

## ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-5

*Ф. А. Еманов<sup>а, 1</sup>, К. В. Астрелина<sup>б</sup>, В. В. Балакин<sup>в</sup>, О. В. Беликов<sup>б</sup>,  
Д. Е. Беркаев<sup>б</sup>, Ю. М. Боймелштейн<sup>б</sup>, Д. Ю. Болховитянов<sup>б</sup>,  
А. Р. Фролов<sup>б</sup>, Г. В. Карпов<sup>б</sup>, А. С. Касаев<sup>б</sup>, А. А. Кондаков<sup>б</sup>,  
Г. Я. Куркин<sup>б</sup>, Р. М. Лапик<sup>б</sup>, Н. Н. Лебедев<sup>б</sup>, А. Е. Левичев<sup>б</sup>,  
Ю. И. Мальцева<sup>б</sup>, А. А. Мурасев<sup>б</sup>, С. Л. Самойлов<sup>б</sup>, С. В. Васильев<sup>б</sup>,  
А. Ю. Мартыновский<sup>б</sup>, С. В. Мотыгин<sup>б</sup>, А. М. Пилан<sup>б</sup>,  
А. Г. Трибендис<sup>б</sup>, А. В. Павленко<sup>б</sup>, Е. С. Котов<sup>б</sup>, М. В. Арсентьева<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

<sup>в</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 — это источник интенсивных электронных и позитронных пучков, который снабжает ускорительные комплексы ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 через транспортный канал К-500. Инжекционный комплекс находится в регулярной эксплуатации. Также продолжается активная работа по улучшению производительности и стабильности установки, рассматриваются возможности работы с перспективными потребителями пучка. В статье представлено описание инжекционного комплекса и опыта его эксплуатации, рассмотрены последние улучшения.

The VEPP-5 injection complex is a source of intense electron and positron beams, which supplies the VEPP-4M and VEPP-2000 accelerator complexes through the K-500 transport channel. The injection complex is in regular operation. Also, active work is going on to improve the performance and stability of the facility, possible ways of working with perspective beam users are being considered. The paper presents a description of the injection complex and the experience of its operation, the latest improvements are considered.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 [1, 2] служит источником электронных и позитронных пучков для двух действующих ускорительных комплексов ВЭПП-2000 [3] и ВЭПП-4 [4, 5], с которыми он соединен транспортным каналом К-500 (рисунок). Рассматривается и работа с перспективными потребителями, например, с  $\mu\mu$ -троном [6].

---

<sup>1</sup>E-mail: f.a.emanov@inp.nsk.su

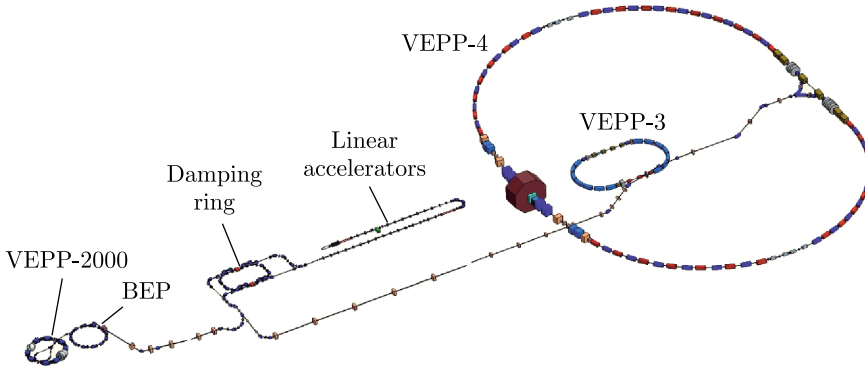


Схема инжекционного комплекса с потребителями пучка

В составе инжекционного комплекса — линейные ускорители электронов и позитронов на энергию 270 и 430 МэВ, накопитель-охладитель (НО) и соединяющие их транспортные каналы.

Линейные ускорители состоят из четырех модулей, в которых суммарно 14 ускоряющих структур с постоянным импедансом типа круглого диафрагмированного волновода, работающих на частоте 2855,5 МГц [7]. Каждый ускоряющий модуль питается от клистрона 5045 производства SLAC. НО рассчитан на максимальную энергию 510 МэВ, имеет периметр 27,4 м, времена радиационного затухания на максимальной энергии составляют 18/11/12 мс ( $v$ ,  $h$ ,  $s$ ). На НО работает резонатор первой гармоники 10,94 МГц [8]. Инжекция из линейных ускорителей в НО осуществляется с частотой до 12,5 Гц, перепуск к потребителям возможен с частотой до 2 Гц, в настоящее время происходит раз в 3 с из-за ограничений впускных систем со стороны бустера комплекса ВЭПП-2000. Достигнутые скорости накопления электронов и позитронов:  $1,1 \cdot 10^{11} e^-/с$  и  $1,2 \cdot 10^{10} e^+/с$ .

Выпущенный пучок транспортируется к потребителям по каналу К-500, длина ветвей которого  $\sim 250$  м до БЭП и  $\sim 120$  м до ВЭПП-3. Проектная энергия пучка в транспортных каналах: 510 МэВ. К-500 состоит из пяти секций: спуск от накопителя-охладителя в туннель, регулярные структуры FODO в каждую сторону и подъемные части к каждому из потребителей пучка. К настоящему моменту достигнута эффективность перепуска около 50% по обоим направлениям, ведутся работы по улучшению эффективности и стабильности перепуска.

## 1. РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программное обеспечение комплекса построено на основе модульного фреймворка СХv4 [9]. Изначально этот фреймворк служил для абстракции оборудования ускорителя, но к настоящему времени сложилась практика использования СХ-серверов для обмена данными между программами на клиентском уровне. То есть СХv4 служит в качестве общей программной шины, благодаря чему сильно упрощаются связи между программами. На инжекционном комплексе используется централизованная загрузка/сохранение состояний установки, для чего была необходима конфигураци-

онная база данных (БД), содержащая структурированную информацию о подсистемах и устройствах. Загрузчик состояний служит основой для автоматики, которая реализует цикл накопления-выпуска и переключение между потребителями или видами частиц [10]. Для работы автоматического программного обеспечения сразу же потребовалось обмениваться данными с системами управления потребителей пучка. Ситуация осложняется тем, что системы управления инжекционного комплекса и потребителей пучка изначально развивались независимо, и в результате в них используется разное базовое программное обеспечение. Со стороны ВЭПП-4 — EPICS, на ВЭПП-2000 — VCAS и TANGO. Ранее необходимые для автоматики данные передавались при помощи программ-шлюзов с использованием общей сети института. Остальные данные, например, диагностическая информация канала К-500, не передавались, а вместо этого была принята практика удаленного запуска клиентских программ.

Для улучшения взаимодействия с потребителями пучка для CXv4 были разработаны клиентские модули для VCAS, EPICS, TANGO и серверный модуль EPICS. Клиентские модули дают возможность средствами клиентских библиотек CX получать доступ к данным из стороннего ПО, а серверный модуль позволяет CX-серверу отвечать по протоколу другого фреймворка. Также для CXv4 был реализован драйвер для зеркалирования данных устройства или отдельных каналов. Такой набор средств позволяет создавать очень гибкие «шлюзы» между всеми имеющимися установками. Конфигурационная БД комплекса дополнена и средствами автоматизации конфигурирования CXv4, благодаря чему значительно упростилось создание программных устройств и настройка шлюзов. Обмен данными между системами управления к настоящему времени выведен в отдельную сеть, и ведутся работы по постепенному отказу от удаленного запуска приложений через институтскую сеть.

В настоящий момент конфигурационная БД применяется и в качестве источника данных для прикладных программ. Например, программные инструменты управления накопителем-охладителем [11] используют описанную выше архитектуру с CX-серверами в качестве общей программной шины и пользуются конфигурационной БД для выбора задействованных в измерении матрицы откликов элементов магнитной системы. В наборе реализована полуавтоматическая итерационная коррекция орбиты в накопителе.

## **2. РАБОТА В СЕЗОНЕ 2021/2022 гг.**

С начала сезона 2019/2020 гг. в электронной пушке комплекса работает новая катодная сборка с максимальным током 10 А. Ранее использовался узел с максимальным током 4 А, срок службы которого в условиях инжекционного комплекса составлял около двух лет. В первом сезоне с новой катодной сборкой проведено изучение возможности работы с большим током и длительностью пучка, в итоге значительных улучшений характеристик комплекса для потребителей получено не было. После этого пушка была настроена на длительность импульса 5 нс и ток  $\sim 5$  А, и некоторое падение тока пушки наблюдается со временем и корректируется постепенным повышением накала катода.

В сезоне 2020/2021 гг. были проведены работы по более аккуратной настройке фаз ускоряющих структур, в результате комплекс был переведен на энергию 430 МэВ.

В 2021/2022 гг. работа на этой энергии была продолжена. Во второй половине сезона стабильность энергии линейных ускорителей значительно ухудшилась, что сказалось и на эффективности инъекции. Это было вызвано нестабильной работой цепей запуска тиратронов в третьем модуляторе, что устранить в течение сезона оказалось невозможно, поэтому было решено во время летней остановки провести обновление силовой части модулятора. В последний месяц сезона вышел из работы первый клистрон, которому потребовался серьезный ремонт. Изучение ситуации при этом показало, что для электронов доступна работа на энергии 395 МэВ, что позволило провести запланированную на конец сезона работу с синхротронным излучением на ВЭПП-4.

### 3. ВОЗМОЖНОСТЬ РАБОТЫ С КОРОТКИМИ СГУСТКАМИ

В текущей конфигурации инжекционный комплекс производит пучки с продольной длительностью около 5 нс. Это слишком много для проектируемого коллайдера с 350-МГц ВЧ-станцией, поэтому изучаются возможности формирования более коротких сгустков. Ранее продольное движение частиц в НО с учетом коллективных эффектов было изучено экспериментально, и была создана модель, хорошо описывающая наблюдаемые результаты [12]. Для формирования коротких сгустков можно установить на НО резонатор в 32 гармоники частоты обращения. Так как параметры подобного резонатора хорошо известны, он был добавлен в имеющуюся модель продольного движения, на которой удастся получить перегруппировку пучка без потерь при относительно плавном включении резонатора в 32 гармоники.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжекционный комплекс продолжает работу по обеспечению пучками установок ИЯФ. Показана возможность работы в электронном режиме на энергии 395 МэВ без одного ускоряющего модуля. Продолжаются работы по автоматизации, улучшению надежности, увеличению производительности инжекционного комплекса. Продолжается изучение возможности работы с перспективными потребителями пучка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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., Vasichiev S., Vasiliev S., Yudin V., Zemlyansky I., Zhuravlev A.* VEPP-5 Injection Complex: Two Colliders Operation Experience // Proc. of the 8th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2017), Copenhagen, May 14–19, 2017.
2. *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., Nikiiforov D., Pavlenko A. V., Pavlov V., Petrenko A., Podlevskiy V., Rashchenko V., Samoylov S., Shiyankov S., Skrinisky 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 the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016.
3. 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 the 8th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2017), Copenhagen, May 14–19, 2017.
  4. 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.
  5. Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagko A. V., Berkaev D. E., Borin V. M., Dorokhov V. L., Karnaeв 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. Procedia. 2016. V. 84. P. 19–26.
  6. Богомяков А. В., Дружинин В. П., Левичев Е. Б., Мильштейн А. И., Сияяткин С. В. Концепция электрон-позитронного коллайдера для рождения и исследования связанного состояния ( $\mu^+\mu^-$ ) // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 654–660.
  7. Подлевских В. В. Ускоряющая секция и СВЧ-нагрузка для форинжектора ВЭПП-5. Дис. . . канд. техн. наук. Новосибирск, 2003.
  8. Астрелина К., Блинов М., Боймелштейн Ю., Болховитянов Д., Борин В., Бутаков А., Васильев С., Еманов Ф., Карпов Г., Касаев А., Кондаков А., Кооп И., Кот Н., Куркин Г., Лапик Р., Лебедев Н., Левичев А., Мальцева Ю., Мартыновский А., Мартышкин П., Мешков О., Мотыгин С., Мурасев А., Мусливец В., Никифоров Д., Пилан А., Роговский Ю., Самойлов С., Трибендис А., Фролов А., Цыганов А. Инжекционный комплекс ВЭПП-5: статус и перспективы // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 367–373.
  9. Bolkhovityanov D. Yu., Cheblakov P. B., Emanov F. A. CXv4, a Modular Control System // 15th Intern. Conf. on Accelerator and Large Exp. Phys. Control Systems (ICALEPCS 2015), Melbourne, Australia, Oct. 17–23, 2015.
  10. Еманов Ф. А., Беркаев Д. Е., Болховитянов Д. Ю. Программное обеспечение системы управления инжекционного комплекса ВЭПП-5 // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 949–952.
  11. Балакин В., Астрелина К., Беркаев Д., Еманов Ф., Роговский Ф. Разработка инструментов контроля и управления параметрами накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 с новой электроникой датчиков положения пучка // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 589–594.
  12. Балакин В., Астрелина К., Петренко А., Беркаев Д., Еманов Ф., Мешков О., Борин В. Изучение коллективных эффектов пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 // Там же. С. 374–379.