

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕКЦИИ ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ ИЯФ СО РАН

*В. В. Балакин^a, Н. С. Воробьев^b, Д. В. Беркаев^a,
С. А. Глухов^a, П. Б. Горностаев^b, В. Л. Дорохов^a,
Ма Сяо Чао^a, О. И. Мешков^{a,1}, Д. А. Никифоров^a,
Е. В. Шашков^b, Ф. А. Еманов^a, К. В. Астрелина^a,
М. Ф. Блинов^a, В. М. Борин^a*

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

^b Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

Экспериментально изучена эффективность инъекции частиц из линейного ускорителя в накопитель-охладитель инжекционного комплекса ИЯФ СО РАН. Полученные оценки эффективности захвата частиц в накопитель-охладитель хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Предложен метод повышения эффективности захвата, позволяющий увеличить производительность инжекционного комплекса в 1,5–2 раза.

The efficiency of the injection from the linear accelerator into the damping ring of the Budker Institute of Nuclear Physics injection complex was experimentally studied. The resulting estimations for the injection efficiency are in good agreement with the measurements. A method to increase the injection efficiency was proposed in order to enhance the productivity of the injection complex by a factor of 1.5–2.

PACS: 29.27.Ac; 29.20.db; 29.20.Ej

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН [1] проектировался как источник электронов и позитронов для коллайдера c - τ -фабрики [2]. Короткие, длиной около 1 см, пучки из инжекционного комплекса предполагалось продольно группировать и ускорять до энергии эксперимента в линейном ускорителе S-диапазона. Строительство c - τ -фабрики отложено на неопределенный срок, поэтому в настоящее время инжекционный комплекс используется как источник частиц для действующих в ИЯФ электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 [3, 4].

В состав инжекционного комплекса входят источник электронов и позитронов на базе линейных ускорителей и накопитель-охладитель (рис. 1, таблица).

¹E-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

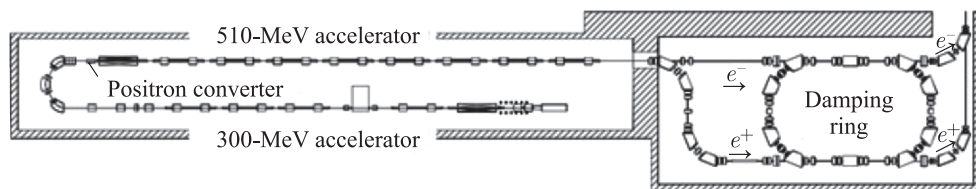


Рис. 1. Схема инжекционного комплекса ВЭПП-5

Инжекция частиц в накопитель-охладитель (НО) осуществляется из линейного ускорителя (ЛУ) с энергией около 400 МэВ [5]. В НО поочередно накапливаются либо позитроны, либо электроны, при этом максимальное число частиц в пучке достигает $(1-3) \cdot 10^{10}$. Накопление требуемого числа частиц происходит за несколько последовательных инъекций из ЛУ с частотой до 12,5 Гц. При достижении заданного

тока пучок перепускается по электронно-оптическим каналам [6] в один из коллайдеров. Коэффициент конверсии электронов в позитроны в мишени (см. рис. 1) составляет около 2 %, а значит, производительность по позитронам определяет и общую производительность инжекционного комплекса [7]. Для коллайдеров ИЯФ СО РАН необходима максимально возможная зарядовая производительность инжекционного комплекса, поэтому актуальны все возможные меры для ее увеличения. В связи с этим несомненный интерес представляют изучение и повышение эффективности захвата пучка из ЛУ в НО.

Для работы с $c-\tau$ -фабрикой от инжекционного комплекса требуется генерировать одиночные короткие сгустки частиц длиной около $\sigma_z \approx 1$ см. Планировалось, что они будут получаться сжатием пучка из электронной пушки ЛУ инжекционного комплекса при помощи клистронного группирователя. Комплексы ВЭПП-4М и ВЭПП-2000, напротив, могут принимать или несколько последовательных коротких сгустков, или один длинный, до $\sigma_z \approx 1$ м. Таким образом, для инъекции в эти коллайдеры нет необходимости в предварительной группировке пучка, но существует возможность уменьшить частоту ВЧ-резонатора НО.

К настоящему времени односгустковый режим на инжекционном комплексе не реализован, поэтому эффективность инъекции для данного случая исследована лишь при помощи численного моделирования. Эффективность накопления частиц в НО в многосгустковом режиме была исследована в серии экспериментов. Прежде всего, с помощью стрик-камеры PS-1/S1 была изучена структура пучка, инжектируемого в НО из ЛУ, а также проанализирована продольная динамика частиц в пучке в зависимости от времени с момента инъекции [8].

Измерения показали, что инжектируемый из ЛУ (линака) пучок имеет сложную продольную структуру длиной по основанию около 2 м (рис. 2, а). Спустя несколько десятков оборотов в НО частицы, не захваченные в сепаратрисы НО, вымирают. Накопленный в НО пучок состоит из 2–6 банчей в соседних сепаратрисах. Распределение частиц по банчам случайное. Длина банча в одной сепаратрисе на полувысоте равна приблизительно 4 см при напряжении на резонаторе 120 кВ и энергии частиц 400 МэВ.

Основные параметры накопителя-охладителя (2016 г.)

Параметр	Значение
Энергия, МэВ	400
Частота обращения, МГц	10,9375
Рабочая частота ВЧ, МГц	700
Ток пучка максимальный, мА	100
Число частиц	$4,2 \cdot 10^{10}$

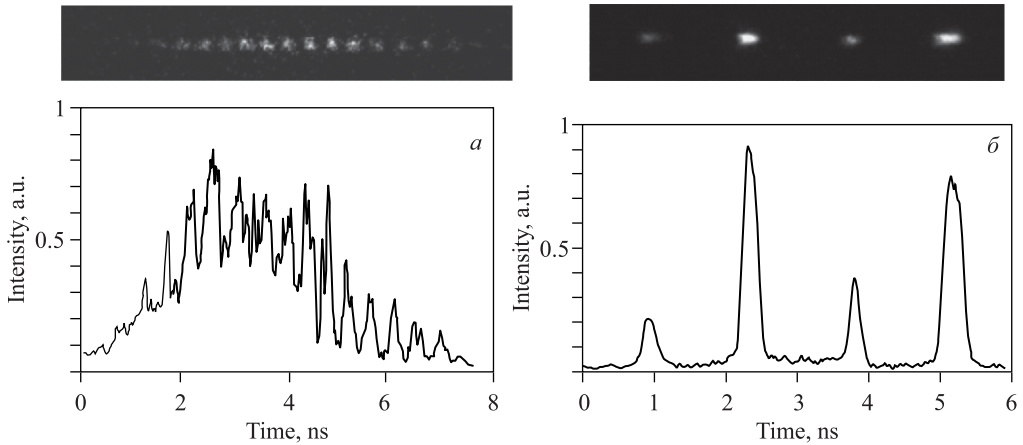


Рис. 2. Данные стрик-камеры PS-1/S1. *а)* Продольное распределение частиц в пучке из линака, совершившем 5 оборотов в НО после инжекции. Видна многобанчевая структура, соответствующая ускоряющей частоте ЛУ, равной 2,856 ГГц. *б)* Пучок в НО в четырех сепаратрисах спустя 100 оборотов с момента инжекции

Оценим эффективность захвата частиц из линака в одну сепаратрису НО. Пусть энергетический разброс пучка составляет $\sigma = 1\%$ (это значение получено экспериментально). При ВЧ-напряжении $U_{RF} = 120$ кВ и частоте ВЧ $f_{RF} = 700$ МГц (64-я гармоника частоты обращения) размеры ВЧ-сепаратрисы в НО равны $\sigma_{RF} = 0,82\%$, $L_{RF} = 0,428$ м (при $U_{RF} = 800$ кВ имеем $\sigma_{RF} = 3,13\%$). Если распределение инжектируемого пучка по продольным координатам описывается функцией $\rho(z, \delta)$, то эффективность инжекции можно записать следующим образом:

$$k(\varphi) = \frac{\int \rho(z, \delta) |\cos(\pi z / \sigma_{RF} + \varphi)| dz d\delta}{\int \rho(z, \delta) dz d\delta}, \quad (1)$$

где φ — это фаза ВЧ, в которую попадает центр инжектируемого пучка.

Ниже приведены результаты для случаев гауссовского и прямоугольного распределений инжектируемого пучка по продольной координате. Распределение по энергии в обоих случаях гауссовское.

При параметрах ВЧ $U_{RF} = 55$ кВ, $f_{RF} = 700$ МГц для гауссовского распределения эффективность инжекции не зависит от фазы напряжения φ и равна $k \approx 40\%$. Для прямоугольного распределения эффективность изменяется в пределах $k = 33-47\%$ в зависимости от фазы напряжения (рис. 3, *а*).

При $U_{RF} = 800$ кВ, $f_{RF} = 700$ МГц для гауссовского распределения частиц по продольной координате эффективность инжекции не зависит от фазы напряжения и равна $k = 83\%$. Для прямоугольного распределения эффективность изменяется в пределах $k = 78-96\%$ в зависимости от фазы напряжения (рис. 3, *б*). К сожалению, поднять напряжение на ускоряющем резонаторе НО выше 200 кВ не удастся из-за возникновения мультипакторного разряда. Экспериментально измеренная эффективность инжекции составляет примерно 45% при напряжении на ускоряющем резонаторе 55 кВ, что удовлетворительно совпадает с оценкой.

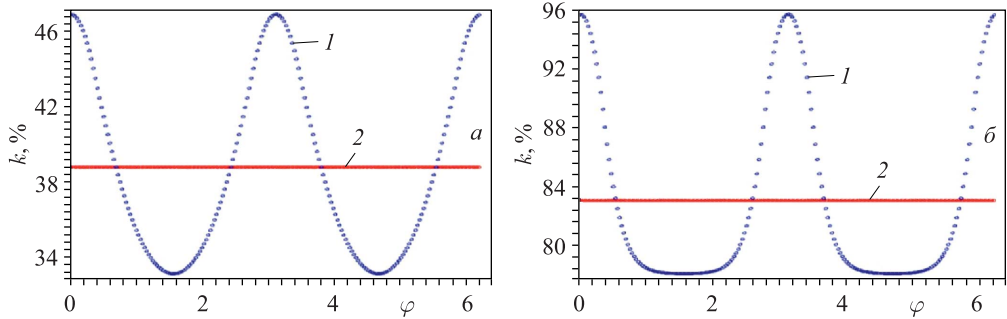


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Эффективность инъекции в НО из линака в зависимости от фазы напряжения на резонаторе ВЧ при $f_{RF} = 700$ МГц: а) $U_{RF} = 55$ кВ; б) $U_{RF} = 80$ кВ. Синие точки (1) — частицы пучка имеют прямоугольное распределение по длине, красные (2) — гауссовское распределение

Эффективность инъекции оценивалась по регистрации интенсивности синхротронного излучения $I(N)$ пучка в видимом диапазоне из поворотного магнита НО с помощью фотоэлектронного умножителя (рис. 4). Изменения интенсивности на первых оборотах пучка в НО вызваны бетатронными колебаниями большой амплитуды. Для эффективной работы НО желательно увеличить эффективность захвата в полтора-два раза.

Эффективность захвата пучка может быть повышена с помощью модернизации ускоряющей ВЧ-системы НО. Например, можно существенно понизить частоту ускоряющего напряжения, что, конечно, требует как замены генератора ВЧ, так и замены резонатора. При $U_{RF} = 55$ кВ и $f_{RF} = 11$ МГц параметры ВЧ-сепаратрисы составляют $\sigma_{RF} = 6,6\%$, $L_{RF} = 27,4$ м. Тогда из (1) следует, что при $U_{RF} = 55$ кВ, $f_{RF} = 11$ МГц, независимо от распределения, эффективность инъекции может приближаться к 100% при перестройке фазы напряжения в достаточно широких пределах (рис. 5).

В настоящее время НО начал работать как источник частиц для коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М [9]. Уже удалось в несколько раз превзойти величину тока позитронов, накопленных в ускорителе ВЭПП-2000, по сравнению с ранее использован-

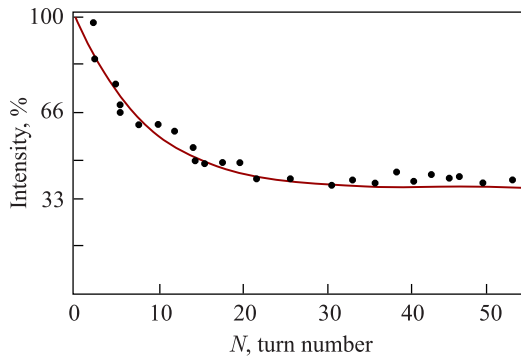


Рис. 4. Потери пучка после инъекции из ЛУ в НО. Точки — амплитуда сигнала с фотоэлектронного умножителя, регистрирующего интенсивность синхротронного излучения; кривая — аппроксимация экспонентой. Показан каждый второй оборот пучка в НО

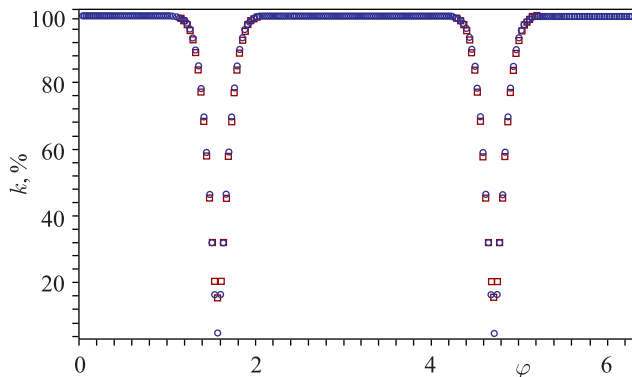


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Эффективность инжекции в НО из линака в зависимости от фазы напряжения на резонаторе ВЧ при $f_{RF} = 11$ МГц, $U_{RF} = 55$ кВ. Синие точки (кружки) — частицы пучка имеют прямоугольное распределение по длине; красные (квадраты) — гауссовское распределение

ной системой инжекции. Тем не менее для эффективной эксплуатации обоих коллайдеров требуется дальнейшее увеличение зарядовой производительности инжекционного комплекса. Как следует из приведенных оценок, можно рассчитывать, что замена ускоряющей ВЧ-системы повысит эффективность накопления частиц в НО еще не менее чем в 1,5–2 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00295).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физический проект комплекса ВЭПП-5. Редакция от 02.02.1996. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Новосибирск, 1996. 458 с.
2. Bondar A. E. et al. Project of a Super Charm–Tau Factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76, No. 9. P. 1072–1085.
3. <http://v4.inp.nsk.su/>
4. <http://vepp2k.inp.nsk.su/>
5. Alexandrov V., Balakin V., Lunin A. // Proc. of the XVIII Intern. Linear Accel. Conf., Aug. 26–30, 1996. V. 2. P. 821.
6. Zemlyansky I. M., Berkaev D. E., Kiselev V. A., Koop I. A., Otboev A. V., Semenov A. M., Starostenko A. A. Electron and Positron Beams Transportation Channels to BINP Colliders // Proc. of RuPAC2014, Obninsk, Russia, 2014. P. 462.
7. Starostenko A. A., Emanov F. A., Kazantseva E. S., Logatchov P. V. Status of Injection Complex VEPP-5: Machine Commissioning and First Experience of Positron Storage // Proc. of IPAC'2014, Dresden, Germany, 2014. P. 538.
8. Верецагин А. К., Воробьев Н. С., Горностаев П. Б., Дорохов В. Л., Крюков С. С., Лозовой В. И., Мешков О. И., Никифоров Д. А., Смирнов А. В., Шашков Е. В., Щелев М. Я. Регистрация синхротронного излучения пикосекундной стрик-камерой для диагностики пучков в циклических ускорителях // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 2. С. 185–188.
9. Berkaev D., Andrianov A., Astrelina K. et al. Commissioning of Upgraded VEPP-2000 Injection Chain // Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, 2016. P. 3811.

Получено 20 июля 2017 г.