

## СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЭПП-2000

*П. Ю. Шатунов<sup>а,1</sup>, Д. Е. Беркаев<sup>а,б</sup>, Ю. М. Жаринов<sup>а</sup>,  
И. М. Землянский<sup>а</sup>, А. С. Касаев<sup>а</sup>, А. Н. Кирпотин<sup>а</sup>, И. А. Кооп<sup>а,б</sup>,  
А. П. Лысенко<sup>а</sup>, А. В. Отбоев<sup>а</sup>, Е. А. Переведенцев<sup>а,б</sup>, В. П. Просветов<sup>а</sup>,  
Ю. А. Rogovskiy<sup>а,б</sup>, А. Л. Романов<sup>а</sup>, А. И. Сенченко<sup>а</sup>, А. Н. Скринский<sup>а</sup>,  
Ю. М. Шатунов<sup>а,б</sup>, Д. Б. Шварц<sup>а,б</sup>*

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

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

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 работает в ИЯФ СО РАН с 2010 г. Применение концепции круглых пучков совместно с аккуратной коррекцией орбиты и оптических функций позволило достичь пиковой светимости  $1,2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при энергии 500 МэВ. Пиковая светимость ограничена только эффектами встречи, в то время как средняя светимость — недостатком позитронов во всем диапазоне энергии 160–1000 МэВ. Кроме большего количества позитронов для достижения высокой светимости при больших энергиях необходима инжекция пучков при энергии эксперимента. В настоящее время новый электрон-позитронный инжекционный комплекс в ИЯФ собран и готов поставлять интенсивные пучки в коллайдер ВЭПП-2000 при энергии 450 МэВ.

The electron–positron collider VEPP-2000 has been operating at BINP since 2010. The application of round colliding beams concept along with the accurate orbit and lattice correction yielded the high peak luminosity of  $1.2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at 500 MeV. The peak luminosity is limited only by beam–beam effects, while the average luminosity — by present lack of positrons in whole energy range of 160–1000 MeV. To perform high luminosity at high energies the top-up injection is needed. At present new electron and positron injection complex at BINP is commissioned and ready to feed VEPP-2000 collider with intensive beams with energy of 450 MeV.

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

### 1. ОБЗОР КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000

Коллайдер ВЭПП-2000 [1] использует концепцию круглых пучков [2]. Выполнение концепции обеспечивается на ВЭПП-2000 размещением двух пар 13-Тл сверхпроводящих соленоидов финального фокуса в двух экспериментальных промежутках, симметрично по отношению к местам встречи.

---

<sup>1</sup>E-mail: P.Yu.Shatunov@inp.nsk.su

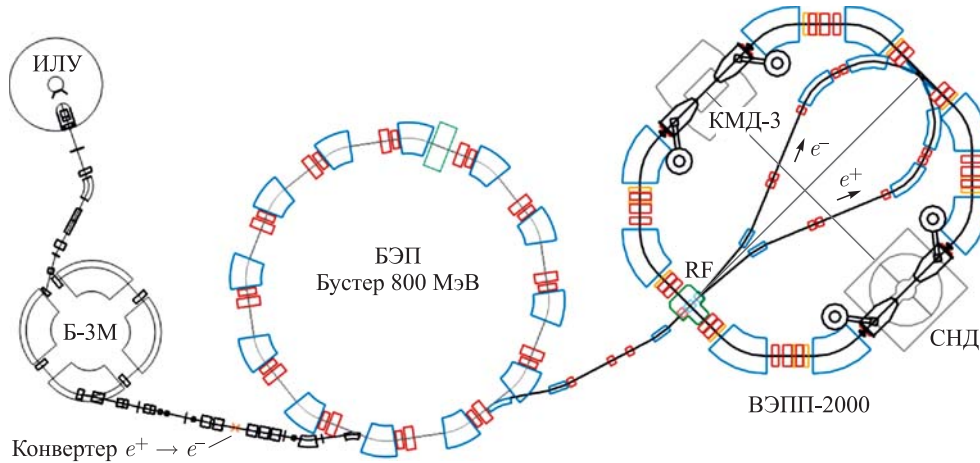


Рис. 1. Схема комплекса ВЭПП-2000

Схема комплекса ВЭПП-2000 в том виде, как он работал до 2013 г., показана на рис. 1. Комплекс состоит из инжекционной части (включающей старую систему производства пучков и бустер электронов и позитронов БЭП, ограниченный по энергии на уровне 800 МэВ) и собственно коллайдера с двумя детекторами частиц (сферический нейтральный детектор (СНД) и криогенный магнитный детектор КМД-3), расположенными в промежутках с нулевой дисперсией и малыми бета-функциями. Основные параметры коллайдера даны в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры ВЭПП-2000 при энергии  $E = 1$  ГэВ

Параметр	Значение
Периметр $C$ , м	24,3883
Диапазон энергии $E$ , МэВ	200–1000
Число сгустков	$1 \cdot 1$
Число частиц в сгустке $N$	$1 \cdot 10^{11}$
$\beta$ -функции в месте встречи $\beta_{x,z}^*$ , см	8,5
Бетатронные частоты $\nu_{x,z}$	4,1; 2,1
Эмиттансы пучков $\epsilon_{x,z}$ , м · рад	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Параметр пространственного заряда $\xi_{x,z}$	0,1
Светимость $L$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1 \cdot 10^{32}$

Плотность расположения магнитных элементов и компонентов детекторов столь высока, что невозможно организовать разведение пучков в арках. В результате на ВЭПП-2000 возможна работа только в режиме  $1 \times 1$  сгусток.

## 2. ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ

Диагностика основана на использовании 16 камер ПЗС, которые регистрируют видимую часть синхротронного излучения с краев поворотных магнитов и дают полную информацию о положении, интенсивности и профилях пучков. В дополнение к оптическим датчикам положения пучка используются четыре электростатических пикапа

в технических промежутках, два ФЭУ для измерения тока пучков по интенсивности синхротронного излучения и один преобразователь тока пучка в качестве абсолютного измерителя тока. Продольное распределение частиц и длины сгустков измеряются двумя  $\phi$ -диссекторами [3] — стробоскопическими диссекторами изображения с электростатической фокусировкой.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

ВЭПП-2000 начал набор статистики с двумя детекторами, установленными в 2009 г. [4]. Первые заходы были посвящены работе в диапазоне высокой энергии, а в последнем сезоне 2012–2013 гг. проводилось сканирование в диапазоне малой энергии. Средняя светимость, полученная в детекторе КМД-3 за последние три сезона, показана красными точками на рис. 2. Красные сплошные и пунктирные линии показывают оценку гипотетически достижимой пиковой светимости. Синяя штриховая линия показывает предел светимости по эффектам встречи при фиксированной оптике кольца (зависимость от энергии  $L \propto \gamma^4$ ). Этот предел был успешно преодолен благодаря уменьшению  $\beta^*$  до 4–5 см при малой энергии.

При высокой энергии (> 500 МэВ) светимость была ограничена в основном недостаточной скоростью производства позитронов. При энергии выше 800 МэВ необходимость увеличивать энергию в коллайдере дополнительно ограничивает светимость. Только в среднем диапазоне энергии (300–500 МэВ) светимость действительно ограничивается эффектами встречи, особенно эффектом флип-флоп [5]. При самых низких значениях энергии слабое радиационное затухание и сильное внутрисгустковое рассеяние при малой динамической апертуре дают сильное ограничение времени жизни пучков.

Хорошо известно, что эффективность столкновения пучков характеризуется «достигнутым» параметром пространственного заряда

$$\xi_{\text{lumi}} = \frac{N^- r_e \beta_{\text{ном}}^*}{4\pi \gamma \sigma_{\text{lumi}}^{*2}}, \quad (1)$$

где бета-функция берется номинальной, а размер пучка вычисляется из экспериментально измеренной светимости.

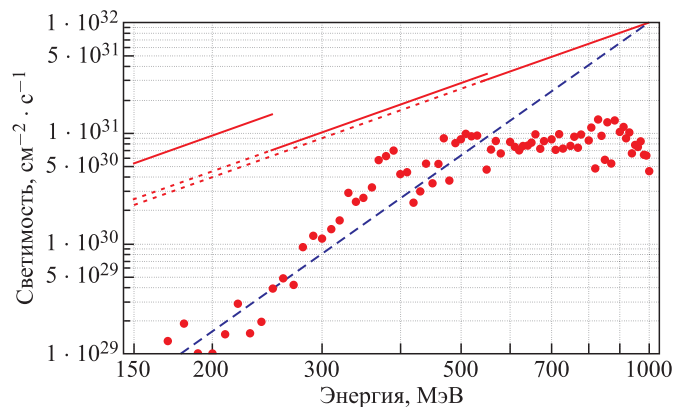


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Светимость ВЭПП-2000

На рис. 3 показана корреляция между достигнутым и номинальным параметрами пространственного заряда для всех набранных данных при энергии  $E = 392,5$  МэВ. После тщательной настройки машины параметр пространственного заряда достигал максимального значения  $\xi \sim 0,09$  во время регулярной работы (пурпурные (более светлые) точки на рис. 3).

Во время изучения зависимости пороговой величины параметра  $\xi$  от длины ступка при относительно низкой энергии 392,5 МэВ было установлено, что уменьшение ВЧ-напряжения с 30 до 17 кВ дает существенный прирост максимального значения  $\xi$  (синие (более темные) точки на рис. 3) до  $\xi \sim 0,12$  на одно место встречи.

Независимой проверкой измерений параметра пространственного заряда является анализ спектра когерентных колебаний пучка. Из осциллограммы на рис. 4 видно, что частоты  $\sigma$ - и  $\pi$ -мод равны 0,165 и 0,34 соответственно. Полный сдвиг частоты  $\Delta\nu = 0,175$  соответствует величине параметра  $\xi$  на одно место встречи:

$$\xi = \frac{\cos(\pi\nu_\sigma) - \cos(\pi\nu_\pi)}{2\pi \sin(\pi\nu_\sigma)} = 0,124. \quad (2)$$

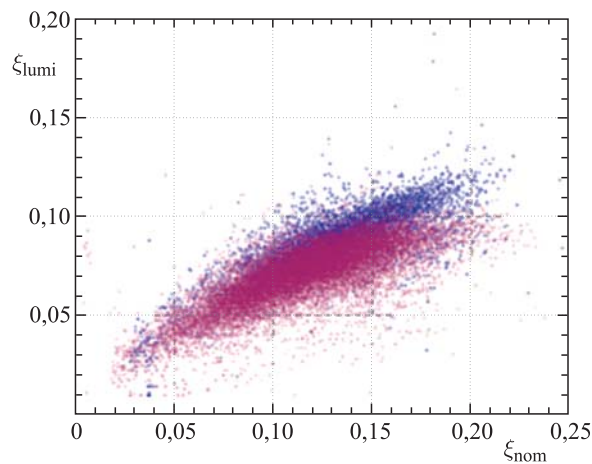


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Достигнутый параметр пространственного заряда при энергии 392,5 МэВ

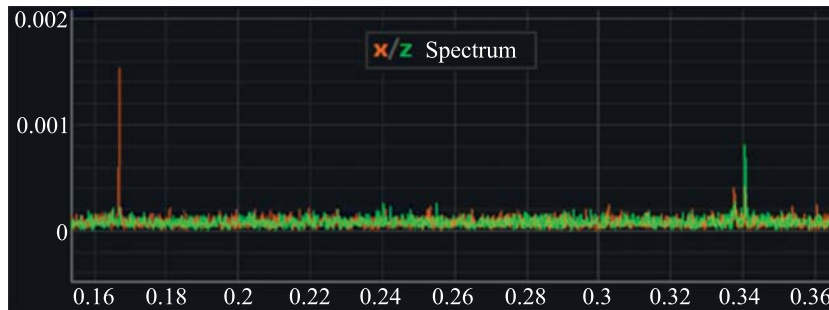


Рис. 4. Сдвиг частоты из-за эффектов встречи при энергии 392,5 МэВ

Увеличение предельного значения параметра  $\xi$  коррелировало с удлинением пучка, что явилось экспериментальным подтверждением предсказаний работы [6] об ослаблении эффектов встречи для сгустков чуть длиннее, чем  $\beta^*$ .

#### 4. НЕОБХОДИМОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000

Из рис. 2 можно заключить, что нехватка позитронов не позволяет достичь интенсивности пучков, ограниченной только порогом по эффектам встречи. Это ограничение будет снято после присоединения 250-м каналом К-500 [7] к новому инжекционному комплексу в ИЯФ [8], способному производить интенсивные электронные и позитронные пучки высокого качества при энергии 450 МэВ (рис. 5).

Другое ограничение эффективности ВЭПП-2000 вытекает из максимального значения энергии бустера БЭП [9] на уровне 800 МэВ. Даже при неограниченной скорости производства пучков параметр пространственного заряда, достигнув порогового значения после

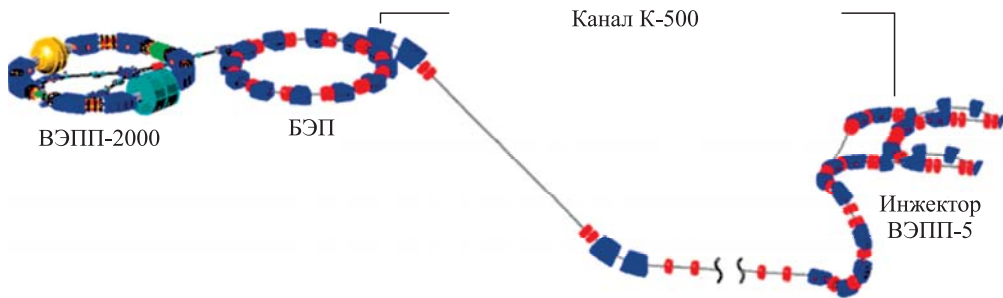


Рис. 5. Ускорительный комплекс ВЭПП-2000 после модернизации

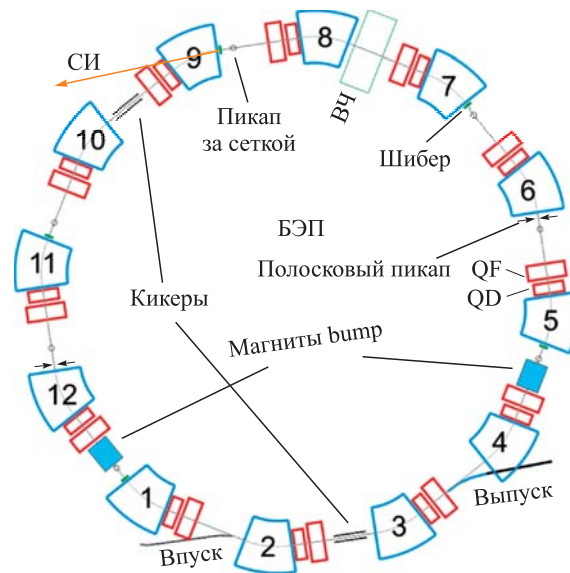


Рис. 6. Бустерный синхротрон БЭП

Таблица 2. Основные параметры БЭП при энергии  $E = 1$  ГэВ

Параметр	Значение
Периметр $C$ , м	22,35
Частота обращения $f_0$ , МГц	13,414
Радиус поворота $r_0$ , см	128
Гармоника ВЧ $q$	13
Потери при синхротронном излучении, кэВ/оборот	70
Эмиттансы $\epsilon_{x,z}$ , см	$8,6 \cdot 10^{-6}, 10^{-8}$
Бетатронные частоты $\nu_{x,z}$	3,4; 2,4
Коэффициент уплотнения орбит $\alpha_p$	0,06

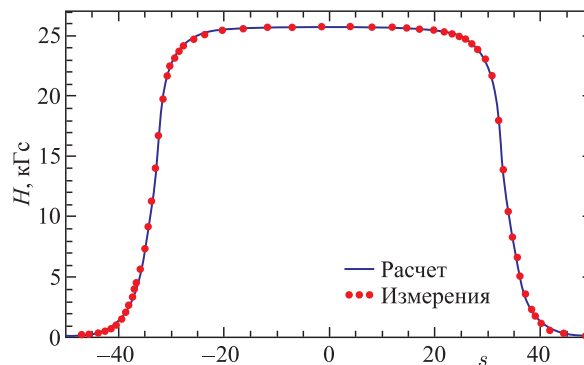
инъекции, неизбежно уменьшится после ускорения в кольце:  $\xi \propto 1/\gamma^2$ . В дополнение к этому «мертвое» время в процессе ускорения и сложности ускорения встречных пучков вблизи порога означают необходимость инъекции при энергии эксперимента. Для возможности работы в таком режиме необходимо увеличить достижимую энергию работы бустера БЭП и перепускного канала БЭП–ВЭПП-2000 до 1 ГэВ.

Бустерный синхротрон БЭП, спроектированный для захвата, охлаждения и накопления «горячих» 125-МэВ позитронов из конверсионной системы, работал с 1991 г. Он состоит из 12 ячеек FODO. Каждая ячейка включает  $30^\circ$ -й секторный магнит, два квадрупольа и промежуток, используемый для ВЧ-резонатора, кикеров, септум-магнитов впуска/выпуска, диагностики, вакуумной откачки. Схема бустера представлена на рис. 6, основные параметры БЭП после модернизации перечислены в табл. 2.

## 5. СТАТУС МОДЕРНИЗАЦИИ БЭП

**5.1. Магнитная система.** Основная идея модернизации магнитов состоит в использовании существующих катушек, источников питания и всей инфраструктуры. Требуемое поле 2,6 Тл достигается изменением профиля железа с уменьшением апертуры и подъемом питающего тока до 10 кА [10]. Результаты магнитных измерений прототипа дипольного магнита БЭП показаны на рис. 7.

Основная проблема в согласовании сил диполей и квадрупольей вызвана их общим источником питания. Кроме того, этот же источник запитывает поворотные магниты

Рис. 7. Продольное распределение поля  $B_y(s)$  при токе 9,9 кА

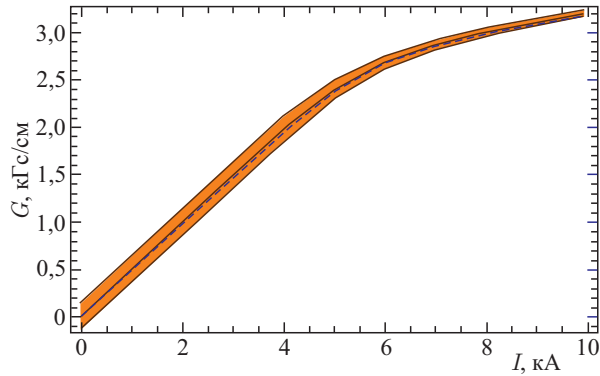


Рис. 8. Измеренная кривая (сплошная) насыщения квадруполь в сравнении с аналогичной кривой для дипольного магнита (штриховая). Показан также коридор возможных коррекций

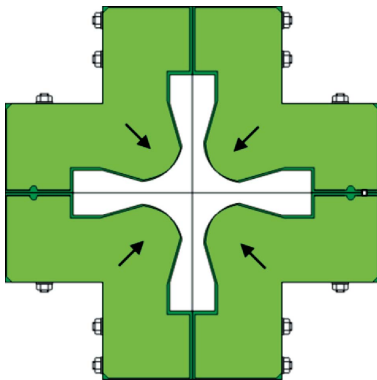


Рис. 9. Новый профиль квадруполь БЭП

перепускного канала. В результате модификация квадруполь должна воспроизводить сильно нелинейную кривую насыщения диполей (рис. 8).

Самая сложная работа связана с квадрупольями. План такой: использовать старое ярмо, сделать новый профиль с меньшим вписанным радиусом и увеличить заложенную в линзе секступольную компоненту (рис. 9).

Существующие коррекции достаточно слабые и становятся еще слабее с насыщением железа. Необходимо попасть в коридор, обеспечиваемый этими коррекциями. Кривые насыщения секступольной и квадрупольной гармоник существенно различаются, секступольная компонента сильно насыщается при токе 6 кА (рис. 10).

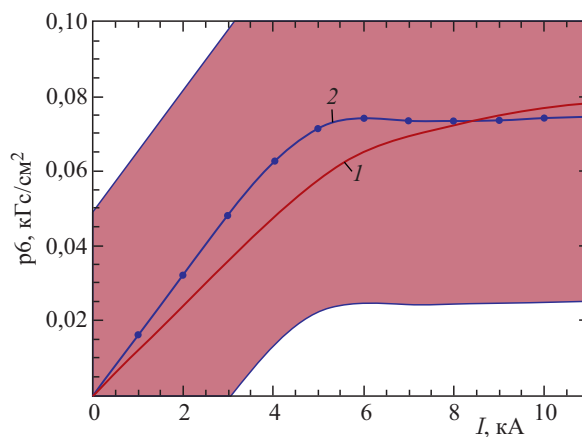


Рис. 10. Кривые насыщения квадрупольной (1) и секступольной (2) гармоник

**5.2. Канал БЭП–ВЭПП-2000.** Основной доработкой в канале является изготовление новых «синих» магнитов и новой вакуумной камеры для них. Они последовательно запитываются с диполями БЭП. Следовательно, мы имеем те же самые проблемы: необходимо подогнать кривую насыщения для возможности синхронной работы с кольцом БЭП. К настоящему времени все 8 магнитов изготовлены (рис. 11), произведено измерение краевого поля (рис. 12).



Рис. 11. Короткий «синий» магнит

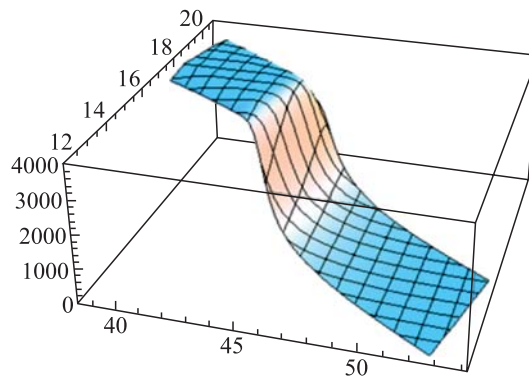


Рис. 12. Измерение краевого поля «синего» магнита

**5.3. Вакуумная система.** Одна ячейка вакуумной камеры состоит из экструдированного алюминиевого сегмента внутри диполя и фокусирующего дублета и камеры из нержавеющей стали с портом вакуумной откачки. Для использования старой системы после модернизации алюминиевая камера (рис. а) локально деформирована внутри дипольного магнита (рис. б) и малого квадрупольного магнита QD (рис. в) (рис. 13).

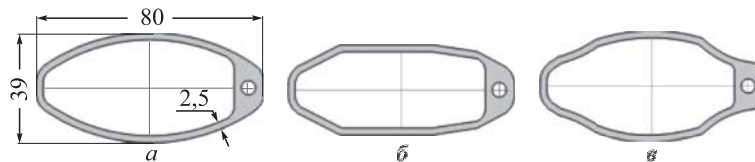


Рис. 13. Поперечное сечение вакуумной камеры



**5.4. ВЧ-система.** Поскольку потери энергии за оборот увеличиваются с ростом энергии (достигая 70 кэВ/оборот), был изготовлен новый ВЧ-резонатор (рис. 14). Он работает на частоте 174,376 МГц и при напряжении 110 кВ.

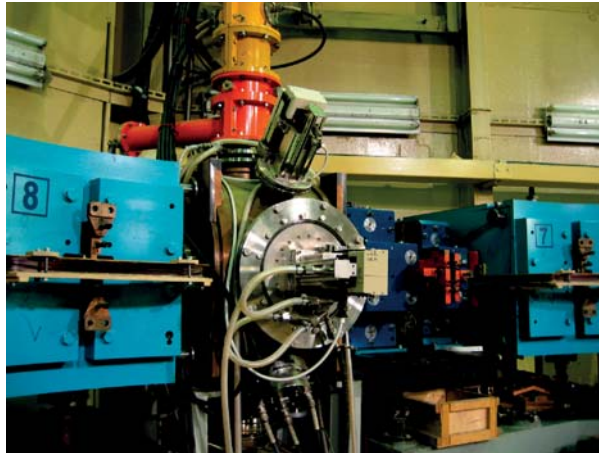


Рис. 14. Новый ВЧ-резонатор на частоте 174,376 МГц на кольце БЭП

**5.5. Системы впуска и выпуска.** Новый впускной септум-магнит необходим для получения 450-МэВ пучка из инжекционного комплекса. 25°-й импульсный магнит с апертурой 10 мм и полем 17 кГс изготовлен и установлен после магнитных измерений. Система выпуска остается неизменной. Для выпуска требуется создать искажение орбиты  $\sim 25$  мм в горизонтальном направлении, так называемый «бамп». Старая система дополнительных витков в четырех дипольных магнитах становится неэффективной при высоких значениях энергии из-за сильного насыщения железа. Вместо этого установлены два 30-см импульсных (2,5 мс) шихтованных С-образных магнита с полем 1,7 кГс.

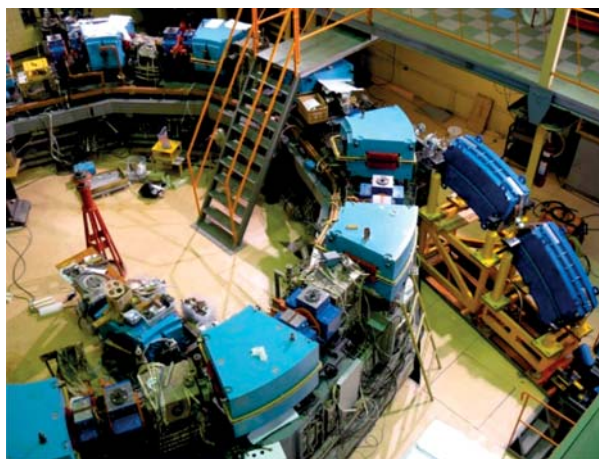


Рис. 15. Современное состояние бустера БЭП, показаны также финальные магниты канала К-500

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Круглые пучки дают существенный прирост светимости. Параметр пространственного заряда при средних значениях энергии достигал величин  $\xi \sim 0,1-0,12$ . ВЭПП-2000 успешно набирал статистику с двумя детекторами во всем диапазоне энергии 160–1000 МэВ, значение светимости превышает в 2–5 раз величины, достигнутые на его предшественнике — ВЭПП-2М [11]. В настоящее время проводится модернизация бустера БЭП (рис. 15) для достижения энергии 1 ГэВ, чтобы обеспечить возможность инжекции при энергии эксперимента и проектную светимость электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu. M. et al.* Project of a New Electron Positron Collider VEPP-2000 // Conf. Proc. 2000. V. C0006262. P. 439–441.
2. *Danilov V. V. et al.* The Concept of Round Colliding Beams // Conf. Proc. 1996. V. C960610. P. 1149–1151.
3. *Zinin E. I.* Ph. D. Thesis. Budker Inst. of Nucl. Phys. Novosibirsk, 1984.
4. *Achasov M. N. et al.* First Experience with SND Calorimeter at VEPP-2000 Collider // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 31–32.
5. *Shwartz D. et al.* Recent Beam–Beam Effects and Luminosity at VEPP-2000 // Proc. of IPAC2014. Dresden, Germany, 2014. P. 924–927.
6. *Danilov V. V., Perevedentsev E. A.* Two Examples of Integrable Systems for Round Colliding Beams // Conf. Proc. 1997. V. C970512. P. 1759.
7. *Zemlyansky I. M. et al.* Electron and Positron Beams Transportation Channels to BINP Colliders // Proc. of the 24th All-Russian Conf. on Charged Part. Accel. (RuPAC14). 2014; <http://inspirehep.net/record/1335364/files/frca03.pdf>.
8. *Logatchev P. et al.* Status of Injection Complex VEPP-5 // Proc. of the 24th All-Russian Conf. on Charged Part. Accel. (RuPAC14). 2014.
9. *Anashin V. V. et al.* Damping Ring for Electrons and Positrons BEP. Preprint BINP. Novosibirsk, 1984. P. 114.
10. *Shwartz D. et al.* Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV // Proc. of the 5th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2014). 2014. P. MOPRO018; <http://jacow.org/IPAC2014/papers/mopro018.pdf>.
11. *Romanov A. L. et al.* Status of the Electron–Positron Collider VEPP-2000 // North Amer. Part. Accel. Conf. (PAC13), Pasadena, CA, USA, Sept. 29 – October 4, 2013.