

e^+e^- ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ В НОВОСИБИРСКЕ. СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПЛАНЫ

И.Я. Протопопов
Институт ядерной физики СО АН СССР
Новосибирск, 630090

Программа физических экспериментов на встречных пучках в Новосибирске основывается на установках ВЭПП-4 с энергией пучков до 2×6 ГэВ и ВЭПП-2М с энергией до 2×0.7 ГэВ.

Накопительное кольцо ВЭПП-2М со встречными электрон-позитронными пучками уже многие годы продолжает оставаться единственной в мире установкой, на которой ведутся эксперименты в диапазоне энергий от 2×160 МэВ до 2×700 МэВ. Ранее в этой области сравнительно низких энергий работали самые первые установки со встречными электрон-позитронными пучками АСО (Орсэ, Франция) и ВЭПП-2 (Новосибирск, СССР). ВЭПП-2М превзошел их по светимости более, чем на порядок.

С момента начала регулярных экспериментов в конце 1974 года на ВЭПП-2М поочередно работали шесть детекторов. За это время набран интеграл светимости 20 обратных пикобарн. Пиковые значения светимости менялись при этом от нескольких единиц на $10^{28} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на самых малых энергиях до $3 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при работе выше 500 МэВ.

Стоит, пожалуй, кратко упомянуть основные моменты, отличающие ВЭПП-2М от других установок со встречными пучками.

ВЭПП-2М является весьма компактным ускорителем, в основном, за счет того, что места встречи с малой вертикальной β -функцией организованы внутри

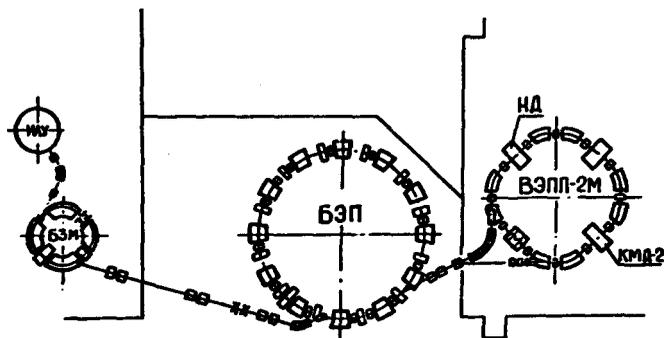


Рис. 1. Схема накопителя ВЭПП-2М.

элементарной ячейки фокусирующей структуры (рис. 1). Четырехкратная симметрия магнитной системы позволила максимально приблизить рабочую точку накопителя $\nu_z = 3.08$, $\nu_x = 3.06$ к целым резонансам с тем, чтобы заведомо отстроиться от нелинейных резонансов ниже 6-го порядка. В результате, на ВЭПП-2М в режиме равных встречных токов в области энергий Φ -мезона достигнуты высокие значения параметров пространственного заряда $\xi_z = 0.050$, $\xi_x = 0.020$. Величина вертикальной β -функции в местах встречи может варьироваться в пределах от 3 до 10 см. Инжекция пучков осуществляется в режиме $\beta_z^* = 6$ см, затем за несколько секунд происходит переход в режим с более высокой светимостью, соответствующий $\beta_z^* = 3$ см.

В 1984 году на ВЭПП-2М была установлена сверхпроводящая змейка² с максимальным полем 75 кГс.

Наибольший выигрыш в светимости планировалось получить в районе 500 МэВ, интересных с точки зрения изучения СР-нарушения в распадах нейтральных K -мезонов, рождающихся в Φ -пике на энергии 510 МэВ. Пятикратное увеличение светимости предполагалось реализовать за счет увеличения в 5 раз радиального эмиттанта пучка и соответствующего увеличения числа частиц в сгустках. Ожидалось также, что существенное возрастание декрементов радиационного затухания повлечет за собой некоторое увеличение предельных по эффектам встречи параметров пространственного заряда ξ_z , ξ_x , что позволило бы дополнительно повысить токи встречных пучков. Однако, на сегодняшний день достигнуто только трехкратное увеличение светимости в области энергий Φ -мезона.

Накоплению больших токов препятствует возникающая при этом неустойчивость, проявляющаяся в возникновении когерентных двухпучковых фазовых колебаний. Порог неустойчивости нестабилен и зависит от многих факторов, таких, как настройка выходных каскадов ВЧ-генератора, расстройка основного резонатора, положения механизмов перестройки высших мод и т. д. В ближайшее время планируется поднять мощность ВЧ-генератора и осуществить меры по подавлению двухпучковой фазовой неустойчивости.

Несколько другая ситуация наблюдается в области энергий 2×250 МэВ. Здесь порог возбуждения двухпучковой фазовой неустойчивости оказался несколько выше предела по эффектам встречи, что позволило получить выигрыш в максимальной светимости за счет змейки в 7 раз. При этом значение параметра пространственного заряда ξ_z возросло на 30% по сравнению с вариантом работы без змейки. Этот результат дает основание надеяться на восьмикратное увеличение светимости в области энергий Φ -мезона в случае успешного решения проблем с когерентной двухпучковой фазовой неустойчивостью.

Дальнейшему повышению светимости накопителя ВЭПП-2М препятствует также недостаточная скорость накопления позитронов. Это можно было бы избежать с вводом в строй накопителя-охладителя БЭП³. Он обеспечит примерно в 5 раз более высокую по сравнению с ВЭПП-2 скорость накопления позитронов и заменит его в качестве бустера для установки ВЭПП-2М. Возрастет также максимальная энергия инжекции пучков в ВЭПП-2М с 550 до 700 МэВ. Весь этот комплекс мер позволит выйти на уровень светимости $5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на максимальной энергии.

Значительная часть времени работы накопителя ВЭПП-2М выделялась на проведение экспериментов с поляризованными пучками. Здесь впервые нашел применение использованный впоследствии на ВЭПП-4 метод резонансной деполяризации пучков. Он использовался, в частности, для определения энергии в прецизионных экспериментах с измерением масс K -мезонов. С точностью 10^{-7} проведено сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона. Выполнены эксперименты по измерению степени поляризации

методом обратного комптоновского рассеяния ондуляторного излучения от встречного пучка, для чего был создан сверхпроводящий спиральный ондулятор с полем 4.7 кГс при шаге 2.4 см.

Эксперименты на комплексе ВЭПП-4^{4,5} были начаты в 1980 году. В течение 1980—1985 годов (до остановки комплекса 16 августа 1985 года) был набран интеграл светимости около 30 обратных пикобарн, основная часть которого была получена в последние годы (рис. 2). За это время на комплексе ВЭПП-4 были проведены цикл экспериментов по прецизионному измерению масс Ψ^- , Ψ'^- , Υ^- , Υ'^- , Υ''^- -мезонов^{6,7} и по

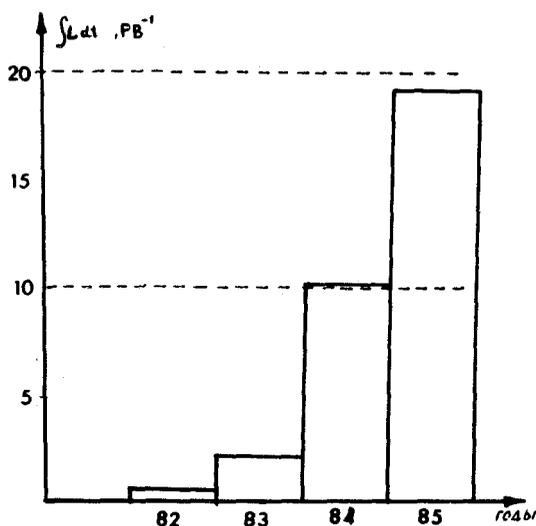


Рис. 2. Интеграл светимости ВЭПП-4.

двухфотонной физике, подробное сканирование области энергий от 2×3.5 ГэВ до 2×5.5 ГэВ, измерение спиновой поправки к синхротронному излучению, разработаны методы измерения поляризации пучка с использованием синхротронного излучения от встречного пучка, лазерным поляриметром и др.⁸

Параллельно программе по физике высоких энергий велись работы с использованием обратного-рассеянных фотонов в ядерной физике⁹ и прикладному использованию синхротронного излучения.

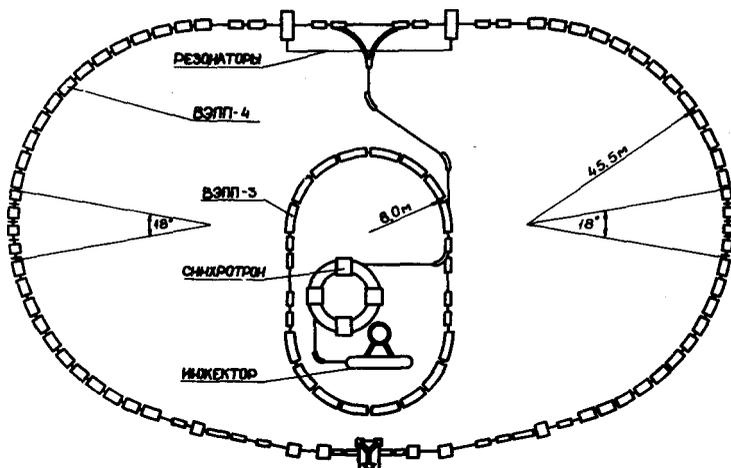


Рис. 3. Схема комплекса ВЭПП-4.

Общая схема ВЭПП-4 представлена на рис. 3. Инжекционная система комплекса включает в себя линейный ускоритель, возбуждаемый от импульсного

гирокона, синхротрон с энергией 350 МэВ и бустерный накопитель ВЭПП-3 с энергией 2.2 ГэВ. Позитроны с энергией 7 МэВ образуются конверсией 50 МэВ-ных электронов на выходе линейного ускорителя. Частота циклов инжекции в ВЭПП-3—один герц. Такая система инжекции обеспечивает скорость накопления позитронов в ВЭПП-4 более 0.5 мА/мин.

Основное кольцо периметром 366 м состоит из двух полуколец (структура ФОДО) и двух промежутков. Один промежуток длиной 40 м предназначен для системы инжекции и ускоряющих резонаторов, в другом организовано место встречи пучков с малой β_z -функцией. Работа ведется в режиме по одному сгустку электронов и позитронов, пучки в противоположном месте встречи разведены с помощью электрических диполей.

Экспериментальный промежуток удлинен до 55 м за счет крайних элементов периодичности. Недостающий поворот в 18 градусов осуществляется в центре промежутка магнитным детектором МД-1.

Параметры пучка—дисперсионная, β -функции и их производные—были одинаковы на концах прямолинейных промежутков, т. е. оптическая схема ВЭПП-4 не обладала зеркальной симметрией. В то же время организация места встречи пучков с малой β -функцией требовала зеркально-симметричных решений оптики экспериментального промежутка. Поэтому часть длины промежутка занимала специальная симметризирующая схема.

Раздельное питание квадрупольных линз позволяло менять оптические свойства промежутка, плавно изменяя токи в линзах. Это требовалось для осуществления перестройки β_z -функции в месте встречи от значения $\beta_z = 45$ см до значения $\beta_z = 12.5$ см. Перестройка проводилась при наличии в накопителе циркулирующих пучков обоих знаков.

Главной особенностью экспериментального промежутка ВЭПП-4 был детектор МД-1 с вертикальным магнитным полем¹⁰. Этот детектор был специально ориентирован на изучение двухфотонных процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$ и имел хорошую точность измерения энергий рассеянных электронов и высокую эффективность их регистрации (рис. 4)¹¹. Рекордные в этой области параметры были получены на детекторе за счет длинного участка в месте встречи, занятого самим де-

тектором МД-1 и двумя дополнительными магнитами ДМ-1 и ДМ-2.

В такой схеме мы были вынуждены расположить

квадрупольные линзы, формирующие в области взаимодействия пучков малые значения β -функций, на значительном расстоянии от места встречи. Для компенсации хроматизма, возникающего в районе этих линз, здесь же были размещены секступольные линзы. Так

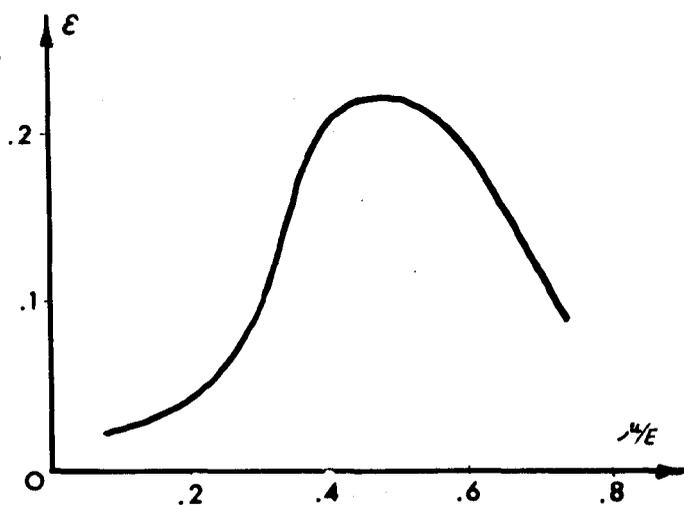


Рис. 4. Эффективность регистрации двухфотонных процессов на МД-1.

как эти линзы располагались симметрично справа и слева от места встречи и находились относительно

ных и горизонтальных бетатронных колебаний, то их включение практически не приводило к усилению резонансов третьего порядка. Работа с сильными секступольными линзами требовала особой аккуратности. Малейшее вертикальное искажение орбиты приводило к появлению на оси секступолей skew-квадрупольной компоненты, которая сказывалась на настройке режима встречи пучков. Для устранения этого эффекта было сделано измерение положения вертикальной орбиты в районе места встречи по синхротронному излучению из МД-1 с точностью 1 мкм по координате и 0.01 мрад по углу. Данные об орбите использовались для автоматической стабилизации орбиты в районе места встречи¹².

Наличие одного места встречи пучков на обороте позволило выбрать рабочую точку вблизи параметрических резонансов ($\nu=8.53$, $\nu=9.57$). Это оказалось удобным во многих отношениях. Во-первых, мы максимально далеко отстроились от целого резонанса, что сразу же сделало слабыми всякого рода возмущения. Во-вторых, пропали синхробетатронные сателлиты целого резонанса, что существенно для оптики ВЭПП-4, где в резонаторах имелась ненулевая ψ -функция. В-третьих, рядом с параметрическими резонансами отсутствуют нелинейные бетатронные резонансы низкого порядка, опасные с точки зрения эффектов встречи. Это позволило получить большую (по сравнению с другими установками) величину линейного сдвига частот $\xi_z^{\max}=0.05 \div 0.06$. Перестройка структуры промежутка от режима накопления к режиму эксперимента позволила уменьшить величину вертикальной β -функции до 12.5 см и достичь светимости $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (рис. 5).

Были проведены эксперименты по изучению различных факторов («машинная» нелинейность, точность сведения орбит и др.) на величину светимости¹³. Полученные результаты позволили оптимизировать ре-

жим работы накопителя. Поддержание максимальной светимости требовало тонкой регулировки многих параметров. Для работы в области энергий 2×5 ГэВ необходимы токи 2×10 мА. Первоначально получение таких токов было затруднено из-за низкой энергии инжекции когерентными неустойчивостями. После устанавки двух трехполюсных змеек, уменьшивших время затухания и увеличивших фазовый объем пучка, порог по неустойчивостям поднялся до токов свыше 20 мА. Были приняты также специальные меры по подавлению продольных неустойчивостей.

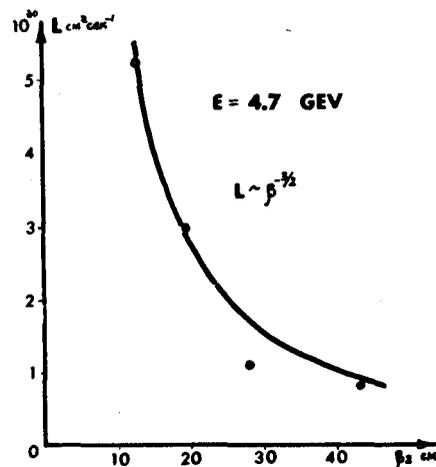


Рис. 5. Светимость накопителя ВЭПП-4.

Модернизация накопителя ВЭПП-4 должна быть завершена к 1989 году, когда закончится строительство первой очереди нового детектора. За этот период времени запланировано провести ряд крупных мероприятий по усовершенствованию накопителя.

В первую очередь мы собираемся сделать кольцо зеркально-симметричным относительно оси, проходящей через середины прямолинейных промежутков. Для этого магниты элементов периодичности в одном полукольце поворачиваются в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси на 180 градусов, т. е. переворачиваются «вверх ногами». Фокусирующий и дефокусирующий магниты меняются местами. В результате получается зеркально-симметричное расположение элементов периодичности в полукольцах и прямолинейные промежутки с обеих сторон начинаются с одного и того же места элемента периодичности. Принято также решение сделать доработку магнитного блока элемента периодичности: в поворотном магните на длине 30 см уложить токовый виток, формирующий на орбите квадратичное поле. Это решение вызвано опасениями, связанными с возможностью радиационного разрушения имеющейся обмотки в линзовой части магнита. Решено заменить имеющиеся пикап-электроны на новые, более компактные, в которых устранены конструктивные резонансы, возбуждаемые пучком. Одновременно будут трикрыты конструктивные полости и сильфоны, что, как ожидается, должно улучшить гладкость камеры.

Вторым крупным мероприятием является подготовка двухсгусткового режима работы. Для этого два элемента периодичности в центре каждого полукольца заменяются новой магнитной структурой, названной вставкой, включающей в себя четыре диполя и четыре

квадрупольные линзы. Эта структура фактически является другим исполнением двух элементов периодичности. Отличие состоит в том, что линзы и магниты вставки будут существенно короче, чем в стандартных элементах периодичности, а апертура больше. По всей длине магнитов вставки предполагается разместить электростатические пластины для организации вертикального разведения пучков на участке вставки.

Пустые промежутки вставок планируется использовать для размещения дополнительного оборудования — змеек, ондуляторов. Змейки должны быть многофункциональными: обеспечивать увеличение эмиттанса пучков, уменьшать время поляризации, давать мощные потоки СИ—синхротронного излучения. Специально для экспериментов с СИ в направлениях, касательных к траектории пучка во вставках, планируется построить два бункера, в которые будут попадать СИ из магнитов, змеек и ондуляторов.

Изменится оптическая схема технического промежутка. Фокусировка пучка по-прежнему будет осуществляться четырьмя дублетами линз, но поведение β -функций на промежутке улучшится. В районе впускных магнитов пучков вертикальная β -функция увеличивается примерно в 7 раз, что даст возможность при накоплении пучков в схеме с предударом оставлять накопленный пучок на равновесной орбите. Это позволит устранить двухпучковую неустойчивость и наладить режим накопления.

Запланированы изменения в ВЧ-системе. По-прежнему на ВЭПП-4 будут использоваться шесть старых резонаторов на 180 МГц. В збудятся они будут, а также шесть новых генераторов. В окончательном виде это позволит иметь на ВЭПП-4 1 МВт ВЧ-мощности. К 1989 году будет реализована часть проекта, что даст 300 кВт ВЧ-мощности.

Как уже отмечалось, на ВЭПП-4 будет работать новый детектор с продольным полем. В связи с этим оптическая схема экспериментального промежутка полностью видоизменяется. Выбор новой оптики промежутка был нацелен на решение двух задач: обеспечение максимально возможной светимости и обеспечение возможности продолжения работ по двухфотонной физике с регистрацией рассеянных электронов. Оказалось, что решения этих задач, естественно объединяются в оптической схеме промежутка с жесткофокусирующим спектрометром для регистрации рассеянных электронов. Доклад на эту тему представлен на настоящей конференции¹⁴. В новой оптической схеме экспериментального промежутка, за исключением одной пары квадрупольных линз, используются старые квадрупольные линзы.

Оптика экспериментального промежутка обеспечивает фокусировку пучка в месте встречи со значениями β -функций: $\beta_x^* = 5$ см, $\beta_z^* = 90$ см. В предположении, что максимальные значения параметра пространственного заряда окажутся прежними ($\xi_{z,z} = 0.05$), уменьшение β -функций в месте встречи по сравнению со старыми значениями даст существенный выигрыш светимости. График проектной светимости ВЭПП-4 в двухсгустковом режиме работы в области энергий до 6 ГэВ показан на рис. 6 (кривые 1 и 2).

Резервом увеличения светимости является укорочение длины сгустка. Для этого разрабатывается сверхпроводящая ВЧ-структура высокой кратности, которая будет работать в пассивном режиме и фокусировать пучок в продольном направлении наведенным самим пучком напряжением. Ожидается, что таким способом

можно будет укоротить сгусток на ВЭПП-4 до размеров меньше $\sigma_l = 2$ см, что позволит еще уменьшить β_z в месте встречи. График светимости для $\beta_z^* = 2.5$ см также приведен на рис. 6 (кривая 3). Видно, что в этом случае в области энергий γ -резонансов светимость на ВЭПП-4 может быть близкой к 10^{22} см⁻² с⁻¹.

В настоящее время бустерный накопитель ВЭПП-3 практически восстановлен, предусмотрены меры улучшения его работы, в частности, для накопления одновременно двух сгустков частиц введена вторая гармоника частоты обращения вместо существовавшей ранее первой.

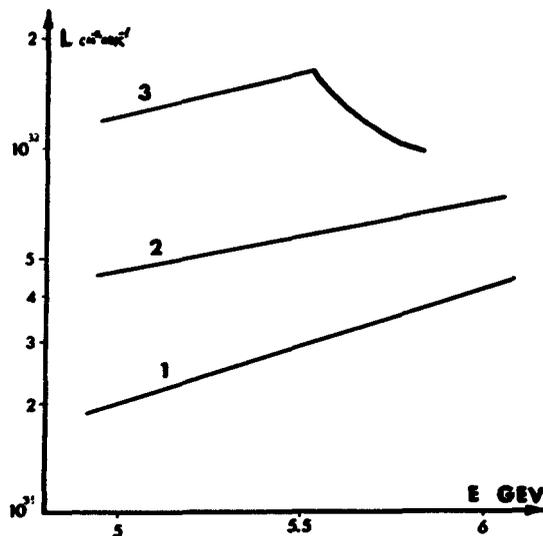


Рис. 6. Проектная светимость ВЭПП-4М: 1—естественный эмиттанс пучка, 2—режим со змейками, $\beta_z^* = 5$ см, 3—режим со змейками, $\beta_z^* = 2.5$ см.

На период реконструкции кольца ВЭПП-4 на ВЭПП-3 предусмотрена самостоятельная программа работ. На нем будут продолжаться работы с синхротронным излучением и исследования оптического клистрона. Установлена аппаратура для экспериментов по измерению формфактора дейтона по асимметрии рассеяния электронов на тензорно-поляризованной дейтоновой мишени. Часть экспериментов по ядерной физике, проводившихся ранее на ВЭПП-4, будет поставлена на ВЭПП-3.

Литература

1. Будкер Г.И. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц.—М., 1973, т.1, с.318.
2. Anashin V.V. et al. The 75 kGs Superconducting Wiggler Magnet for the e^+e^- Storage Ring VEPP-2M, INP.—Preprint 84-124. Novosibirsk, 1984.
3. Anashin V.V. et al. Damping Ring for e^+e^- BEP, INP.—Preprint 84-114, Novosibirsk, 1984.
4. Протопопов И.Я. Труды 10 Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий.—Протвино, 1977, с.421—430.
5. Skrinsky A.N. Proc. XII Intern. Conf. of High Energy Accel., Batavia, 1983, p.235—239.
6. Kurdadze L.M. et al. Phys. Lett., 96B (1980) p.214—217.
7. Artamonov A.S. et al. Phys. Lett., 137B (1984), p.272.
8. Belomestnyh S.A. et al. Proc. XII Intern. Conf. of High Energy Accel., Batavia, 1983.
9. Казаков А.А. и др. Электромагнитные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях. Труды 6-го семинара ИЯИ, 1984.—М., с.261—270.
10. Бару С.Е. и др. Препринт ИЯФ 77-75. Новосибирск, 1977.
11. Бару С.Е. и др. III Межд. конф. по методике экспериментов на встречных пучках. Новосибирск, 1984, с.262.
12. Blinov A.E. et al. Nucl. Instr. Meth. v.A241, N 1, p.80.
13. Темных А.Б. Труды настоящей конференции.
14. Бондарь А.Е. и др. Труды настоящей конференции.