВ и обеспечивал ширину сепаратрисы $\delta E/E = \pm 0,7\%$. Установленный резонатор первой гармоники обеспечивает напряжение до 9,5 кВ, соответственно ширина сепаратрисы $\delta E/E = \pm 1,2\%$. Энергетический разброс позитронного пучка на выходе линейного ускорителя около $\pm 3\%$. Ожидается, что переход на резонатор первой гармоники улучшит эффективность захвата позитронов в накопитель-охладитель примерно в 1,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рабочем сезоне 2016/2017 г. инжекционный комплекс ВЭПП-5 перешел к регулярному снабжению коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М электронными и позитронными пучками. Достигнуты времена переключения между частицами и потребителями и зарядовая производительность инжекционного комплекса, достаточные для работы коллайдеров на полную светимость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080) с использованием уникальной научной установки «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000», получившей финансовую поддержку государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov P., Belikov O., Berkaev D., Gorchakov K., Kasaev A., Kirpotin A., Koop I., Krasnov A., Lysenko A., Motygin S., Prosvetov V., Rabusov D., Semenov A., Shatunov Yu., Timoshenko M., Zemlyansky I., Zharinov Yu., Shwartz D., Perevedentsev E., Rogovsky Yu., Senchenko A.* High Luminosity at VEPP-2000 Collider with New Injector // Proc. of IPAC'17, Copenhagen, 2017.
2. *Levichev E. B.* Status and Upgrade of the VEPP-4 Storage-Ring Facility // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 876–883.
3. *Piminova P. A., Baranov G. N., Bogomyagko A. V., Berkaev D. E., Borin V. M., Dorokhov V. L., Karnaev S. E., Kiselev V. A., Levichev E. B., Meshkov O. I., Mishnev S. I., Nikitin S. A., Nikolaev I. B., Sinyatkin S. V., Vobly P. D., Zolotarev K. V., Zhuravlev A. N.* Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19–26.
4. *Piminov P. A.* Status of the Electron–Positron Collider VEPP-4 // Proc. of IPAC'17, Copenhagen, 2017.
5. *Berkaev D., Andrianov A., Astrelina K., Balakin V., Batrakov A., Belikov O., Blinov M., Bolkhovityanov D., Butakov A., Bykov E., Dikansky N., Emanov F., Frolov A., Gambaryan V., Gorchakov K., Gusev E., Karnaev S., Karpov G., Kasaev A., Kenzbulatov E., Kiselev V., Klushev S., Kondakov A., Koop I., Korenev I., Kot N., Kozak V., Krasnov A., Krutikhin S., Kuptsov I., Kurkin G., Lebedev N., Levichev A., Logatchov P., Maltseva Yu., Mikailov A., Murasev A., Muslivets V., Nikiforov D., Novikov An., Ottmar A., Pavlenko A., Pivovarov I., Rashchenko V., Rogovsky Yu., Samoiloov S., Sazonov N., Semenov A., Shwartz D., Skrinsky A., Starostenko A., Starostenko D., Tribendis A., Tsyganov A., Vasichev S., Vasiliev S., Yudin V., Zemlyansky I., Zhuravlev A.* VEPP-5 Injection Complex: Two Colliders Operation Experience // Ibid.
6. *Emanov F., Andrianov A., Astrelina K., Balakin V. V., Barnyakov A., Belikov O. V., Berkaev D. E., Blinov M., Boimelshtain Yu. M., Bolkhovityanov D., Chupyra A. G., Dikansky N. S., Frolov A. R., Gusev Ye. A., Karpov G., Kasaev A., Kokoulin V., Kondakov A. A., Koop I., Kuptsov I., Kurkin G. Ya., Lapik R., Lebedev N., Levichev A., Logatchov P., Maltseva Yu., Martyshkin P., Murasev A., Nikiforov D., Pavlenko A. V., Pavlov V., Petrenko A., Podlevskih V., Rashchenko V., Samoylov S., Shiyankov S., Skrinsky A., Starostenko A., Sukhanov D. P., Tribendis A. G., Tsyganov A. S., Vasiliev S., Yudin V., Zemlyansky I., Rogovsky Yu., Novohatsky A., Romanov A. L.* Feeding BINP Colliders with the New VEPP-5 Injection Complex // Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, 2016.