

## СТАТУС ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

*Ф. А. Еманов<sup>а, 1</sup>, К. В. Астрелина<sup>б</sup>, В. В. Балакин<sup>в</sup>, Д. Е. Беркаев<sup>б</sup>,  
Ю. М. Боймельштейн<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>, Н. Н. Лебедев<sup>б</sup>, А. Е. Левичев<sup>б</sup>,  
С. Л. Самойлов<sup>б</sup>, Р. З. Мамутов<sup>г</sup>, Г. Н. Баранов<sup>г</sup>, А. И. Михайлов<sup>б</sup>,  
С. В. Тамбовцев<sup>б</sup>*

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

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

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

<sup>г</sup> Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»,  
Кольцово, Россия

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 служит источником электронных и позитронных пучков для комплексов ВЭПП-2000, ВЭПП-4 и рассматривается как инжектор для проекта будущего коллайдера. Производительность комплекса достаточна для действующих потребителей, но ее необходимо улучшить для работы с перспективными установками. На инжекционном комплексе ведутся работы по улучшению стабильности работы и удобства использования. В работе описаны текущие достижения и планируемые улучшения инжекционного комплекса.

The VEPP-5 injection complex serves as a source of electron and positron beams for the VEPP-2000 and VEPP-4 complexes and is considered as an injector for the future collider project. The performance of the complex is sufficient for existing consumers, but needs to be improved to work with future installations. Work is underway to improve the stability of operation and ease of use. The paper describes the current achievements and planned improvements of the injection complex.

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

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 (ИК) [1] — это источник электронных и позитронных пучков для коллайдеров. ИК состоит из электронного и позитронного линейных ускорителей, накопителя-охладителя (НО) и каналов транспортировки пучка. Канал К-500 соединяет НО с комплексами ВЭПП-2000 [2] и ВЭПП-4 [3] (рис. 1).

Основа линейных ускорителей — 14 ускоряющих структур на бегущей волне типа круглый диафрагмированный волновод, работающих на частоте 2855,5 МГц [4] и запитанных от четырех клистронов SLAC 5045 с использованием умножителей

---

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

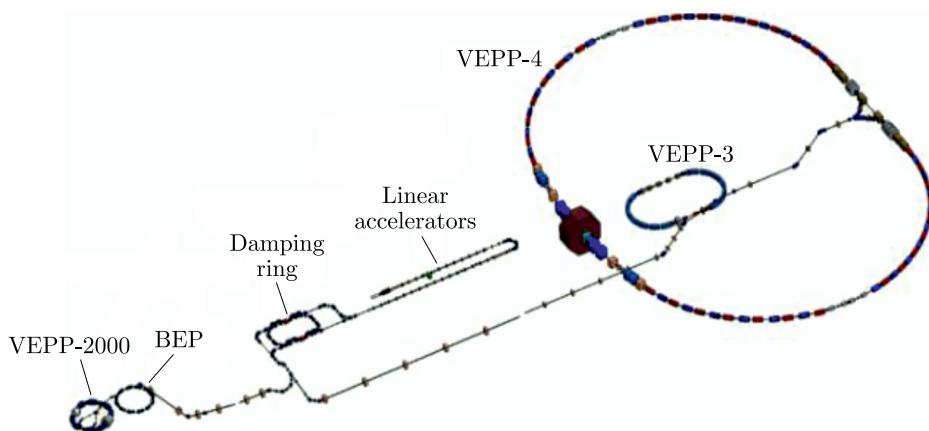


Рис. 1. Схема инжекционного комплекса и ВЭПП-4М/ВЭПП-2000

мощности типа SLED. Электронный линейный ускоритель производит пучок с энергией около 270 МэВ, который попадает на конверсионную мишень или обходит ее. Позитронный линейный ускоритель ускоряет частицы до энергии 430 МэВ. Далее пучки инжектируются в НО, который рассчитан на энергию до 510 МэВ и имеет периметр 27,4 м. Времена радиационного затухания в НО на максимальной энергии — 18/11/12 мс ( $v$ ,  $h$ ,  $s$ ). На НО установлен ВЧ-резонатор первой гармоники 10,94 МГц, что позволяет принимать достаточно длинный пучок. Инжекция в накопитель возможна с частотой до 12,5 Гц, перепуск к потребителям возможен с частотой до 2 Гц. Достигнутые скорости накопления частиц в НО —  $1,1 \cdot 10^{11} e^-/с$  и  $1,2 \cdot 10^{10} e^+/с$  при частоте повторения инъекций 12,5 Гц. Имеющийся набор оборудования позволяет переключать вид частиц за 26 с и переходить между потребителями за 52 с. Максимальная эффективность перепуска, которая наблюдалась, в направлении ВЭПП-2000  $\sim 90\%$ , а на ВЭПП-4 — 60%. Достигнутые параметры ИК достаточны для текущих потребителей, и обычно средняя производительность ограничивается их возможностями. Для работы с перспективными коллайдерами требуется существенно увеличить производительность комплекса. Поэтому проводятся работы по улучшению надежности, стабильности и удобства использования инжекционного комплекса, а также проектируются изменения для улучшения производительности.

### ИЗУЧЕНИЕ ИМПЕДАНСА СВЯЗИ НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ

Во время проектирования ИК была проведена оценка импеданса связи накопителя-охлаждителя с резонатором 64-й гармоники, результат которой около 1 Ом. С резонатором первой гармоники был измерен импеданс связи НО: действительная часть импеданса ( $(15,68 \pm 0,47)$  Ом) и мнимая ( $(6,15 \pm 0,18)$  Ом) [5]. Также было замечено, что характерное время перегруппировки пучка линейного ускорителя, состоящего из 16 сгустков, после инъекции в накопитель составляет 270 мкс ( $\sim 3000$  оборотов), что значительно меньше времени радиационного затухания (18 мс). Для поиска ис-

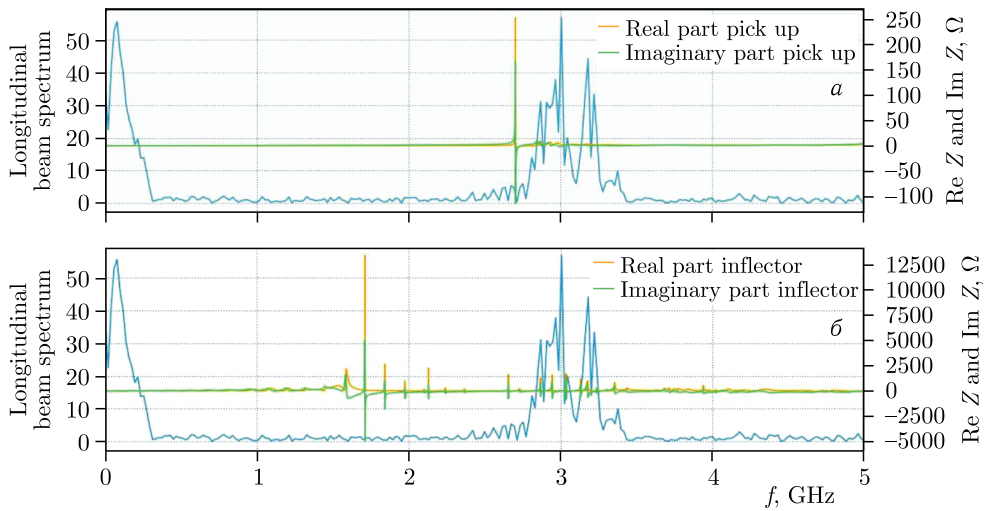


Рис. 2. Спектр инжектируемого пучка на 10-м обороте и импеданс датчика положения пучка (а) и инфлектора (б)

точника импеданса были созданы модели элементов-кандидатов в CST MICROWAVE STUDIO: датчика положения пучка и инфлектора (рис. 2).

На рис. 2 видно, что пучок будет возбуждать wake-поля за счет взаимодействия с импедансом инфлектора на частотах, близких к 3 ГГц. Также небольшой вклад будет вносить и датчик положения пучка. Этот эксперимент подтверждает высказанное в [5] предположение, что инжектируемый из линейного ускорителя пучок подвергается действию микроволновой неустойчивости, которая приводит к быстрой перегруппировке в один сгусток. Спектр же перегруппированного пучка претерпевает значительные изменения и не несет частот выше 0,5 ГГц, поэтому он практически не взаимодействует с инфлектором и дальнейшего развития микроволновой неустойчивости не происходит.

## КОРРЕКЦИЯ ОПТИКИ НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ

При проектировании НО проводилась оптимизация его оптической структуры с целью получения максимальной динамической апертуры, и были выбраны бетатронные частоты 4,78/2,86 ( $\nu_x/\nu_z$ ). При первых запусках ИК методом матриц отклика была выполнена калибровка модели накопителя-охладителя [6] и получен рабочий режим с бетатронными частотами, близкими к проектным. Далее, НО претерпел значительные изменения, а энергия пучка в нем была повышена с 380 до 430 МэВ. Для нового состояния ускорителя калибровка модели не проводилась и был подобран рабочий режим с бетатронными частотами 4,45/2,72 ( $\nu_x/\nu_z$ ), в котором удалось настроить достаточно хорошие скорости накопления электронов и позитронов и выпуск всего пучка из накопителя, поэтому он используется в работе с потребителями. Однако наличие калиброванной модели ускорителя позволяет получать начальные условия для расчета оптики канала К-500, задавать локальные искажения орбиты и, опира-

ясь на это, более точно настраивать выпуск пучка в накопитель и выпуск из него. В свою очередь, переход к проектным бетатронным частотам, возможно, уменьшит потери пучка при инжекции. Поэтому в ускорительном сезоне 2023/2024 начались работы по калибровке модели накопителя-охладителя и приведению его структурных функций к проектным.

Для этого в оптической модели НО был подобран режим с бетатронными частотами, близкими к проектным  $4,79/2,86$  ( $\nu_x/\nu_z$ ). Далее в несколько итераций из существующего рабочего режима НО был осуществлен переход к этим частотам с помощью анализа замкнутой орбиты пучка (метод матриц откликов), и выполнена калибровка оптической модели ускорителя. В итоге получен рабочий режим накопителя-охладителя с бетатронными частотами  $4,77/2,846$  ( $\nu_x/\nu_z$ ). В этом режиме была выполнена коррекция орбиты с целью минимизации отклонений положения пучка. В рамках доступного для экспериментов времени получить выпуск пучка в К-500 не удалось, поэтому полученные режимы еще не внедрены в регулярное использование.

## ВАРИАНТЫ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИК

Ранее были проведены оценки способов увеличения заряда позитронов, добавляемого в НО за одну инжекцию [1]. Установка дебанчера-монокроматора в позитронный выпускной канал НО может увеличить захватываемый заряд позитронного пучка примерно в 1,4 раза, что было показано при помощи моделирования в ELEGANT. Если увеличить энергию электронного линейного ускорителя, добавив две ускоряющие структуры со средним темпом ускорения 18 МэВ/м, то выход позитронов из мишени возрастет в 1,3 раза. На позитронном линейном ускорителе можно расположить дополнительные квадрупольные магниты, так что его акцептанс увеличится в 2 раза, что может позволить захватывать в 1,5–2 раза больше позитронов. В текущей ситуации из электронной пушки в линейный ускоритель захватывается около 50 % электронов. Применение группирователя-предускорителя, аналогичного разработанному для СКИФ [7], позволяет улучшить захват электронов в ускорение до 90 % и увеличивает энергию на 15 МэВ, что позволяет увеличить количество производимых позитронов примерно в 1,88 раза. Сейчас на ИК эксплуатируется поврежденный позитронный соленоид, авария на котором привела к уменьшению числа захватываемых позитронов за выстрел примерно в 3 раза. В настоящий момент проектируется новый соленоид, но точно оценить результат его внедрения сложно, поэтому для оценки производительности используется наблюдавшееся с исправным соленоидом значение захвата позитронов в НО. При успешном внедрении перечисленных улучшений захват позитронов в НО может увеличиться до  $0,8 \cdot 10^{10} e^+$  за одну инжекцию.

На производительность ИК существенно влияют его рабочие циклы. В используемом цикле накопления-выпуска для позитронов на накопление занимает 3,8 с, а на выпуск и изменение режимов инфлекторов уходит 1 с, т. е. эффективность цикла около 80 %. Переход между электронным и позитронным режимами занимает 26 с — это почти половина времени в самом тяжелом для ИК цикле работы с ВЭПП-2000. При работе с проектируемым коллайдером такие задержки неприемлемы, поэтому будет необходимо их устранить.

## РАБОТА В СЕЗОНЕ 2023/2024

Сезон 2023/2024 длился с 9 сентября по 30 июня. В течение этого времени на ИК не было крупных поломок или аварий, однако модулятор клистрона первого ускоряющего модуля значительную часть сезона работал нестабильно, из-за чего регулярно возникали кратковременные перерывы в работе комплекса. На протяжении сезона удалось поддерживать количество перепускаемых к потребителям позитронов, при этом выпускаемый ток электронного пучка значительно изменялся. Последнее, скорее всего, связано с тем, сколько внимания уделяли операторы позитронным режимам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжекционный комплекс находится в стадии рутинной работы по обеспечению пучков заряженных частиц коллайдеров ИЯФ СО РАН — ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М и полностью покрывает их потребности. Продолжаются работы по улучшению стабильности комплекса, удобства его использования. Также начато проектирование изменений для улучшения производительности инжекционного комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Astrelina K. V. et al.* Production of Intense Positron Beams at the VEPP-5 Injection Complex // JETP. 2008. V. 106. P. 94–114.
2. *Timoshenko M. V., Borin V. M., Zharinov Yu. M. et al.* Status of VEPP-2000 BINP Electron–Positron Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 4. P. 419–424.
3. *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.
4. *Подлевских В. В.* Ускоряющая секция и СВЧ-нагрузка для форинжектора ВЭПП-5. Дис. . . канд. техн. наук. Новосибирск, 2003.
5. *Balakin V. V., Berkaev D. E., Emanov F. A.* A Study of the Collective Beam Instabilities in the Damping Ring of the VEPP-5 Injection Complex // Instrum. Exp. Techn. 2022. No. 65. P. 878–886.
6. *Петренко А. В.* Калибровка электронно-оптической модели накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 // ПТЭ. 2011. Вып. 1.
7. *Andrianov A. et al.* Development of 200 MeV Linac for the SKIF Light Source Injector // J. Instrum. 2022. V. 17. P. T02009.

Получено 28 октября 2024 г.