

СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000

*Ю. А. Роговский^{a, б, 1}, Д. Е. Беркаев^{a, б}, И. М. Землянский^a, Ю. М. Жаринов^a,
А. С. Касаев^a, И. А. Кооп^{a, б}, А. Н. Кирпотин^a, А. П. Лысенко^a,
Е. А. Переведенцев^{a, б}, В. П. Просветов^a, А. Л. Романов^a, А. И. Сенченко^a,
А. Н. Скринский^a, П. Ю. Шатунов^a, Ю. М. Шатунов^{a, б}, Д. Б. Шварц^{a, б}*

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

^б Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

ВЭПП-2000 начал свою работу по физике высоких энергий в конце 2010 г. и завершил третий сеанс экспериментальной работы в июле 2013 г. Последний сеанс был посвящен работе в диапазоне энергий 160–510 МэВ в одном пучке. Для измерения энергии пучка использовались методы на основе обратного комптоновского рассеяния, на основе резонансной деполяризации пучка и измерения величины ведущего магнитного поля. Реализованная концепция круглых пучков вместе с точной настройкой орбиты пучка и оптических функций машины позволили достичь рекордной величины светимости $1,2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергии 510 МэВ и средней по заходу величины $0,9 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Полный сдвиг бетатронной частоты от межпучкового взаимодействия, достигнутый при энергии 392,5 МэВ, равен 0,174, что соответствует параметру встречного пучка $\xi = 0,125$ в пересчете на одно место встречи. В настоящее время производится модернизация инжекционной системы для возможности проведения инжекции при максимальной энергии ВЭПП-2000 и устранения существующей нехватки позитронов.

VEPP-2000 began high energy physics experiments in the end of 2010 and finished the third experimental run in July of 2013. The last season was dedicated to the energy range of 160–510 MeV per beam. Compton backscattering based energy measurements were used for the regular energy calibration of the VEPP-2000 together with resonance depolarization and NMR based methods. The concept of the round colliding beams lattice along with the precise orbit and lattice correction yielded the high peak luminosity of $1.2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at 510 MeV with average luminosity of $0.9 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ per run. The total beam-beam tune shift up to 0.174 was achieved in the runs at 392.5 MeV. This corresponds to beam-beam parameter $\xi = 0.125$ per one interaction point. The injection system is currently being upgraded to allow for the injection of particles at the top energy of VEPP-2000 collider and to eliminate the present lack of positrons.

PACS: 29.20.db; 29.27.Fh; 13.66.-a

¹E-mail: rogovsky@inp.nsk.su

ВВЕДЕНИЕ

Коллайдер ВЭПП-2000 является современной установкой для проведения экспериментов по физике высоких энергий, основной задачей использования которой является прецизионное измерение сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны и набор большого интеграла светимости в диапазоне энергий 0,4–2 ГэВ в центре масс [1]. В магнитной структуре кольца реализована концепция круглых пучков [2], которая предсказывает увеличение светимости установки благодаря наличию дополнительного интеграла движения — продольной компоненты момента импульса.

Магнитная структура кольца (рис. 1) состоит из четырех ахроматических поворотов и четырех прямолинейных промежутков, в двух из которых расположены детекторы КМД-3 и СНД вместе с соленоидами финального фокуса, в третьем расположен резонатор, а четвертый используется для инъекции. Фокусирующая система состоит из шести семейств квадрупольных линз (трех фокусирующих и трех дефокусирующих) и сверхпроводящих соленоидов финальной фокусировки. Также предусмотрены три семейства секстипольных линз для коррекции хроматизма, в которых введены дополнительные косоквадрупольные обмотки для коррекции связи. Из-за большой плотности расположения магнитных элементов в кольце все дипольные корректоры (20 горизонтальных и 16 вертикальных) изготовлены в виде дополнительных обмоток в квадрупольных линзах и основных дипольных магнитах. Коллайдер работает в режиме 1 на один слоток.

Система измерения параметров пучка включает: 4 электростатических пикапа с поворотным разрешением для измерения координаты пучка; 16 ПЗС-матриц для регистра-

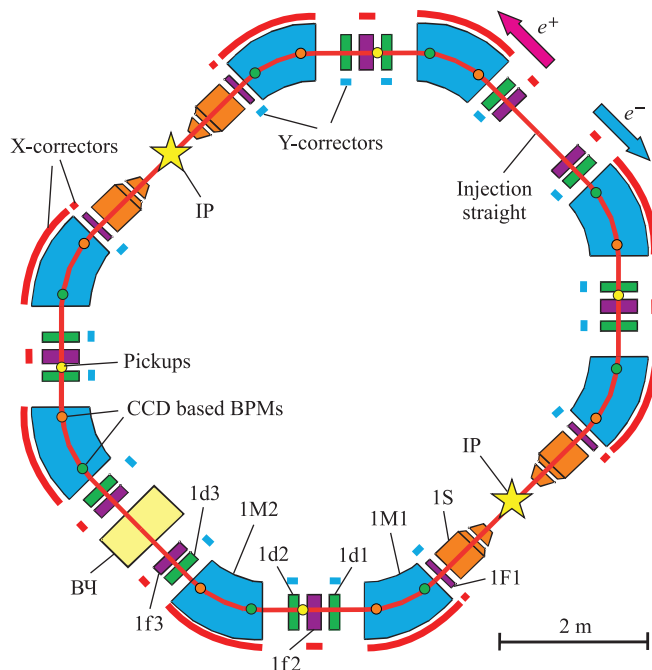


Рис. 1. Общий вид коллайдера ВЭПП-2000

Таблица 1. Параметры ВЭПП-2000 при энергии 1 ГэВ

Периметр C , м	24,388
Частота ВЧ f_0 , МГц	172
Напряжение ВЧ V , кВ	100
Гармоника ВЧ q	14
Коэффициент уплотнения орбиты α_p	0,036
Эмиттанс пучка $\varepsilon_x, \varepsilon_y$, см \cdot рад	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Бетатронные частоты ν_x, ν_y	4,1; 2,1
Бетатронные функции в месте встречи β_x, β_y , см	6,3
Число частиц в пучке N	$1,0 \cdot 10^{11}$
Сдвиг частоты ξ_x, ξ_y	0,075
Светимость L_{\max} , см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{32}$

ции изображения пучка при помощи выведенного из вакуумной камеры синхротронного излучения; 2 ФЭУ для измерения токов обоих встречающихся сгустков; токовый трансформатор для измерения полного циркулирующего тока; 2 диссектора [3] для измерения продольного распределения частиц в обоих сгустках.

Первая инжекция в ВЭПП-2000 произведена в конце 2006 г., для чего была использована так называемая теплая оптика без включения сверхпроводящих соленоидов. Данный режим работы применялся для настройки всех жизненно важных систем коллайдера, а после прецизионной выставки соленоидов в 2010 г. были начаты первые эксперименты с использованием детектора СНД. Основные параметры коллайдера представлены в табл. 1.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ

Одна из основных целей работы ВЭПП-2000 — прецизионное измерение полного сечения рождения адронов во всем диапазоне энергий 0,4–2 ГэВ в центре масс. Для этого требуется знание энергии пучков с относительной точностью лучше 10^{-4} , поэтому на ВЭПП-2000 реализованы несколько различных методов измерения энергии пучков.

Наиболее точный метод измерения абсолютного значения энергии основывается на методе резонансной деполяризации пучка частиц [4]. На ВЭПП-2000 даже небольшие искажения орбиты в сильном продольном поле соленоидов финального фокуса не позволяют по частоте деполяризации определить энергию частиц с достаточной точностью. Поэтому данный метод в основном используется в режиме «теплой» оптики для калибровки остальных, более быстрых, методов измерения. Другим, более надежным, но еще более длительным методом является калибровка абсолютного значения энергии при регистрации детекторами рождения частиц с хорошо известной массой, таких как ϕ -мезон, ω -мезон.

Наиболее быстрым, но наименее точным является метод, основанный на экспериментальной зависимости магнитного поля от тока в обмотках дипольных магнитов. Данный метод дает точность порядка 1 МэВ и используется для грубой оценки величины энергии. Метод измерения магнитного поля с помощью датчиков ЯМР в каждом поворотном

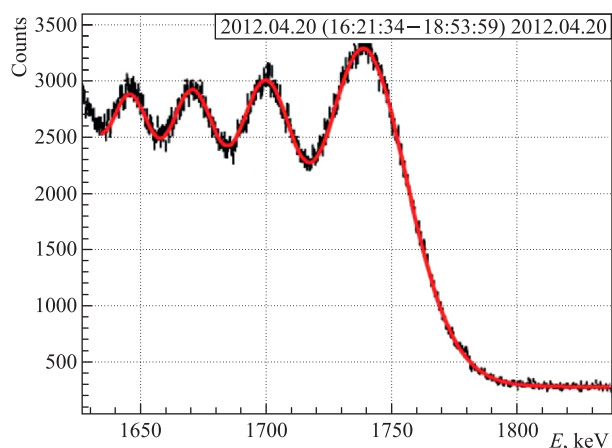


Рис. 2. Типичный энергетический спектр фотонов комптоновского рассеяния. Измеренная величина энергии ($993,662 \pm 0,016$) МэВ

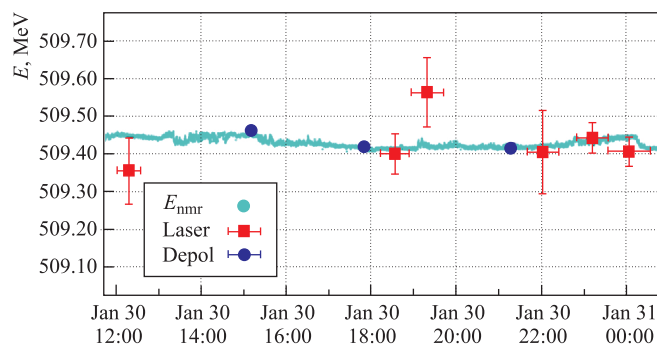


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Сравнение методов измерения энергии: синие кружки — резонансная деполяризация; красные квадраты — комптоновское рассеяние; светло-синяя кривая — измерение ЯМР-датчиками

магните требует тщательного учета наличия дипольных коррекций вдоль всего кольца. Статистическая ошибка данного метода порядка $0,2 \cdot 10^{-4}$, хотя систематическая ошибка остается довольно высокой: $\sim 10^{-3}$.

Измерение энергии, основанное на обратном комптоновском рассеянии [5] лазерного излучения на встречном пучке частиц, является основным методом. Излучение лазера рассеивается на пучке электронов внутри дипольного магнита, а энергетический спектр отраженных назад фотонов регистрируется с помощью германиевого детектора. Малая протяженность взаимодействия приводит к снижению потока фотонов по сравнению со случаем рассеяния в прямолинейном промежутке, а также влияет на форму края энергетического спектра комптоновских фотонов (рис. 2), который используется для вычисления величины энергии. Детальное сравнение методов измерения энергии (рис. 3) произведено в январе 2013 г. в специальном режиме «теплой» оптики с выключенными соленоидами.

НАСТРОЙКА СВЕТИМОСТИ

В последнем сеансе ВЭПП-2000 работал при низких (менее 500 МэВ) энергиях. В начале сеансов 2012–2013 гг. была проведена тщательная механическая выставка элементов магнитной структуры кольца, в частности сверхпроводящих соленоидов финального фокуса, что позволило минимизировать токи дипольных коррекций, конструктивно выполненных в виде дополнительных обмоток в квадрупольных линзах. Такие коррекции дают значительную нелинейную составляющую магнитного поля и существенно уменьшают динамическую апертуру в случае их чрезмерного использования. Развитые на комплексе ВЭПП-2000 методы коррекции замкнутой орбиты и оптики машины [6–8] позволили в значительной степени минимизировать эти эффекты и, таким образом, получить хорошие результаты в последнем сеансе. Рис. 4 показывает полученную светимость в экспериментальных заходах в сравнении с предсказаниями. Синяя пунктирная линия соответствует случаю неизменной оптики в месте встречи: $\beta^* = \text{const}$; $\varepsilon \propto \gamma^2$; $L \propto \gamma^4$. Красная пунктирная линия соответствует вариации оптики, при которой достигается максимальная эффективность: $\beta^* \propto \gamma$; $\varepsilon \propto \gamma$; $L \propto \gamma^2$. Красные линии отражают гипотетический выигрыш в светимости при низкой энергии при использовании лишь части обмоток секционированного соленоида. К сожалению, такие опции, доступные лишь в области низких энергий, сопровождаются сложностями с динамической апертурой.

Энергия пучков в ВЭПП-2000 в последнем сеансе опускалась вниз вплоть до 160 МэВ, что является рекордом для современных электрон-позитронных коллайдеров. Полный интеграл светимости (рис. 5) сравним с аналогичной величиной при работе ВЭПП-2000 при высокой энергии в прошлых сеансах.

На комплексе ВЭПП-2000 ведется постоянная работа по оптимизации и повышению светимости во всем диапазоне энергий, для чего модифицируются существующие и разрабатываются новые методы для контроля параметров пучков и настройки ВЭПП-2000. Однако тонкая настройка машины (бетатронная частота, орбита, хроматизм, оптические функции в месте встречи, максимальная удельная светимость) практически всегда уни-

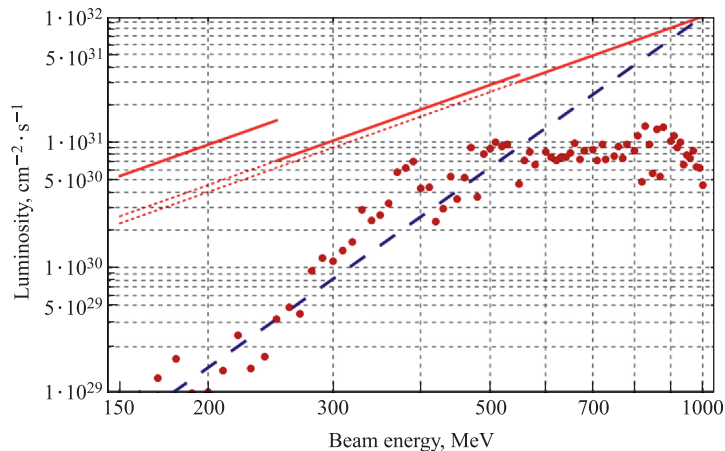


Рис. 4. Зависимость светимости от энергии: линиями показаны оценки светимости; точками — лучшая светимость в экспериментальных заходах детектора КМД за все время работы ВЭПП-2000

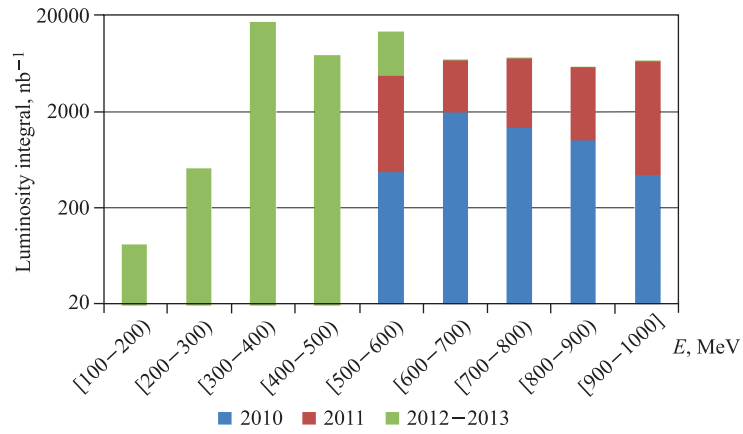


Рис. 5. Интеграл светимости в экспериментальных заходах детектора СНД за все время работы ВЭПП-2000

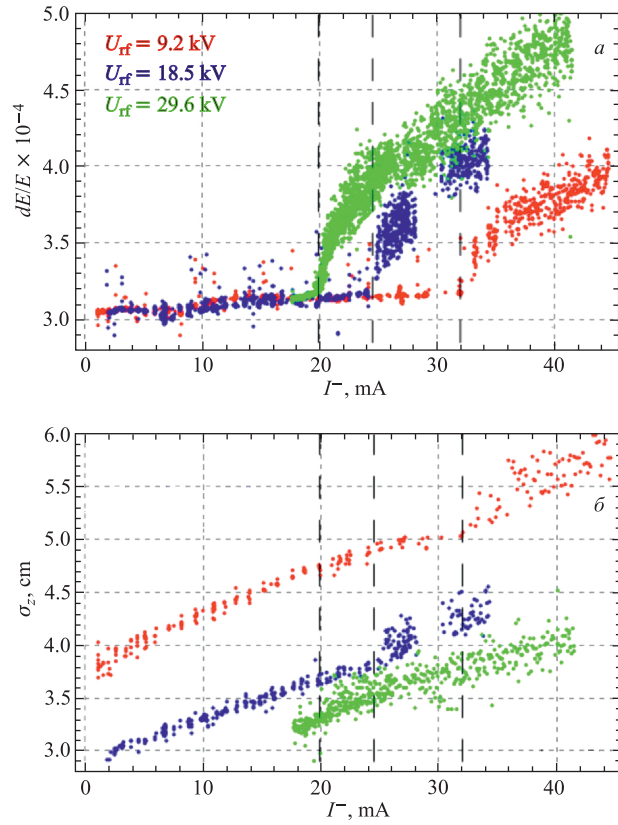


Рис. 6. Корреляция между энергетическим разбросом (а) и длиной пучка (б) в зависимости от интенсивности сгустка

кальна и проводится вручную. В 2012–2013 гг. разработаны методы для оперативного измерения светимости коллайдера, основанные на определении размеров циркулирующих пучков вдоль всего кольца и последующем их приведении к месту встречи. С помощью диссекторов, установленных в 2013 г., производили измерение длин встречающихся сгустков с точностью порядка 2 мм. Новые возможности диагностики позволили обнаружить микроволновую неустойчивость сгустков в ВЭПП-2000. Ее порог, как и длины сгустков, контролируются выбором ускоряющего напряжения (рис. 6).

В середине 2013 г. тщательная настройка оптики кольца вместе с управлением длиной сгустка позволили достичь предельного значения параметра встречного пучка $\xi = 0,125$ в пересчете на одно место встречи, что соответствует наблюдаемому сдвигу частоты $\Delta\nu = 0,175$ между σ - и π -модами колебания пучка. Этот результат был получен во время одного из экспериментальных заходов при энергии столкновения 392,5 МэВ пучков большой интенсивности.

ПЛАНЫ МОДЕРНИЗАЦИИ

Низкая производительность инжектора ограничивала светимость ВЭПП-2000 с самого начала экспериментальной работы. Особенно остро это проявлялось при высоких энергиях, хотя в последнем сезоне, вследствие хорошей настройки машины, нехватка позитронов наблюдалась и в области средних, а также низких энергий, где время жизни пучка в коллайдере резко снижается из-за внутрисгусткового рассеяния. Поэтому ближайшие перспективы повышения светимости коллайдера ВЭПП-2000 связаны с использованием интенсивных пучков нового инжекционного комплекса ВЭПП-5. Было принято решение о модернизации комплекса ВЭПП-2000, которая включает: отказ от существующей инжекционной части; использование канала (длиной более 200 м) для транспортировки пучков электронов и позитронов от инжекционного комплекса к бустеру БЭП; модернизацию бустера БЭП для работы при полной энергии до 1 ГэВ; модернизацию каналов транспортировки пучков от бустера к ВЭПП-2000 и доработку отдельных узлов кольца ВЭПП-2000. Сравнение параметров старой и новой инжекционных систем приведено в табл. 2.

Таблица 2. Параметры старой и новой инжекционных систем

Параметр	Текущее значение	Новое значение
Скорость накопления электронов, шт./с	10^9	10^{11}
Скорость накопления позитронов, шт./с	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$
Максимальная энергия бустера, МэВ	825	1000
Энергия инжекции в бустер, МэВ	125	500
Частота инжекции в бустер, Гц	0,7	12,5

Вместо постройки нового бустера было принято решение о модификации существующего кольца БЭП (рис. 7). Требование сохранения геометрии установки вместе с потребностью работы при энергии 1 ГэВ наложило жесткие требования на величины магнитных

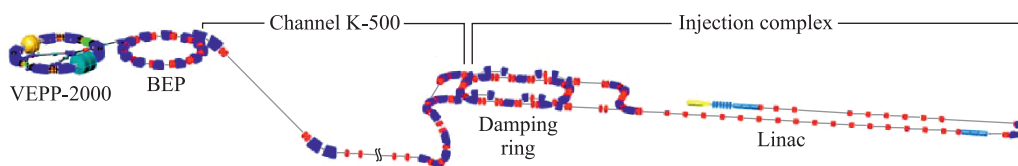


Рис. 7. Общий вид комплекса ВЭПП-2000 после модернизации

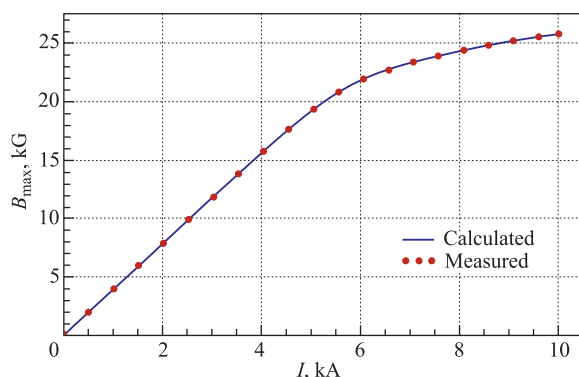


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Зависимость магнитного поля от тока для модернизированного магнита бустера БЭП: красные точки — измеренные значения; синяя линия — расчетная кривая

полей и градиентов в линзах, а также условие быстроциклической работы с подъемом ведущего поля вплоть до 26 кГс. Основные магниты модифицируются с целью уменьшения зазора между полюсами путем установки накладок на полюса. В квадрупольных линзах также уменьшается зазор между полюсами и меняется их форма для увеличения секступольной компоненты магнитного поля. Вакуумная камера модифицируется прессованием в соответствующих местах. В кольцо бустера устанавливается новый резонатор и новые импульсные элементы для организации впуска-выпуска пучков.

В 2013 г. изготовлен прототип магнита для бустера и проведены магнитные измерения, результаты которых (рис. 8) показывают достижение требуемых параметров. В настоящее время изготавливаются прототипы квадрупольных линз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитые на комплексе ВЭПП-2000 методы прецизионной выставки магнитных элементов, коррекции орбиты пучка и оптических функций машины вместе с управлением длиной сгустка и тщательной ручной подстройкой позволили достичь предельных в настоящее время возможностей ВЭПП-2000. Вместе с тем стало понятно, что основные ограничения вызваны не только недостаточной производительностью инжектора, но и устаревшей инжекционной частью комплекса. Для достижения проектной светимости и долговременной работы ВЭПП-2000 с высокой производительностью требуется полная модернизация всей инжекционной части, которая началась в июле 2013 г.

Среди достижений на ВЭПП-2000 за последние годы можно выделить следующие:

- набор интеграла светимости производился при нижней энергетической границе e^+e^- -коллайдеров при энергии пучка вплоть до 160 МэВ;
- полный набранный интеграл светимости в диапазоне энергий пучка 160–1000 МэВ составил 64 пб^{-1} на один детектор;
- достигнутое во время работы предельное значение параметра встречного пучка $\xi = 0,125$ является рекордным для e^+e^- -коллайдеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu. M. et al.* Project of a New Electron-Positron Collider VEPP-2000 // Proc. of the 7th Eur. Part. Accel. Conf. (EPAC 2000), Vienna, 2000. P. 439–441.
2. *Danilov V. V. et al.* The Concept of Round Colliding Beams // Proc. of the EPAC 1996, Sitges, 1996. V. 2. P. 1149.
3. *Zinin E.* PhD Thesis. Budker Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk, 1984 (in Russian).
4. *Shatunov Yu., Skrinsky A.* // Phys. Lett. B. 1987. V. 198. P. 302.
5. *Abakumova E. V. et al.* Backscattering of Laser Radiation on Ultra-Relativistic Electrons in Transverse Magnetic Field: Evidence of Photon Interference in a MeV Scale // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 140402.
6. *Romanov A. L. et al.* Round Beam Lattice Correction Using Response Matrix at VEPP-2000 // Conf. of Proc. IPAC2010. 2010. THPE014.
7. *Safranek J.* Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. P. 388. P. 27.
8. *Sajaev V. et al.* // Proc. of PAC'05, Knoxville, Tennessee, 2005. P. 3662–3664.