

СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ИЯФ

*А. А. Старостенко¹, П. В. Логачев, О. И. Мешков, Д. А. Никифоров,
А. В. Андрианов, А. Е. Левичев, Ф. А. Еманов, К. В. Астрелина,
М. Ф. Блинов, А. С. Цыганов, Д. Е. Беркаев, И. А. Кооп,
Д. Ю. Болховитянов, В. Л. Дорохов*

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

В статье приведено описание основных систем инжекционного комплекса ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН. Описана система инжекции и экстракции пучков электронов и позитронов. Приведены результаты измерения длины сгустков в линейном ускорителе электронов, а также в накопителе-охладителе с помощью стрик-камеры. Описана разработка узлов перспективной позитронной конверсионной системы на основе жидкосвинцовой мишени.

This article presents basic systems of the injection complex VEPP-5 (BINP, Novosibirsk). The article contains the description of the injection/extraction systems and the results of bunch length measurements by a streak-camera. The development of parts of the perspective positron conversion system based on a liquid lead target has been also described.

PACS: 29.20.-c; 29.20.Ej

СОСТАВ И ОПИСАНИЕ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 — это интенсивный источник электронных и позитронных сгустков с энергией до 510 МэВ, с запасом обеспечивающий все потребности работающих и строящихся в ИЯФ СО РАН установок на встречных электрон-позитронных пучках. Комплекс состоит из линейного ускорителя электронов на энергию 270 МэВ, линейного ускорителя позитронов на 500 МэВ, а также накопителя-охладителя с каналами впуска и выпуска пучков на комплекс ВЭПП-3/ВЭПП-4М и коллайдер ВЭПП-2000. Электронная пушка (200 кВ) с термокатодом обеспечивает импульс тока шириной на полувысоте около 3,5 нс с числом частиц до 10^{11} . ВЧ-система линейных ускорителей включает в себя 14 ускоряющих секций с рабочей частотой 2856 МГц, четыре системы умножения мощности типа SLED и четыре клистрона SLAC 5045 с максимальной мощностью до 60 МВт (рис. 1).

¹E-mail: astar@inp.nsk.su

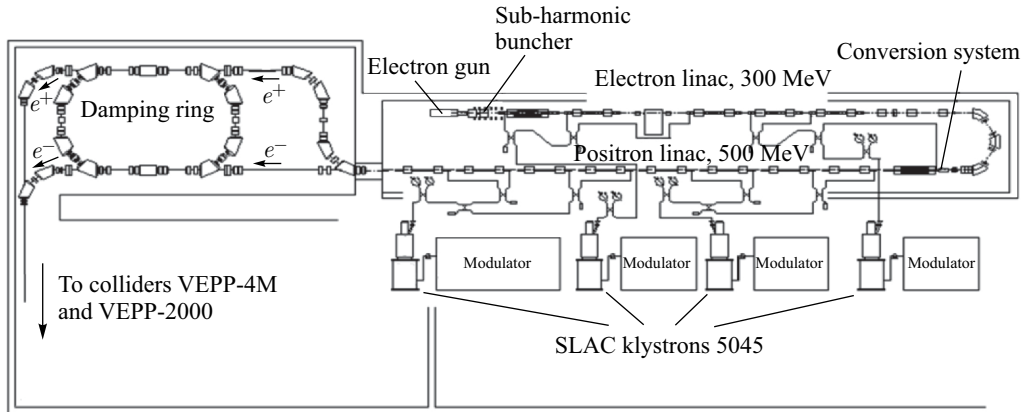


Рис. 1. Схема инжекционного комплекса

На линейных ускорителях используются следующие диагностические устройства: резистивный датчик для измерения тока пушки, 14 полосковых пикап-электродов для измерения положения пучка, 5 вторично-эмиссионных сеточных датчиков, 2 секционированных цилиндра Фарадея, 3 цилиндра Фарадея, 6 люминофорных датчиков, пучковый датчик и стрик-камера.

Для работы с датчиками положения пучка была разработана и внедряется новая электроника [1], которая позволяет измерять положение пучка с точностью 20–30 мкм для ступков с количеством частиц 10^8 и около 3 мкм для 10^{10} (таким образом, электроника пригодна для работы и с электронами, и с позитронами).

КОНВЕРСИОННАЯ СИСТЕМА

Ступки электронов с энергией 270 МэВ фокусируются на танталовую конверсионную мишень в пятно диаметром 1 мм. Толщина мишени по ходу пучка равна 2,5 радиационных длины, что обеспечивает максимальный выход позитронов при данной энергии электронного пучка. Позитронная система, помимо самой мишени, включает в себя импульсный магнит-концентратор потока, систему соленоидов, формирующих постоянное магнитное поле, и ускоряющую позитроны структуру. Импульсный магнит выполняет функцию согласования фазового объема выходящего из мишени позитронного ступка с акцептансом ускоряющей структуры.

НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ

Накопитель-охладитель ВЭПП-5 (НО) представляет собой накопительное кольцо с периметром 27,4 м, соответственно, частота обращения пучка — 10,93 МГц. Радиус траектории пучка в поворотном магните равен 112 см. На НО используется однооборотная инжекция с предупредом. Система впуска-выпуска состоит из 4 кикеров (рис. 2) и их высоковольтных генераторов. К настоящему времени система может надежно работать с частотой повторения до 25 Гц [2].

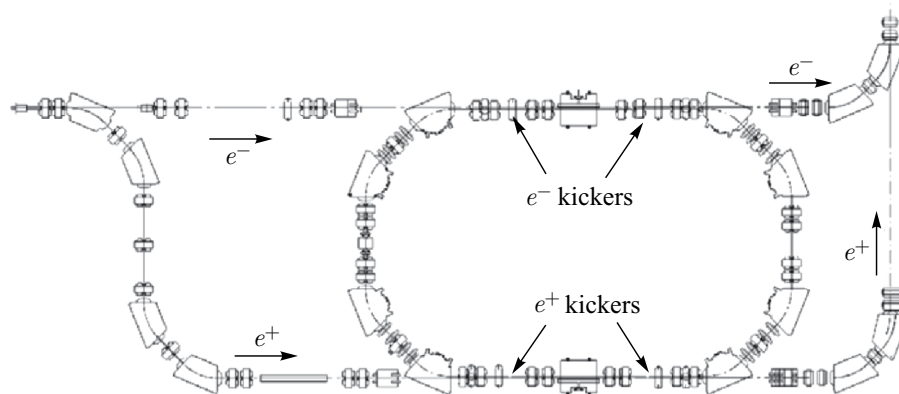


Рис. 2. Расположение кикеров на накопителе-охладителе

Для работы с комплексами ВЭПП-3/ВЭПП-4 и ВЭПП-2000 требуется выпускать накопленный пучок каждые 30 с, за это время нужно перенастроить комплекс на другой вид частиц, накопить пучок и выполнить подготовку к выпуску. Следовательно, для увеличения зарядовой производительности комплекса необходимо сделать минимальными затраты времени на смену режимов и накладные расходы системы управления. Для этого в генераторе запускающих импульсов комплекса была реализована возможность работы по счетчику с событийно ориентированным управлением и была программно автоматизирована смена режимов установки. Также был создан программный автомат, реализующий цикл инжекции-экстракции. Автомат позволяет выполнить по отдельности любой из этапов цикла (подготовка к накоплению нужного вида частиц, накопление, подготовка к экстракции и экстракция), запустить единичный или многократный проход всей последовательности этапов.

Для накопления пучка генератор запусков комплекса программируется на необходимое число выстрелов пучка и запускается. После выполнения запуски останавливаются и генерируется событие остановки, которое распространяется на уровень программных систем управления (рис. 3).

При этом запуски каналов, связанных с ВЧ-системой, генерируются постоянно, чтобы во время подготовительных этапов не менялся тепловой режим ВЧ-системы.

В качестве источника запускающего сигнала для экстракции могут быть использованы как собственный генератор (для тестовых запусков), так и система сведения частот и фаз для перепуска пучка потребителю. Для экстракции выбирается источник запусков при помощи переключателя каналов и разрешается однократный пропуск импульса у блока задержек экстракции. После пропуск одного импульса блок переходит в режим ожидания и распространяет программное событие «экстракция выполнена» [3].

Этапы подготовки к инжекции или экстракции нужного вида частиц представляют собой смену режима установки. Так как их следует выполнять максимально быстро, необходимо избегать изменений, требующих значительного времени или неявно меняющих режим установки. Поэтому желательно использовать один и тот же режим магнитной системы для накопления и выпуска и электронов, и позитронов. Для этого предполагается добиваться одинаковой энергии электронного и позитронного пучков на входе в накопи-

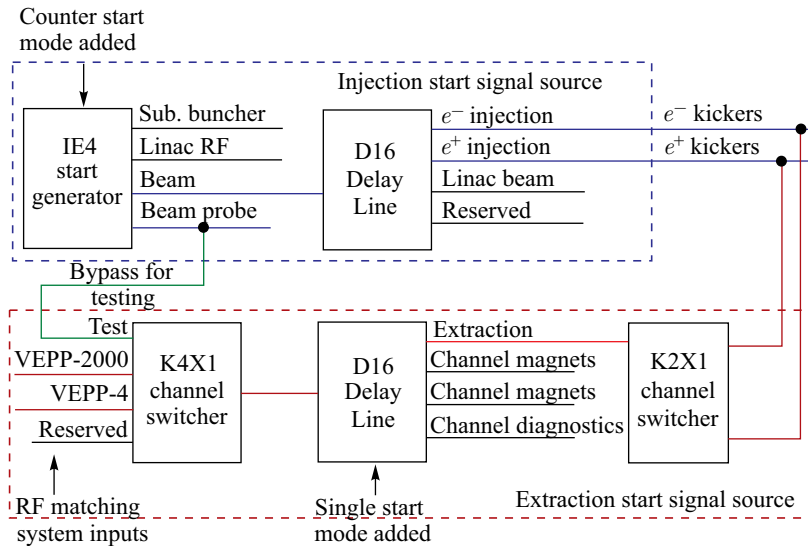


Рис. 3. Упрощенная схема генератора запускающих импульсов инжекционного комплекса

тель, сдвигая по времени запуск четвертого клистрона форинжектора. Также необходимо попытаться найти общий режим магнитной системы накопителя для всех процессов.

В настоящее время автомат инжекции-экстракции управляется при помощи графического интерфейса. Для полноценной работы с потребителями требуется планировщик — программа, которая принимает запросы от потребителей и передает команды автомату на выполнение нужных процессов.

ТРАНСПОРТНЫЕ КАНАЛЫ

Накопленный пучок заряженных частиц выпускается из накопителя через магнит типа Ламбертсона, используемый также для инжекции. Для вывода электронов и позитронов из плоскости накопительного кольца используются два выпускных канала с магнитами постоянного тока, которые в дальнейшем соединяются в общий транспортный канал с импульсной магнитной системой, предназначенный для перепуска пучков на другие установки ИЯФ.

Для уменьшения влияния замкнутой орбиты на траекторию выпускаемого пучка в начале выпускного канала установлен горизонтальный дипольный корректор. Во время первичной настройки магнитной системы позитронного выпускного канала использовались два режима экстракции пучка: 1) накопление 20–30 мА перед выпуском для получения более яркого изображения пучка на люминофорных экранах при первичной настройке магнитной системы; 2) выпуск пучка после однократного пролета через кольцо накопителя — для увеличения частоты выпуска пучков при дальнейшей оптимизации электронно-оптических характеристик канала.

В ходе работ по настройке выпуска позитронного пучка весной и летом 2015 г. была осуществлена транспортировка пучка через вертикальный параллельный перенос

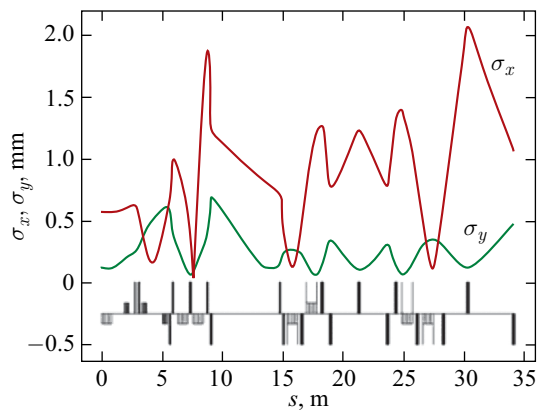


Рис. 4. Огибающие охлажденного пучка из накопителя в позитронном канале

(«мост»), горизонтальный ахроматический поворот и часть спуска в тоннель транспортного канала (рис. 4). Дальнейшая транспортировка пучка ожидается после ввода в эксплуатацию диагностических систем транспортного канала, в осеннем сезоне 2015 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН СГУСТКОВ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ И НАКОПИТЕЛЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ

С помощью пикосекундной электронно-оптической камеры с линейной разверткой (ЭОК) модели PS-1/S1 (стрик-камера) [4], разработанной в ИОФ РАН, были измерены временные параметры пучков электронов в линейном ускорителе и накопителе-охла-

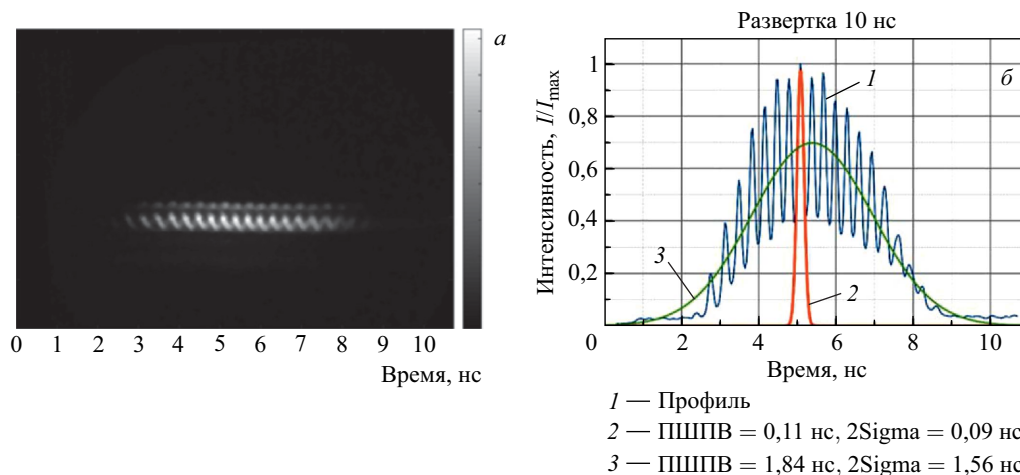


Рис. 5. а) Изображение последовательности электронных сгустков в линейном ускорителе ВЭПП-5, по оси абсцисс — наносекунды, по оси ординат — относительная интенсивность. б) То же изображение после обработки. ПШПВ — полуширина на полувысоте

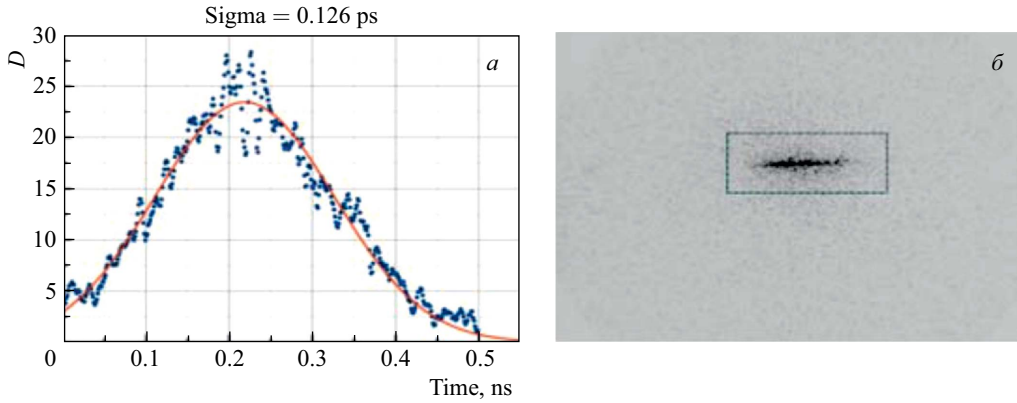


Рис. 6. Измеренная длина одного сгустка электронов в накопителе. Время развертки стрик-камеры составило 1,5 нс. а) Изображение с люминофора стрик-камеры, оцифрованное ПЗС-камерой; б) обработанное изображение развертки пучка. Длина пучка (Sigma) составила примерно 126 пс

дителе инжекционного комплекса ВЭПП-5. Измерения длины пучка электронов с энергией 275 МэВ проводились после пятой ускоряющей секции линейного ускорителя. В качестве источника черенковского света для стрик-камеры использовался кварцевый конус. На рис. 5 показана последовательность сгустков электронов, зарегистрированных на люминофоре стрик-камеры с помощью ПЗС, а также обработка данного изображения. При этом длительность развертки составила 10 нс.

На рис. 6 показан результат измерения длины накопленного сгустка электронов в накопителе.

ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Была достигнута максимальная зарядовая производительность линейных ускорителей: $3,3 \cdot 10^9$ позитронов за выстрел. Энергия позитронов 420 МэВ, устойчивая работа с частотой повторения до 25 Гц, при этом максимальная эффективность инжекции позитронов $\sim 10\%$ (от выхода линейного ускорителя до захваченного тока в накопителе), при теоретическом максимуме без дебанчера-монокроматора — 23%. Максимальная скорость накопления 0,3 мА/выстрел (это $1,7 \cdot 10^8$ позитронов за выстрел, $2 \cdot 10^9$ позитронов в секунду при работе с частотой 12,5 Гц и $3 \cdot 10^9$ позитронов в секунду при работе с частотой 25 Гц).

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Одной из существенных проблем, которые ограничивают получение интенсивных пучков позитронов, является устойчивость позитронной мишени к термомеханическим нагрузкам, которые возникают в ней при падении мощного первичного электронного пучка. Предельная пиковая мощность, которую может выдержать твердая мишень, составляет величину $2 \cdot 10^{12}$ ГэВ/мм² за импульс. В проектах будущих источников позитронов пиковая

мощность первичного электронного пучка превышает эту величину. Одним из возможных решений данной проблемы является использование мишени из сплава жидкого свинца. Разогретый до ~ 300 °С сплав прокачивается через мишень с помощью специального насоса. Мишень представляет собой канал прямоугольного сечения, в котором сделаны два круглых отверстия диаметром 10 мм. Первое — в месте падения первичного электронного пучка, второе — в месте выхода вторичного пучка из мишени. В эти отверстия впаяны окна из керамики нитрид бор (BN) толщиной 4 мм. Керамика BN способна выдерживать огромные импульсные механические нагрузки, которые возникают при импульсном нагреве материала мишени. Вся система теплоизолируется и прогревается до температуры ~ 300 °С. Для того чтобы избежать окисления свинца, весь контур находится под вакуумом. Для прокачки жидкого свинца был выбран шестеренчатый насос. Одной из отличительных особенностей такого насоса является отсутствие каких-либо уплотнений. Это связано с тем, что жидкий свинец чрезвычайно химически активен. Поэтому использование традиционных материалов (латунь, бронза) довольно затруднительно из-за низкого ресурса. Для того, чтобы уменьшить выработку торцевых крышек насоса из-за трения, на внутренние поверхности крышек было нанесено покрытие из порошка Al_2O_3 детонационным способом. Затем эти поверхности были отшлифованы. Это же покрытие было нанесено на участки валиков насоса, которые служат подшипниками скольжения. Для ввода вращения в вакуумный объем служит муфта, уплотнение в которой осуществляется с помощью магнитной жидкости. Жидкость находится в двух кольцевых зазорах между стальным валом и цилиндрическими вставками в корпусе муфты. Такой тип насоса проработал около года в непрерывном режиме без существенного ухудшения своих характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа, посвященная измерению длины ступков на комплексе ВЭПП-5, выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00295). Работа, посвященная разработке перспективной конверсионной мишени на основе жидкого свинца, выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов Г. В., Стюф А. С. Новая система измерения положения пучка для форинжектора инжекционного комплекса // Докл. АН высш. шк. РФ. 2013. № 2.
2. Butakov A. I., Grishanov B. I., Podgorny F. V. Injection System to Damping Ring of an Electron-Positron Injection Complex VEPP-5 // Proc. of RuPAC XIX, Dubna, 2004.
3. Gusev E. A. et al. Extending VEPP-5 Control System by Middleware for Injection/Extraction Automation // Proc. of RuPAC, 2014.
4. Гаранин С. Г. и др. // Квант. электрон. 2014. Т. 44. С. 798.