

СТАТУС ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА ИЯФ ВЭПП-2000

*М. В. Тимошенко^{а,1}, В. М. Борин^а, Ю. М. Жаринов^а, И. М. Землянский^а,
А. С. Касаев^а, Г. В. Карпов^а, А. Н. Кирпотин^а, И. А. Кооп^б,
А. П. Лысенко^а, О. И. Мешков^а, Е. А. Переведенцев^б, В. П. Просветов^а,
Ю. А. Роговский^б, А. И. Сенченко^а, Д. Н. Шатилов^а, П. Ю. Шатунов^а,
Ю. М. Шатунов^б, Д. Б. Шварц^б*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ВЭПП-2000 — единственный электрон-позитронный коллайдер, работающий с круглыми пучками, что позволяет повысить предел по эффектам встречи. Экспериментальная программа коллайдера в рабочем сезоне 2018–2019 гг. была сосредоточена в диапазоне энергий 550–990 МэВ на один пучок. Производился набор данных детекторами КМД-3 и СНД, набранный интеграл светимости стал рекордным и составил $68 \text{ pb}^{-1}/\text{детектор}$. Светимость ВЭПП-2000, после подключения к инжекционному комплексу ИЯФ в 2016 г., ограничена эффектами встречи во всем диапазоне энергий.

VEPP-2000 is the only electron–positron collider with round beams. This factor allows scientists to increase beam–beam effect limit. Experiment program at work season 2018–2019 was focused on energy range of 550–990 MeV per beam. Data accumulation was produced by detectors CMD-3 and SND and luminosity integral became record and was 68 pb^{-1} per detector. VEPP-2000 luminosity was limited by only beam–beam effects in the whole energy range after connection to BINP Injection Complex in 2016.

PACS: 29.20.db; 34.80.-i

ВВЕДЕНИЕ

ВЭПП-2000 — уникальная установка, работающая в ИЯФ СО РАН с 2010 г. Это электрон-позитронный коллайдер с реализованной концепцией круглых пучков для обеспечения максимально возможной светимости при достаточно малом периметре установки ~ 24 м. В рабочих сезонах 2017–2018 и 2018–2019 гг. главными задачами являлись: преодоление ограничений светимости, связанных с эффектами встречи, регулярная коррекция магнитной структуры, настройка комплекса на работу на энергии до 1 ГэВ, тестирование новых систем диагностики для исследования процесса инжекции порций частиц в коллайдер и эффектов встречи.

В работе представлен краткий обзор истории электрон-позитронных коллайдеров ИЯФ СО РАН — предшественников ВЭПП-2000, а также этапы модернизации комплекса ВЭПП-2000, описаны задачи и пути их решения.

¹E-mail: tim94max@gmail.com

ИСТОРИЯ КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000

Предыстория: ВЭПП-2/ВЭПП-2М. В начале 1960-х гг., на первой стадии по развертыванию работ по ВЭП-1 — электрон-электронному циклическому коллайдеру, А. М. Будкер со своими коллегами выдвинул идею о создании установки с электрон-позитронными встречными пучками.

Тогда было ясно, что ИЯФ не имеет возможности использовать обычный линейный ускоритель в качестве инжектора частиц, поэтому было принято решение о создании связки систем: ИЛУ — импульсного линейного ускорителя и Б-ЗМ — синхротрона. Данная инжекционная система с неоднократными модернизациями функционировала до 2013 г.

Уже в 1966 г. был сконструирован сам коллайдер ВЭПП-2 (весь комплекс целиком выглядел как 1, 2, 3, 4 на рис. 1), произведена его настройка и проведены первые успешные эксперименты по регистрации π -мезона на энергии 380 МэВ на пучок. Максимальная энергия пучков составляла 2×670 МэВ, максимальная светимость коллайдера $3 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Эксперименты по физике высоких энергий на этом комплексе продолжались до 1970 г. В 1970 г. было принято решение о сооружении установки ВЭПП-2М на базе работающего комплекса ВЭПП-2. На концепцию ВЭПП-2М накладывались определенные условия, главным образом, малость β -функции в месте встречи.

Коллайдер ВЭПП-2 был модернизирован в бустерное накопительное кольцо, однако стал не самым оптимальным вариантом бустера, и к 1989 г. был спроектирован и введен в эксплуатацию бустерный накопитель БЭП (схема установки преобразилась согласно рис. 1), который увеличил производительность позитронов.

Почти за 25 лет работы на светимость (1974–2000 гг.) в диапазоне энергий от 150 до 700 МэВ в пучке разными детекторами был набран суммарный интеграл светимости в $\sim 100 \text{ пб}^{-1}$, светимость на максимальных энергиях достигала $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что на два порядка превышало светимость ВЭПП-2 [1].

ВЭПП-2000. Преимуществом ВЭПП-2000 [2] было значительное увеличение светимости относительно ВЭПП-2М (почти в 20 раз) за счет реализации концепции круглых пучков [3, 4] и расширение энергетического диапазона до 1 ГэВ на пучок. Строительство коллайдера ВЭПП-2000 на месте ВЭПП-2М было начато в 2001 г. и завершено к 2007 г., в 2010–2013 гг. детекторы уже набирали статистику в полном диапазоне энергий.

В 2013 г. были развернуты работы по модернизации комплекса ВЭПП-2000. БЭП был перестроен под новый источник частиц [5] — инжекционный комплекс ИЯФ

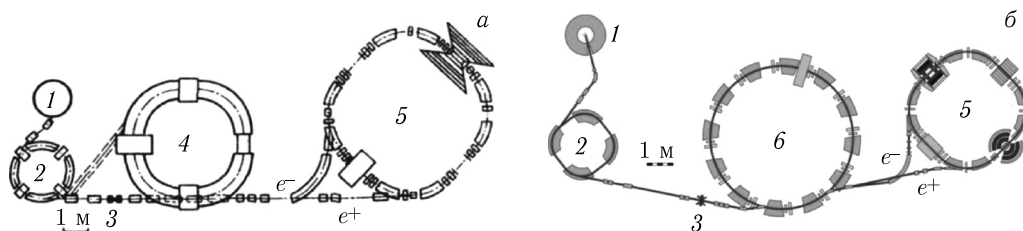


Рис. 1. Коллайдерный комплекс ВЭПП-2М с разными бустерами: 1 — ИЛУ; 2 — Б-ЗМ; 3 — конверсионная мишень; 4 — ВЭПП-2; 5 — ВЭПП-2М; 6 — БЭП

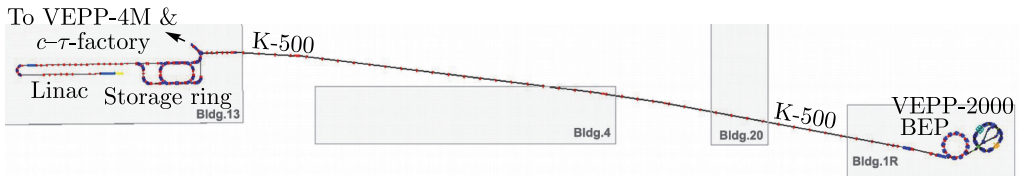


Рис. 2. ВЭПП-2000 с ИК

(ИК), был расширен диапазон его энергии до 1 ГэВ (до этого ускорение пучков с максимальной энергии бустера до больших энергий производилось непосредственно в самом коллайдере).

Схема установки приобрела вид, в котором функционирует в настоящее время (рис. 2).

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ВЭПП-2000

Рассмотрим подробнее структуру коллайдера (рис. 3). ВЭПП-2000 имеет двукратную симметрию относительно мест встречи и оси ВЧ-резонатор – место инъекции. На магните 1M1 имеется свободный вывод СИ с электронного направления, куда подключались экспериментальные приборы — стрик-камера и ФДЛ. Для измерения энергии пучков используется преимущественно метод обратного комптоновского рассеяния [6].

Основные параметры коллайдера приведены в таблице.

Целью создания комплекса ВЭПП-2000 является работа на светимость и набор статистики детекторами СНД и КМД-3 [7].

При наборе статистики детекторами в течение рабочего сезона происходит частая (раз в несколько суток) перестройка комплекса на новую энергию. Рутинной процедурой является коррекция орбиты и магнитной структуры коллайдера, которая осуществляется посредством анализа SVD-разложения матрицы откликов и последующей правкой орбиты и магнитной структуры [8].

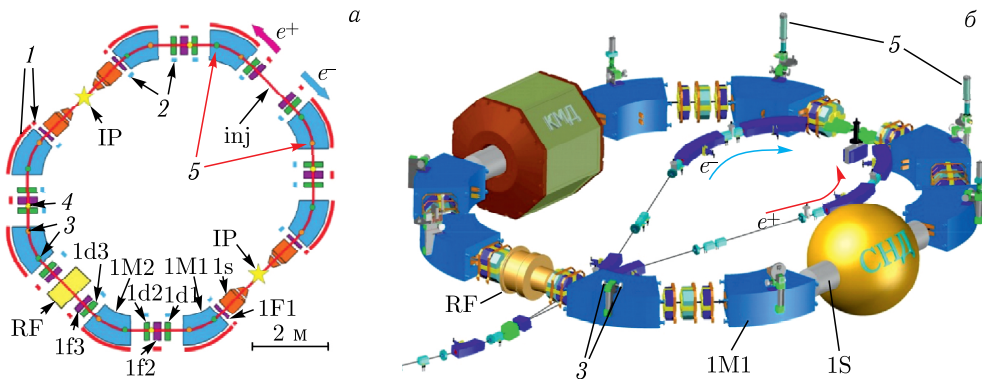


Рис. 3. Схема ВЭПП-2000: а) 2D; б) 3D. 1 — горизонтальные магнитные корректоры; 2 — вертикальные; 3 — ПЗС-камеры; 4 — пикапы; 5 — фи-диссекторы; RF — резонатор; магнитная структура одного квадранта: 1M1 — поворотный магнит; 1S — соленоид; 1F1, 1F2, 1F3, 1D1, 1D2, 1D3 — по три семейства линз F и D; IP — места встречи пучков

Проектные параметры коллайдера ВЭПП-2000 на энергии 1 ГэВ

Параметр	Значение
Периметр Π , м	24,39
Энергетический диапазон E , МэВ	150–1000
Число сгустков	1×1
Число частиц в сгустке N	1×10^{11}
Бета-функции в месте встречи β_x, β_y , см	8,5
Эмиттанс $\varepsilon_x, \varepsilon_y$, м·рад	$1,4 \times 10^{-7}$
Бетатронные частоты $\nu_x; \nu_y$	4,1; 2,1
Параметр встречи ξ	0,1
Светимость L , см $^{-2}$ ·с $^{-1}$	$1 \cdot 10^{32}$

Эффекты встречи задают фундаментальное ограничение на максимальную светимость коллайдера. Один из факторов — это деградация качества перепусков из бустера в коллайдер с ростом интенсивности пучков. Другим фактором является эффект flip-floor, для подавления которого на ВЭПП-2000 применяется устройство Beam shaker [9], которое эффективно на энергиях пучка до 600 МэВ.

СТРИК-КАМЕРА

Стрик-камера — оптический прибор для однооборотного измерения двумерного профиля сгустка (по двум осям — продольной и одной из поперечных). Модель используемой на ВЭПП-2000 стрик-камеры — PN-01/S20 [10].

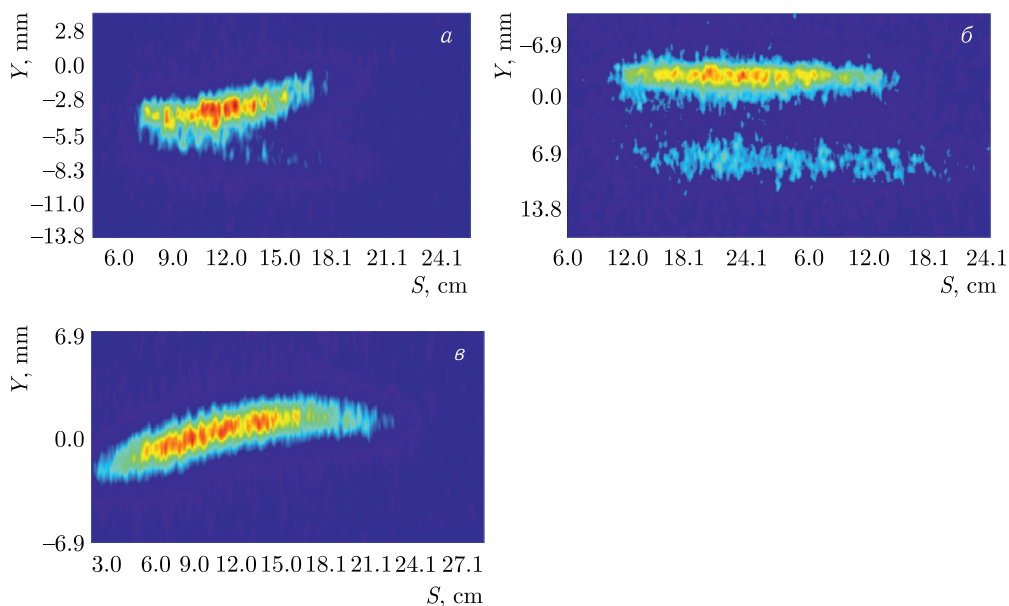


Рис. 4. Стрик-камера (2017–2018 гг.; плоскость S – Y). а) Инжекция e^- к циркулирующим e^+ (40-й оборот); б) инжекция e^- к циркулирующим e^- в отсутствие e^+ ; в) инжекция e^+ к циркулирующим e^- (40-й оборот)

В сезоне 2017–2018 гг. были получены изображения продольно-вертикального распределения пучка на небольших временах после инъекции в коллайдер (до сотого оборота). Условия эксперимента: энергия пучка 387,5 МэВ; наблюдение велось за электронным пучком.

Были получены изображения, приведенные на рис. 4.

Отмечено, что инъекции пучка при наличии в коллайдере циркулирующего встречного влекут изгиб формы пучка и его наклон, при отсутствии встречного пучка искажения формы отсутствуют (рис. 4) [11].

В сезоне 2018–2019 гг. опыт был повторен уже с повернутой на 90° стрик-камерой, т. е. наблюдалось продольно-горизонтальное распределение частиц в пучке электронов, но уже на энергии 612,5 МэВ на пучок (рис. 5).

На рис. 5, б видны те же эффекты искажения формы пучка при наличии встречного уже в другой плоскости наблюдения. Была проверена повторяемость формы пучка на одном и том же обороте при инъекциях и засняты шесть последующих оборотов (рис. 6).

Видно, что изгиб и искажение происходят достаточно быстро (сравнимо с частотой обращения). Характер такого движения пучков требует дальнейшего исследования и описания теорией. Вероятно, это прямое наблюдение когерентных синхротронных мод встречных сгустков [12, 13] при запредельных значениях параметра встречи.

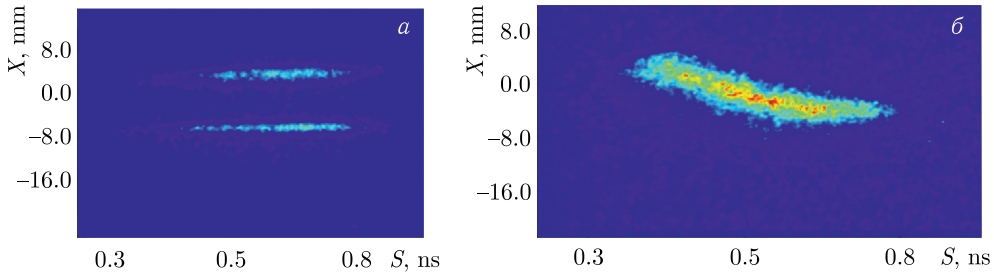


Рис. 5. Стрик-камера (2018–2019 гг.; плоскость $S-X$). а) Инъекция e^- к циркулирующим e^- в отсутствии e^+ (1-й оборот); б) инъекция e^- к циркулирующим e^+ (оборот ~ 30)

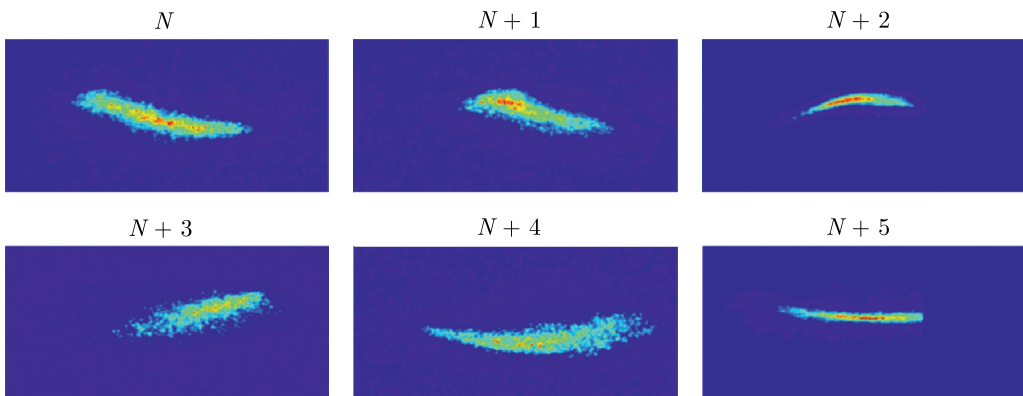


Рис. 6. Последовательные шесть оборотов (N — оборот ~ 30 -го)

ФДЛ

На ВЭПП-2000 испытан прототип нового прибора на основе линейки лавинных фотодиодов, получивший краткое название ФДЛ. СИ пучка, попадая на рабочую поверхность прибора, формирует на ней одномерное сечение поперечного профиля пучка (далее просто профиль). В качестве чувствительного элемента используется продукт компании First Sensor [14] — модуль с 16 фотодиодами с малым временем релаксации, что позволяет производить пооборотную регистрацию профиля пучка в коллайдере [15]. Разработанная электроника позволяет производить запись профиля на 2730 последующих оборотах.

Были сделаны несколько серий измерений поперечных колебаний электронного пучка при инъекции и ударах кикеров по пучку разной амплитуды. Одно из измерений при ударе небольшой амплитуды показано на рис. 7. На каждом обороте данные аппроксимируются функцией Гаусса. В спектрах видны колебания ширины пучка на второй гармонике бетатронной частоты.

После тестирования и определения оптимального масштаба изображения пучков на рабочей области линейки планируется установить четыре модернизированных прибора на коллайдере для регистрации колебаний поперечных и горизонтального, и вертикального профилей обоих пучков. Модернизация будет заключаться в увеличении пооборотной истории с 2730 до $\sim 10^6$ оборотов.

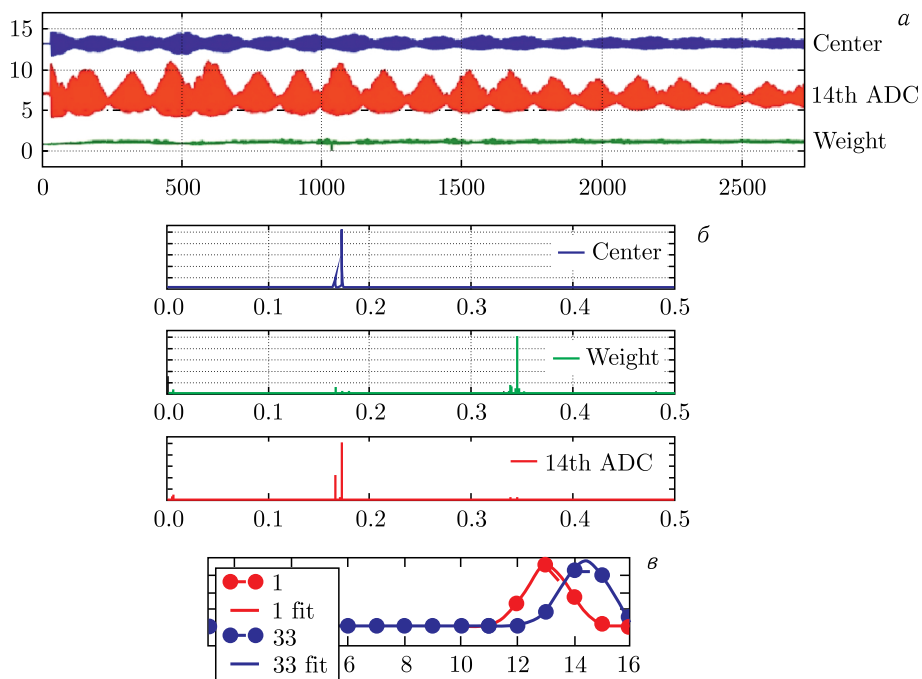


Рис. 7. Результат измерения ФДЛ. а) Осциллограммы колебаний: center — центр масс пучка; weight — ширина пучка; 14th ADC — сигнал с фотодиода № 14; б) соответствующие фурье-спектры; в) примеры профилей на 1-м и 33-м обороте

ПЕРСПЕКТИВЫ

На конец сезона 2018–2019 гг., спустя 9 лет после начала работы, без учета перерыва на модернизацию инжекционной системы, на ВЭПП-2000 набрано уже $2 \times 250 \text{ пб}^{-1}$, что в 5 раз превышает интеграл, набранный ВЭПП-2М за 25 лет работы. По экспериментальным программам детекторов предстоит набрать еще $\sim 1000 \text{ пб}^{-1}$. Согласно инфографике набора интеграла светимости (рис. 8) от сезона к сезону коллайдер работает все эффективнее.

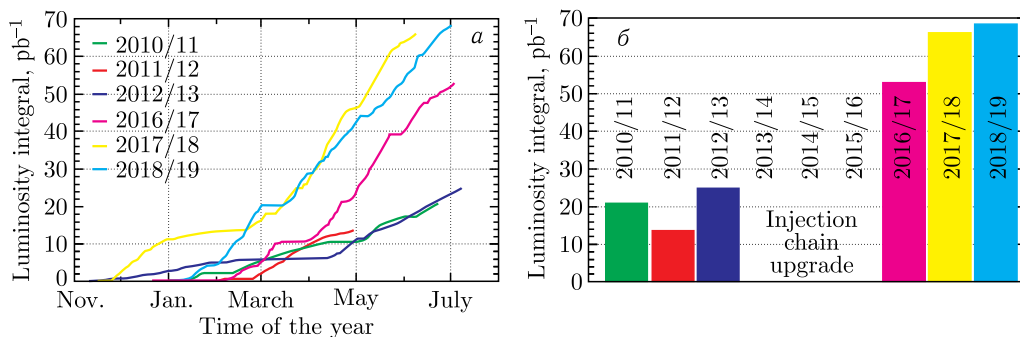


Рис. 8. Набор светимости ВЭПП-2000

Планируется дальнейшая модернизация отдельных систем комплекса в целях повышения надежности и эффективности работы. Это и замена источников питания магнитной системы, и создание криогенной системы дистанционной заправки жидким гелием без ежедневного двухчасового простоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВЭПП-2000 успешно работает на набор данных двумя детекторами во всей проектной области энергий. Идет непрерывная работа по отладке и автоматизации процесса настройки комплекса. Постоянные исследования динамики движения пучков в коллайдере новыми высокотехнологичными инструментами ведут к лучшему пониманию процессов, ограничивающих светимость, и преодолению этих ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левичев Е. Б. и др. Работы со встречными электрон-позитронными пучками в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 461–480.
2. Shatunov Yu. M. et al. Project of a New Electron–Positron Collider VEPP-2000 // Proc. of EPAC'2000, Vienna, Austria, 2000. P. 439–441.
3. Danilov V. V. et al. The Concept of Round Colliding Beams // Proc. of EPAC'96, Sitges, Spain, 1996. P. 1149–1151.
4. Shwartz D. et al. Round Colliding Beams at VEPP-2000 with Extreme Tuneshift // Proc. of eeFACT2018, Hong Kong, China, 2018. P. 34–40; doi:10.18429/JACoW-eeFACT2018-MOYBA01.

5. *Shwartz D. et al.* Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV // Proc. of IPAC'2014, Dresden, Germany, 2014. P. 102.
6. *Abakumova E. V. et al.* A System of Beam Energy Measurement Based on the Compton Backscattered Laser Photons for the VEPP-2000 Electron-Positron Collider // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 744. P. 35–40.
7. *Dimova T. V. et al.* Recent Results on $e^+e^- \rightarrow$ Hadrons Cross Sections from SND and CMD-3 Detectors at VEPP-2000 Collider // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 1991–1996.
8. *Romanov A. L.* Round Beam Lattice Correction Using Response Matrix at VEPP-2000 // Proc. of IPAC'2010, Kyoto, Japan, 2010. P. 4542–4544.
9. *Shwartz D. et al.* VEPP-2000 Collider Operation in Full Energy Range with New Injector // Proc. of RUPAC2018, Protvino, Russia, 2018. P. 7–11.
10. *Гаранин С. Г. и др.* Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок // Квант. электроника. 2014. Т. 44, № 8. С. 798–800.
11. *Borin V. et al.* The Study of Beam-Beam Effects on BINP Electron-Positron Colliders // Proc. of the 10th Intern. Accel. Conf. (IPAC2019), Melbourne, Australia, 2019. P. 2629–2631.
12. *Perevedentsev E. A., Valishev A. A.* Simulation of the Head-Tail Instability of Colliding Bunches // Phys. Rev. Special Topics — Accel. Beams. 2001. V. 4. P. 024403.
13. *Валишев А. А.* Исследование когерентных эффектов взаимодействия встречных пучков и динамической апертуры на накопителе ВЭПП-2М. Дис. . . канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2001.
14. First Sensor APD Array Data Sheet, Part Description 16AA0.13-9 SMD. Order # 3001187. https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/QA4000-10_TO_3001421.pdf.
15. *Meshkov O. et al.* A New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at Electron Storage Ring SIBERIA-2 // J. Instrum. 2016. V. 11, No. 12. P. P12015.