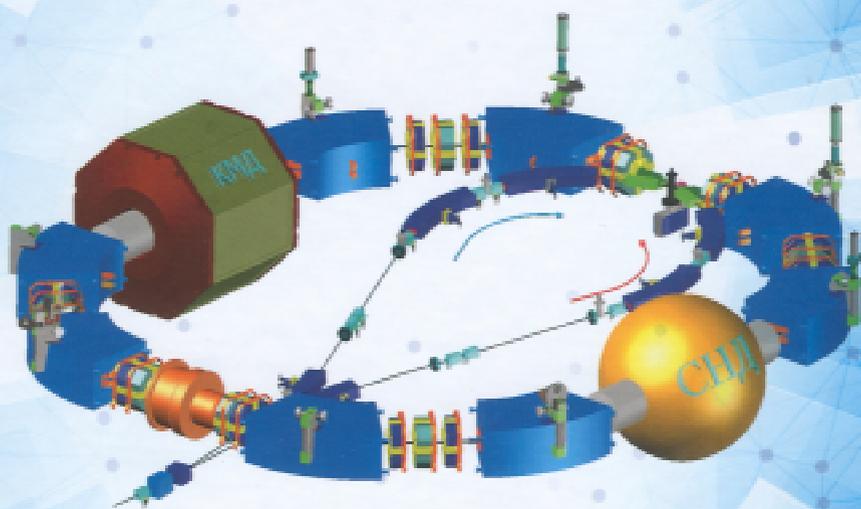


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. БУДКЕРА СО РАН

# КОЛЛАЙДЕРЫ и ДЕТЕКТОРЫ в ИЯФ СО РАН



НОВОСИБИРСК

**КОЛЛАЙДЕРЫ  
И ДЕТЕКТОРЫ  
В ИЯФ СО РАН**



УДК 539.1  
ББК 22.38

Коллайдеры и детекторы в ИЯФ СО РАН

Научное издание

А.Н. Скринский – главный редактор, академик

Редакционная коллегия:

П.В. Логачев – академик, Г.Н. Кулипанов – академик, А.Е. Бондарь – чл.-корр.,  
Ю.А. Тихонов – чл.-корр., Ю.М. Шатунов – чл.-корр., Е.Б. Левичев – д.ф.-м.н.,  
С.И. Середняков – д.ф.-м.н., А.П. Онучин – д.ф.-м.н., Г.М. Тумайкин – д.ф.-м.н.,  
В.В. Петров – к.ф.-м.н., В.А. Таюрский – к.ф.-м.н.

ISBN 978-5-8042-0613-1

Предлагаемая читателю книга посвящена изложению истории создания установок со встречными пучками и детекторов для них в ИЯФ им. Г.И. Будкера. Отражено развитие в течение 60 лет коллайдеров и детекторов от простейших по нынешним представлениям установок до современных, крупномасштабных, для управления которыми используется могучий арсенал электронной и компьютерной техники. Дано описание основных экспериментов по ускорительной физике и физике элементарных частиц. Представлен проект коллайдера нового поколения. Книга в первую очередь предназначена молодому поколению физиков и инженеров, избравших свой жизненный путь в создании крупных физических установок и постановке на них экспериментов.

В книге использованы фотографии В.В. Петрова, В.Н. Баева, А.И. Шляхова, Н.Н. Купиной, Д.Б. Шварца, В.П. Просветова, Ю.М. Жаринова и других сотрудников ИЯФ.

ISBN 978-5-8042-0613-1

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	7
<b>ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. КОЛЛАЙДЕРЫ</b>	
Введение. Основные понятия .....	11
<b>Глава 1.</b>	
Г.Н. Кулипанов, Г.М.Тумайкин	
<b>ВЭП-1 – первый коллайдер ИЯФ .....</b>	<b>13</b>
<b>Глава 2.</b>	
В.В. Петров, Г.М. Тумайкин	
<b>ВЭПП-2 – первый электрон-позитронный коллайдер ИЯФ .....</b>	<b>38</b>
<b>Глава 3.</b>	
И.А. Кооп, Г.М. Тумайкин	
<b>Коллайдер ВЭПП-2М .....</b>	<b>63</b>
<b>Глава 4.</b>	
В.В. Петров, Г.М. Тумайкин	
<b>Комплекс ВЭПП-4 .....</b>	<b>88</b>
<b>Глава 5.</b>	
Д.Б. Шварц, Ю.М. Шатунов, Е.А. Переведенцев	
<b>Коллайдер ВЭПП-2000 .....</b>	<b>149</b>
<b>Глава 6.</b>	
Д.Е. Беркаев, Н.С. Диканский, П.В. Логачев, Б.А. Скарбо	
<b>Инжекционный комплекс ВЭПП-5 .....</b>	<b>174</b>
<b>Глава 7.</b>	
Е.Б. Левичев, П.А. Пиминов, Г.М. Тумайкин	
<b>Модернизированный комплекс ВЭПП-4М .....</b>	<b>205</b>
<b>Глава 8.</b>	
Ю.М. Шатунов	
<b>Поляризованные пучки в ИЯФ .....</b>	<b>249</b>
<b>ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ</b>	
<b>Глава 1.</b>	
<b>Детекторы и эксперименты на ВЭП-1 и ВЭПП-2</b>	
1.1. А.П. Онучин	
<b>Первые детекторы в ИЯФ .....</b>	<b>269</b>

1.2. А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков	
<b>Детекторы и эксперименты на ВЭП-1</b> .....	281
1.3. А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков	
<b>Детекторы и эксперименты на ВЭПП-2</b> .....	291
<b>Глава 2.</b>	
<b>Детекторы и эксперименты на ВЭПП-2М</b>	
2.1. Б.А. Шварц, С.И. Эйдельман	
<b>Эксперименты с детектором ОЛЯ</b> .....	302
2.2. Е.П. Солодов	
<b>Эксперименты с использованием ядерной фотоэмульсии</b> .....	308
2.3. Н.М. Рыскулов, Б.И. Хазин	
<b>Эксперименты с детектором КМД</b> .....	311
2.4. В.П. Дружинин	
<b>Детектор НД. Эксперименты 1982–1987 гг.</b> .....	318
2.5. В.П. Дружинин	
<b>Детектор СНД. Эксперименты 1995–2000 гг.</b> .....	327
2.6. Б.И. Хазин	
<b>Эксперименты с детектором КМД-2</b> .....	335
<b>Глава 3.</b>	
В.И. Тельнов	
<b>Детектор МД-1 на ВЭПП-4</b> .....	349
<b>Глава 4.</b>	
В.Е. Блинов, А.П. Онучин, В.А. Таюрский, А.Г. Шамо	
<b>Эксперименты с детектором КЕДР на ВЭПП-4М</b> .....	373
<b>Глава 5.</b>	
<b>Детекторы и эксперименты на ВЭПП-2000</b>	
5.1. В.П. Дружинин	
<b>Эксперименты с детектором СНД (2010–2017)</b> .....	396
5.2. И.Б. Логашенко	
<b>Детектор КМД-3</b> .....	402
<b>Глава 6.</b>	
Б.Н. Шувалов	
<b>К истории автоматизации экспериментов по ФВЭ в ИЯФ</b> .....	410
<b>ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. СЕГОДНЯШНИЙ ВЗГЛЯД В ЗАВТРА</b>	
Е.Б. Левичев, Ю.А.Тихонов	
<b>Супер Чарм-Тау (с-т) фабрика</b> .....	416

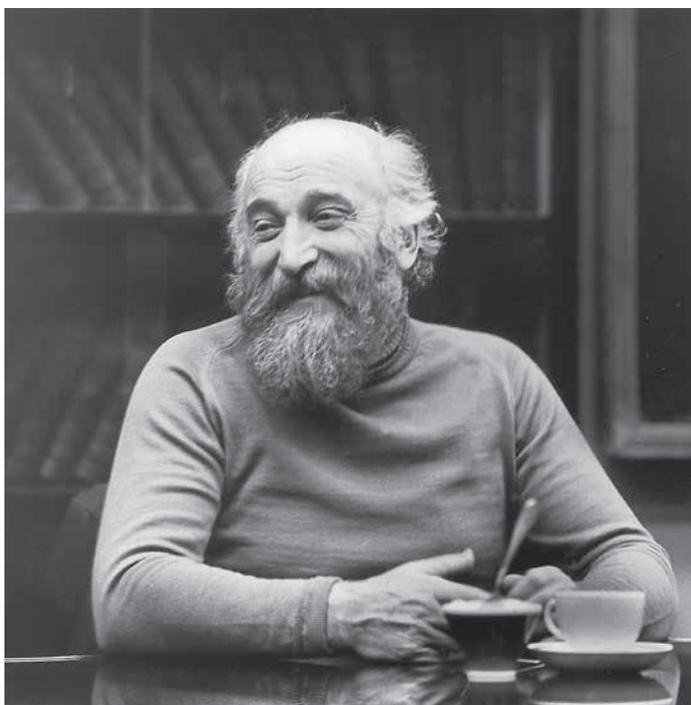
*Не зная прошлого, невозможно понять  
подлинный смысл настоящего и цели будущего.*

*М. Горький*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Это издание подготовлено к 100-летию со дня рождения одного из основателей метода встречных пучков Герша Ицковича Будкера (Андрея Михайловича, как звали его коллеги).

Андрей Михайлович родился 1 мая 1918 года. Перед войной он окончил физический факультет МГУ, прошел всю войну и только после её окончания включился в научную работу в Лаборатории № 2 (ныне Курчатовский институт) по проблемам ядерных реакторов. В последующем его интересы переместились в область ускорителей и физики плазмы, где его работы быстро получили широкую известность. Игорь Васильевич Курчатов поддержал молодого физика и помог ему вначале организовать Лабораторию Новых Методов Ускорения (ЛНМУ), а в последующем – Институт ядерной физики (ИЯФ) в Новосибирске. Идея заняться встречными пучками пришла Андрею Михайловичу в конце 1957 г. ещё в ЛНМУ. С этого времени значительная часть научных интересов Андрея Михайловича была посвящена встречным пучкам, ему вместе с коллегами и учениками удалось реализовать целый букет своих идей и создать новое направление в познании физики элементарных частиц. Фактически им была создана научная школа, которая быстро дала ростки и привела к созданию его учениками новых школ, признанных мировой научной общественностью.



В предлагаемой читателю книге изложена история создания установок со встречными пучками в ИЯФ, дается описание коллайдеров и детекторов и экспериментов (как физических, так и ускорительных), выполненных на них. Можно проследить, как шло развитие коллайдеров и детекторов: от простейших по нынешним представлениям установок до современных, крупномасштабных, для управления которыми используется могучий арсенал электронной и компьютерной техники. В создании этих установок в течение 60 лет (к моменту написания книги) участвовал большой коллектив высококвалифицированных специалистов (физиков, инженеров, конструкторов, программистов и др.), многих из которых уже нет в живых. По мере возможности авторы книги привели фамилии ключевых участников работ как в тексте, так и в большей степени в цитируемой литературе. Естественно оживляют книгу непосредственные воспоминания создателей установок и экспериментаторов и их фотографии.

Авторы старались понятным языком, доступным широкому кругу физиков и инженеров, представить материал, не прибегая к сложным теоретическим выкладкам и расчетам, без которых на самом деле было бы невозможно создание описанных в книге установок и проведение экспериментов. Хотелось, чтобы в первую очередь книгу прочитало молодое поколение физиков и инженеров, избравших свой жизненный путь в создании крупных физических установок и постановке на них экспериментов. Андрей Михайлович всегда стремился привлечь в науку талантливую молодежь. Он был организатором первой сибирской физико-математической олимпиады школьников, одним из организаторов физико-математической школы и Новосибирского университета. В заключение хочется привести одно его высказывание: «...мне кажется, и учителю, и ученику важно помнить, что наука, кроме того, что это и искусство, и поэзия, ещё и ремесло». И действительно, для создания новых коллайдеров и детекторов нужно ещё и ремесло, которое дают, в первую очередь, научная школа и предыдущий опыт.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы слово коллайдер стало знакомо не только физикам, но и широкому кругу людей, не имеющих никакого отношения к науке. Эксперименты на коллайдерах за последние десятилетия стали, по-видимому, основным источником фундаментальной информации в физике (наряду с космологией и физикой нейтрино). Первые коллайдеры – их тогда называли установками со встречными пучками – появились 55 лет назад (в 1963–1964 гг.). Наш Институт ядерной физики оказался в числе первых научных центров, заложивших основы этого нового направления в физике элементарных частиц.

Идея встречных пучков впервые была предложена норвежским инженером Р. Видерое (он подал заявку на немецкий патент в 1949 году, опубликован в 1953 г.). В патенте Р. Видерое не рассматривалось столкновение релятивистских частиц, когда действительно реализуется колоссальный выигрыш энергии взаимодействия сталкивающихся частиц в случае встречных пучков, по сравнению с экспериментами на неподвижной мишени. Позже, в своих воспоминаниях Видерое написал, что он не включил в патент кинематику столкновений, т.к. по мнению его друга итальянца Б. Тушека, это было тривиально и известно всем еще со школы. Так или иначе, но предложение Р. Видерое не привлекло внимание физиков. Реальным импульсом к разработке встречных пучков стало предложение Д. Керста (США, 1956 г.) осуществить встречные протон-протонные эксперименты на базе оригинального FFAG-ускорителя. В своей статье (январь 1956 г.) и докладе на симпозиуме в Женеве (июнь 1956 г.) Д. Керст сделал акцент на огромном выигрыше в энергии взаимодействия встречных пучков для релятивистских частиц и привел соответствующие формулы. Также в апреле 1956 г. Дж. О'Нил (США, Принстон) опубликовал статью (со ссылкой на Д. Керста) с предложением реализации протонных встречных пучков на базе отдельных накопительных колец. Статья Д. Керста и доклады на симпозиуме 1956 г. в Женеве дали первый толчок развитию метода встречных пучков.

Однако практическая реализация идеи началась с электрон-электронных встречных пучков. Инициатором развертывания этих работ в Лаборатории Новых Методов Ускорения ИАЭ АН СССР выступил её организатор и руководитель Андрей Михайлович Будкер\*. Это было в конце 1957 года. Примерно в это же время начались аналогичные работы в Стэнфордском университете (США). Причиной этого решения явился результат эксперимента Хофштадтера по рассеянию электронов на протонах, где было обнаружено отклонение от КЭД. Тогда обсуждались три гипотезы причины такого результата:

1. Есть размер у электрона.
2. Есть размер у протона.
3. КЭД на малых расстояниях не работает.

Для выяснения причин этого результата требовалось резкое увеличение энергии. Метод встречных электрон-электронных пучков давал такие возможности.

Авторами первой публикации по проекту установки с электрон-электронными пучками в Стэнфорде (RX-1486, Май 1958) были Дж. О'Нил, В. Барбер, Б. Рихтер, В. Панофский. Первое сообщение об уже сооруженной установке ВЭП-1 появилось несколько позднее, на совещании по встречным пучкам в 1962 году в Харькове, где тоже велись работы по сооружению электрон-электронного коллайдера. Однако реально работающие установки были введены в строй только в Стэнфорде и Новосибирске (ИЯФ СО РАН СССР), куда был перевезен ВЭП-1 в 1962 году. Первые акты рассеяния на обеих установках были зарегистрированы в 1964 году. Эксперименты по проверке квантовой электродинамики на этих установках продолжались до 1967 года. Квантовая электродинамика была проверена до длин  $2.6 \cdot 10^{-14}$  см, и это означало, что электрон является точечным образованием, и в отличие от протона не имеет размера.

Еще во время работы над электрон-электронными накопителями физики начали задумываться о возможности создания электрон-позитронных коллайдеров, что открывало принципиально новые, более интересные возможности для экспериментов по физике элементарных частиц. В ИЯФ такая работа по инициативе В.Н. Байера началась в конце 1959 г. (проект ВЭПП-2 на энергию  $2 \times 700$  МэВ). Несколько позднее, в начале марта 1960 г., на семинаре во Фраскати (Италия) Б. Тушек предложил построить  $e^+e^-$  накопитель (AdA) на энергию 250 МэВ, используя в качестве источника частиц уже имеющийся во Фраскати синхротрон. Идея была сразу принята, и первые частицы на накопителе были получены уже в 1961 году; однако интенсивность пучков была очень мала, поэтому в 1962 году это накопительное кольцо было перевезено в Орсе (Франция), где имелся более интенсивный инжектор. Здесь в 1963 году Бруно Тушеком был открыт эффект внутреннего рассеяния. Светимость AdA оставалась слишком малой, чтобы можно было поставить эксперименты по физике элементарных частиц, однако удалось зарегистрировать однократное тормозное излучение на встречном пучке.

Эксперименты на  $e^+e^-$  накопителе ВЭПП-2 в Новосибирске начались в 1966 г., его светимость была в тысячи раз выше, чем на AdA. На ВЭПП-2 был поставлен первый в мире настоящий эксперимент на встречных электрон-позитронных пучках – наблюдение  $\rho$ -мезонного резонанса (1966 г.). В 1967 г. заработал накопитель АСО (Orsay,  $2 \times 450$  МэВ), на котором регистрировали  $\omega$ -мезон. Далее был  $\phi$ -мезон на АСО (1967 г.) и годом позднее, в 1968 г., на ВЭПП-2, с добавлением регистрации заряженных каонов. В эксперименте, выполненном на ВЭПП-2 (1970 г.) при энергии  $2 \times 670$  МэВ, было обнаружено аномальное увеличение многоадронных событий, не объясняемое в рамках существующих теорий. Аналогичные результаты в это же время были получены на итальянской установке Adone. Это явилось важным стимулом для создания следующего поколения коллайдеров, на которых впоследствии родилась физика кварков, объяснившая эту аномалию.

Дальнейшее развитие электрон-позитронных коллайдеров шло по двум направлениям: увеличение энергии и увеличение светимо-

сти. В ИЯФ это выразилось в создании установок ВЭПП-4, с последующей модернизацией, и далее ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. Перечислим электрон-позитронные коллайдеры, которые за истекшие 50 лет создавались в других центрах. Это Adone (Италия), SPEAR (США), DCI (Франция), DORIS (Германия), PETRA (Германия), PEP (США), Tristan (Япония), CESR (США), LEP (ЦЕРН), DAFNE (Италия), BEPC (Китай), PEP-2 (США), KEKB (Япония). В связи с задачами изучения недавно открытого на большом адронном коллайдере бозона Хиггса, в ЦЕРНе разрабатывается циклический электрон-позитронный коллайдер на энергию  $2 \times 175$  ГэВ.

В ИЯФ был предложен и впервые использован метод резонансной деполяризации, позволивший провести прецизионные измерения масс целого ряда элементарных частиц на установках ВЭПП-2М, ВЭПП-4 и ВЭПП-4М. ИЯФ был и остается лидером по работе с поляризованными пучками. Следует отметить, что в ИЯФ впервые была высказана и обоснована конкретными предложениями и разработками идея создания линейных коллайдеров (электрон-позитронных и фотонных), в том числе и с возможностью использования поляризованных пучков.

В эти годы в крупных лабораториях были созданы установки со встречными пучками с использованием и других частиц: протонов, антипротонов, ионов. Важную роль в ряде этих проектов сыграл предложенный А.М. Будкером и впервые экспериментально опробованный в ИЯФ метод электронного охлаждения.

В последнее время появились новые идеи, позволяющие на порядки увеличить светимость. Успешная реализация этих идей идет на DAFNE и KEKB. Такие установки, позволяющие получить очень высокую светимость, стали называть фабриками. В ИЯФ разработан физический проект с-тау фабрики, дающей возможность ставить эксперименты с рекордной светимостью в области энергий до  $2 \times 2500$  МэВ.

Как было сказано выше, в первые годы ИЯФ был одним из лидеров начавшейся гонки в экспериментах на встречных пучках. К сожалению, в последующем в связи с рядом обстоятельств, и прежде всего, с большой стоимостью проектов следующих поколений коллайдеров, институту не выпала честь участвовать в открытии новых семейств элементарных частиц. Тем не менее, установки ВЭПП-2М, ВЭПП-4, ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 внесли заметный и признанный мировой общественностью вклад в развитие физики элементарных частиц. Установка ВЭПП-2М в течение двух десятков лет имела рекордную светимость в своей области энергий, и это было успешно использовано физиками на детекторах НД-СНД и КМД, КМД-2, КМД-3. В связи с вводом ВЭПП-2000 область низких энергий расширена до  $2 \times 1000$  МэВ, и здесь можно ожидать новых интересных результатов. Физики ИЯФ занимали и продолжают занимать достойное место в постановке экспериментов на встречных пучках, в том числе участвуя в коллаборациях с другими центрами.

Синхронно с созданием коллайдеров шло бурное развитие детекторных методик, обеспечивающих создание новых детекторов. Первые детекторы базировались на искровых камерах с оптическим съемом

КОЛЛАЙДЕРЫ И ДЕТЕКТОРЫ

информации, затем появились проволочные искровые камеры с запоминанием на ферритовых кольцах. С середины 70-х стали использоваться многопроволочные пропорциональные камеры, а затем дрейфовые камеры, не требующие внешнего запуска и не имеющие мертвого времени. Для идентификации частиц применяются различные виды черенковских счетчиков, в том числе аэрогелевых, где ИЯФ занимает ведущие позиции. Для регистрации фотонов используются различные виды сэндвичей и счетчики полного поглощения на основе кристаллов NaI, CsI и жидких криптона и ксенона. Физики ИЯФ внесли заметный вклад в развитие этих методов, являющихся базовыми элементами любого современного детектора частиц.

Каждое следующее поколение коллайдеров и детекторов требовало создания всё более сложной техники и новых технологий. И это удачно совпало по времени с бурным техническим прогрессом, затронувшим все области техники и, прежде всего электронику, сверхпроводимость и компьютеры. Сработала и обратная связь, когда задачи поставленные физиками, стимулировали создание новых устройств, материалов и технологий, в последующем используемых в других областях науки и техники и в медицине. В этом плане лаборатории ИЯФ всегда стремились быть на мировом уровне. То же можно сказать и о производственной базе ИЯФ. Именно благодаря этому ИЯФ успешно участвует в международных проектах и выигрывает тендеры по поставкам различного оборудования и даже крупных установок во многие страны. Научные школы ИЯФ по ускорительной и экспериментальной физике признаны во всем мире и, несомненно, являются лидирующими в России.

Можно отметить еще одну сторону влияния коллайдеров на научно-технический прогресс. Они дали толчок и стимулировали развитие работ по использованию синхротронного излучения, созданию специализированных источников этого излучения и лазеров на свободных электронах. Значительный вклад ИЯФ в становление этих направлений является общепризнанным.

*\*Из воспоминаний Б.Г. Ерозолимского: «Ограничусь лишь упоминанием о том, что сама идея встречных пучков и известного всем большого выигрыша в энергии, выделяемой в системе центра масс сталкивающихся электронов, по сравнению со случаем, когда ускоренные электроны падают на неподвижную мишень, пришла в голову Андрею Михайловичу независимо от О'Нила, и он её обсуждал с нами за несколько месяцев до появления соответствующего американского предложения-препринта». Академик Г.И. Будкер. Очерки. Воспоминания. Новосибирск. «Наука». 1988 г.*

# ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. КОЛЛАЙДЕРЫ

## ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.

Возникновение и развитие метода встречных пучков в первую очередь было связано со стремлением перейти в область больших передач импульсов. При соударении движущихся навстречу друг другу частиц с равными энергиями лабораторная система координат совпадает с системой центра инерции, так что вся энергия частиц может использоваться в реакции. В традиционном же методе при взаимодействии ускоренной частицы с неподвижной частицей основная часть энергии, вследствие закона сохранения импульса, расходуется на движение центра инерции. Этот выигрыш особенно велик при релятивистских энергиях, когда релятивистский фактор  $\gamma = E/mc^2 \gg 1$ , где  $E$  – полная энергия частицы, а  $mc^2$  – её энергия покоя. Из релятивистских преобразований можно получить известное соотношение  $E_{\text{ЭКВ}} \approx 2\gamma^2 mc^2$ . Для первого нашего электрон-электронного коллайдера ВЭП-1 при максимальной энергии пучков по 160 МэВ эквивалентная энергия составила  $E_{\text{ЭКВ}} = 100$  ГэВ. Это означает, что необходимо было создать традиционный ускоритель электронов с такой энергией, чтобы получить в системе центра масс энергию, соответствующую энергии установки ВЭП-1 радиусом 43 см. Ускоритель с такой энергией электронов и позитронов и периметром 30 км был сооружен в ЦЕРН только в конце прошлого столетия. А эквивалентная энергия электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2 с энергией электронов и позитронов по 700 МэВ составляла 2000 ГэВ. Ускоритель электронов с такой энергией пока не создан.

Важнейшей характеристикой коллайдера является светимость – параметр, определяющий его производительность по тому или иному изучаемому процессу. Скорость регистрации событий изучаемого процесса  $n$  (сек<sup>-1</sup>) с эквивалентным сечением  $\sigma$  (см<sup>2</sup>) связана со светимостью  $L$  (см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>) следующим соотношением:

$$n = L \cdot \sigma \quad (1)$$

Величина сечения  $\sigma$  определяется изучаемым процессом (в частности, угловым распределением продуктов реакции) и геометрией (и телесным углом) системы регистрации, а светимость определяется следующим известным соотношением:

$$L = N_1 N_2 f / (4S), \quad (2)$$

где:

$N_1, N_2$  – число частиц в каждом пучке,

$f$  – частота обращения, или частота столкновений для многосгусткового режима,

$S = \pi \sigma_z \sigma_x$  – поперечное сечение для гауссовых пучков в месте встречи с вертикальным и радиальным среднеквадратичными размерами  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$ .

Величина светимости росла от  $5 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  на первом коллайдере ВЭП-1 до  $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  на современных коллайдерах.

Из соотношения (2) видно, что для увеличения светимости необходимо увеличивать число частиц в сгустках и уменьшать их поперечное сечение в месте встречи.

В электрон-позитронных коллайдерах поперечные размеры пучков определяются радиационным затуханием, вызываемым синхротронным излучением и свойствами магнитной структуры.

Уже на первых коллайдерах обнаружилось, что эффекты электромагнитного взаимодействия ограничивают число частиц в сгустках, что проявляется в увеличении их поперечных размеров и потерях частиц. Встречный пучок является нелинейной линзой, которая сдвигает частоты бетатронных колебаний и, возбуждая нелинейные резонансы, нарушает устойчивость движения частиц.

Величина этого сдвига  $\xi_z$  в вертикальном направлении определяется соотношением:

$$\xi_z = \frac{Nr_0\beta_z}{2\pi\gamma\sigma_z(\sigma_x + \sigma_z)}, \quad (3)$$

где:  $N$  – число частиц встречного сгустка,  
 $r_0$  – классический радиус электрона,  
 $\beta_z$  – вертикальная бета-функция в месте встречи.

Формула для сдвига  $\xi_x$  в горизонтальном направлении получается из (3) заменой  $\beta_z$  на  $\beta_x$  и перестановкой  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$ .

Опыт работы многих коллайдеров показал, что обычно величина этого сдвига для разных установок колеблется в пределах от 0,03 до 0,07. Из (3) и (2) можно получить предельное число частиц в сгустке  $N$  и далее выражение для светимости в приближении плоского пучка ( $\sigma_x \gg \sigma_z$ ) и при отсутствии дисперсионной функции в месте встречи:

$$L = \xi_z \xi_x \gamma^2 f A_x / (\beta_z r_0^2), \quad (4)$$

где  $A_x = \pi \sigma_x^2 / \beta_x$  – радиальный эмиттанс пучков, определяемый энергией и характеристиками магнитной структуры.

К пониманию того, что увеличение светимости может быть получено при уменьшении бета-функции (увеличении фокусировки в месте встречи) ускорительщики пришли после сооружения первых коллайдеров, в ИЯФ это было после ввода ВЭП-1 и ВЭПП-2. В дальнейшем поиски способов повышения светимости привели к идеям использования круглых пучков, организации многосгусткового режима, создания экзотической оптической структуры коллайдера и места встречи и др.

Конечно, эффекты встречи не являются единственным ограничением светимости. Взаимодействие пучков с элементами вакуумной камеры может также привести к возникновению неустойчивости. Физиками были разработаны эффективные методы подавления продольных и поперечных неустойчивостей.

Физика высоких энергий ставит новые задачи, требующие дальнейшего увеличения светимости и энергии встречных пучков.

## ГЛАВА 1

Г.Н. Кулипанов, Г.М. Тумайкин

## ВЭП-1 – ПЕРВЫЙ КОЛЛАЙДЕР ИЯФ

## ВВЕДЕНИЕ

О начале развертывания работ по встречным пучкам в руководимой Андреем Михайловичем Будкером Лаборатории Новых Методов Ускорения (ЛНМУ) вспоминает Александр Николаевич Скринский (круглый стол 2004 г.):

*«Первые разговоры начались в 1956 году после обсуждения итогов Женевской конференции и конкретного предложения использовать затухание в электронных пучках благодаря синхротронному излучению для того, чтобы накапливать и сжимать пучки для получения высокой плотности. Идея заниматься встречными пучками появилась еще до подписания Постановления о создании института. Разговор о том, что институт появится, в 1957 году уже был. Весной 1957 года, когда я был студентом 4-го курса, в МГУ пришел Вадим Волосов, нашел меня в общежитии и стал агитировать войти в компанию, которая потом преобразуется в институт. Мы приехали после каникул в августе, собеседование в ЛНМУ прошли несколько человек.*



**Рис. 1.** А.Н. Скринский рассказывает о начале работ по ВЭП-1

*Сентябрь, октябрь, может быть, и ноябрь я в группе Б.В. Чирикова занимался экспериментами по созданию и изучению виртуального катода в сильноточном электронном пучке – в связи с предложением А.М. использовать поле электронного пучка для фокусировки протонных пучков, а потом, видимо, по рекомендации Чирикова, Андрей Михайлович меня позвал к себе и сказал: «Мы собираем группу, которая займётся электрон-электронными пучками. Хотим привлечь тебя». Я сразу согласился. К концу 1957 года стала постепенно складываться эта группа. В неё вошли Б.Г. Ерозолимский, Л. Бондаренко, А. Кады-*

мов, В.С. Панасюк и я. Началось формирование понимания того, что же такое электрон-электронные пучки.

Было ясно, что потребуется какой-то инжектор. Был опыт спирального накопления на Б1 и бетатронного режима на Б2. Было решено преобразовать бетатрон Б-2, ускорявший электроны до 2 МэВ, в синхротрон (названный Б-2С) на энергию 100 МэВ (но реально получился ускоритель на 43 МэВ). Как было выпустить пучок? Это стало основным технически новым и сложным элементом, как и впуск в накопитель. И сегодня в циклических машинах впуски и выпуски – особо деликатные места. В течение 1 нсек нужно было создать на орбите дополнительное поле, отклоняющее пучок и направляющее его в выпускной канал. Проблема была острой. Высоковольтный импульс с наносекундным фронтом и с малыми «хвостами» – задача трудная (тем более в 1950-х годах!). Занимались тогда этой задачей Б.Г. Ерозолимский и Л.Н. Бондаренко. Несколько позднее задача формирования нужных импульсов была более полно решена Сашей Киселевым.

В 1958 году чертеж собственно ВЭП-1 был готов. Производство накопителя началось на Турбинке, здесь в Новосибирске, в 1959 году. Очень многого не было там заложено. Один вопрос такой: кольца соприкасаются и здесь не должно быть спада поля, оно должно быть однородно. Как обеспечить устойчивость пучков в дорожках? Пообсуждав с Андреем Михайловичем, решили так распределить поле: в районе соприкосновения орбит – плоская часть, потом короткие крылья с увеличенным градиентом, такие, чтобы и сохранить интеграл поля на орбите, и получить нужную фокусировку в обеих дорожках.

Еще одно место было чрезвычайно сложным. Дорожки с нужным магнитным полем почти азимутально однородным и полностью открытые снаружи. У них, естественно, поле на краю полюсов ужасное. Нужно было провести пучок через это поле. Была придумана компенсирующая система. Нужно было сделать так, чтобы компенсация была вдоль всей траектории впуска. Задача выглядела почти неразрешимой – градиенты слишком велики. Этим, в основном, занимался Гриша Сильвестров. В результате придумали сделать «перпендикулярный вход пучка», расширив магнитные полюса на участке впуска. Это решение оказалось правильным.

Изготовленный накопитель в 1960 году перевезли в Москву. ВЭП-1 разбирали и собирали несколько раз. Несмотря на сложные двойные уплотнения, серьезная вакуумная часть была хорошо сработана. Было уже понятно, что и как делать.

С ВЭП-1 много было «нетехнических» сложностей. Сначала мы думали, что ВЭП-1 останется в Москве. Те, кто оставался в Москве, этого хотели. «Перенос ВЭП-1 в Новосибирск – это не только потеря времени, но и работа потерялась бы», – говорили они. Команда Б.Г. Ерозолимского, остававшаяся в Москве в Курчатовском институте, стала добиваться статуса лаборатории и отделилась от лаборатории Будкера. Этот конфликт развивался в 1962 году, когда мы уже были в Новосибирске. Это дело разбиралось в Министерстве

*среднего машиностроения, куда входил Курчатовский институт. Там выступил М.А. Лаврентьев. Он резко заявил, что некоторые хотят развивать науку в Сибири, а вот некоторые в Москве не хотят отдавать оборудование. Решение было в пользу Будкера, в пользу ИЯФ. Очень быстро команда под руководством Димова демонтировала ВЭП-1. И очень быстро перевезла его сюда.*

*С точки зрения организации заведующим сектором встречных пучков в 1961 году стал Вениамин Сидоров, а я – его заместителем. В какой-то месяц осени 1962 года нас превратили в два сектора».*

Сразу после решения о перевозе установки в Новосибирск в Москву была направлена группа сотрудников, которая быстро разобрала установку на крупные узлы и упаковала их в ящики. На ящиках была написана буква «Д», что означало фамилию Димов. Геннадия Ивановичу Димову, имеющему опыт сооружения синхротрона «Сириус» в Томске, было поручено организовать монтаж комплекса ВЭП-1 на новом месте. Комплекс предполагалось разместить на месте нынешнего ВЭПП-2000. К моменту прибытия в ИЯФ ящиков ВЭП-1 строительство третьего блока главного здания института было в основном завершено. Заканчивалось строительство антреселей, вёлся монтаж дистилляторной и электромонтаж. Определилась команда во главе с А.Н. Скринским, которая должна была запускать комплекс ВЭП-1. Сразу был задан высокий темп работ.

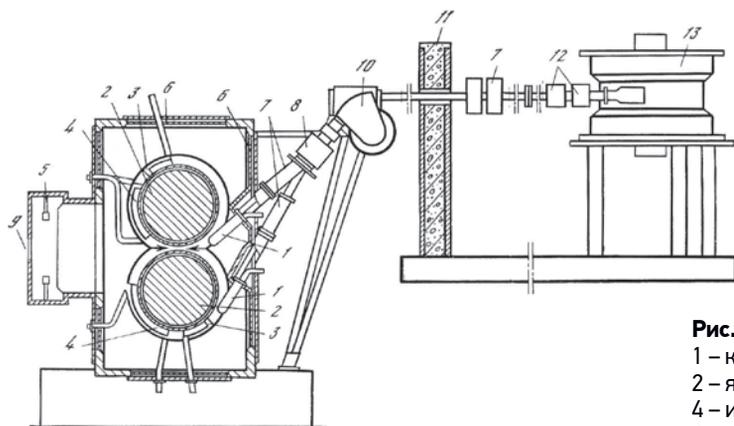
Из воспоминаний бригадира электриков А.П. Шленкина: *«В начале августа меня вызвал заместитель директора института А.А. Нежевенко и сказал, что надо отложить все дела и обязанности и помочь выполнить монтаж установки ВЭП-1, которую дирекция обещала смонтировать и привести в рабочее состояние за три месяца (это было одним из условий перевозки ВЭП-1 в Новосибирск). Нужно было смонтировать огромную массу контрольных, силовых кабелей, вакуумные системы, сжатый воздух, техническую воду, дистиллят... Одновременно работали специалисты нескольких организаций, каждая из которых думала только о своей части работы, и поэтому накладки и нестыковки были обычным явлением. Электрики работали без документации по набросанным накануне ночью схемам. Работы велись с 8 до 23 часов. Затем подводили итоги дня, перекусывали, намечали планы на следующий день и расходились по домам. Суббота тогда была рабочим днем. Надо отметить, что все работали с большим подъемом, хотелось показать, что в Сибири будет Большая Наука. Установка ВЭП-1 была досрочно смонтирована и предварительно налажена (имеется ввиду энергоснабжение и кабельное х-во), о чем указано в приказе № 183 от 22 октября 1962 г.».*

## 1. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ВЭП-1 [1,2]

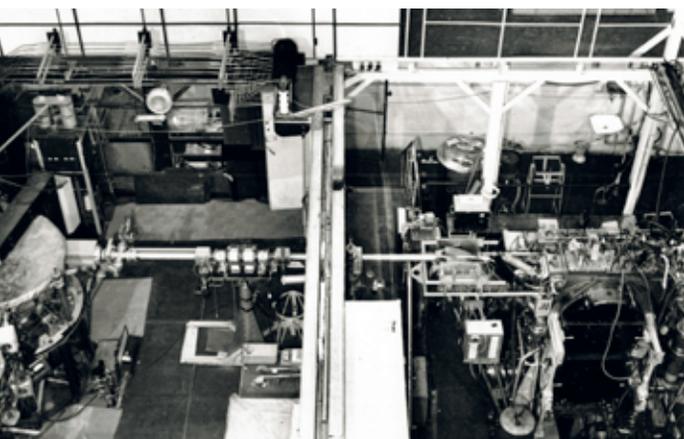
Комплекс установок включает в себя инжектор – электронный синхротрон Б2-С, соприкасающиеся накопительные кольца, обеспечивающие в месте соприкосновения орбит столкновение встречных сгустков электронов, и электронно-оптический канал для перевода ускоренных

электронов из синхротрона в накопительные кольца. Схема комплекса и его фото представлены на рис. 2 и 3.

Особенностью установки является вертикальное расположение накопительных колец при нормальном горизонтальном расположении синхротрона. Это сделало комплекс более компактным и упростило постановку системы регистрации.



**Рис. 2.** Схема комплекса ВЭП-1.  
 1 – компенсирующие системы-КС,  
 2 – ярмо магнита, 3 – резонатор,  
 4 – инфлектор, 5 – азотит,  
 6 – внутренние фланцы,  
 7 – квадрупольные линзы,  
 8 – коммутирующий магнит,  
 9 – окно для вывода СИ,  
 10 – поворотный магнит,  
 11 – радиационная защита,  
 12 – корректора,  
 13 – синхротрон Б-2С



**Рис 3.** Общий вид комплекса.  
 (По отношению к рис. 1 вид с другой стороны: синхротрон слева, справа видно только верхнее кольцо)

## 1.1 СИНХРОТРОН И КАНАЛ

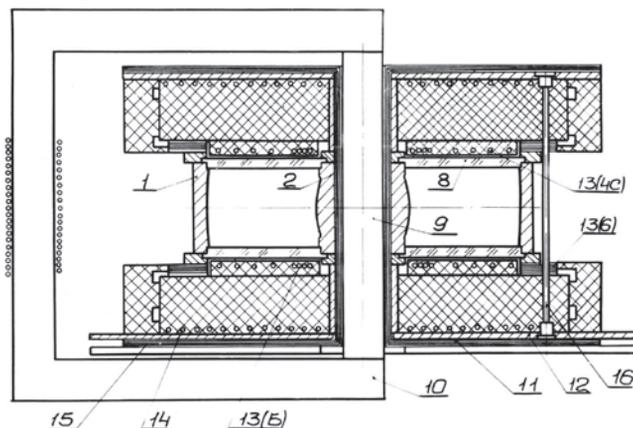
Для создания установок со встречными электронными пучками в первую очередь предстояло решить вопрос об инжекторе. К этому времени был накоплен опыт создания бетатронов со спиральным накоплением. Эти работы велись с целью получения стабилизированного релятивистского электронного пучка. На созданном бетатроне Б-2 был получен ускоренный ток электронов 10А (1956 г.) на радиусе 14 см. На базе конструкции этого бетатрона был создан синхротрон с бетатронным предускорением. Синхротрон получил название Б-2С [3].

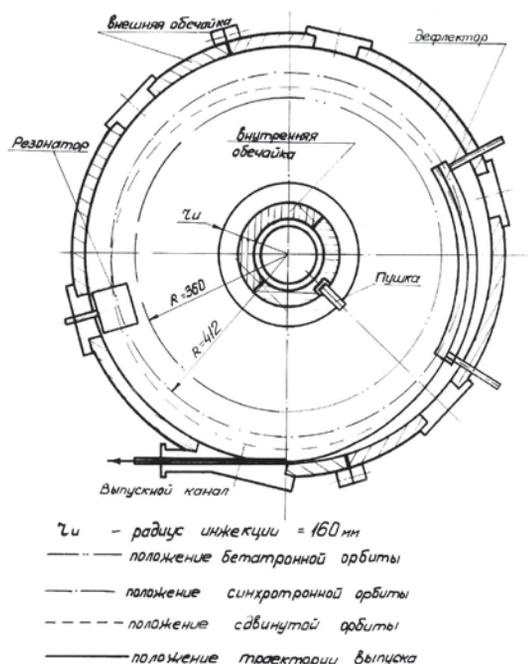
Магнитное поле синхротрона формировалось токовыми витками, расположенными выше и ниже медианной плоскости и двумя алюминиевыми обечайками (внутренней и наружной), обеспечивающими формирование нужного профиля поля за счет скин-эффекта (рис. 4,5). Чтобы не создать замкнутого витка обечайки были разрезаны. Внутри внутренней обечайки был расположен бетатронный сердечник, создававший вихревое ускоряющее поле. Специальная система многослойных разрезных экранов катушечного типа экранировала область ускорения от рассеянного магнитного поля этого сердечника. Для компенсации напряжения, наведенного сердечником на витки ведущего поля, в конструкцию были заложены обратные витки, расположенные на большом расстоянии от медианной плоскости вблизи экранов. Поэтому влияние тока этих витков на магнитное поле на орбите было несущественным. Катушки, создающие магнитное поле, состояли из двух параллельных групп (верхней и нижней) последовательно включенных витков: бетатронных, синхротронных и шестивитковых пакетов. Бетатронные и синхротронные витки были уложены в специальные пазы в двух (верхнем и нижнем) стеклотекстолитовых дисках и залиты эпоксидной смолой. Шестивитковые пакеты прилегали непосредственно к наружным обечайкам. Диски стягивались между собой шпильками, при этом одновременно к обечайкам прижимались крышки вакуумной камеры и шестивитковые пакеты, образуя жесткую конструкцию, способную выдержать многотонные электромагнитные силы.

Вакуумная камера синхротрона состояла из внутренней и наружной обечайек, закрытых крышками из оргстекла. Внутри камеры на крышках были размещены стекла с проводящим покрытием, подсоединенные к наружной обечайке. Это исключало накопление статических зарядов, нарушающих процесс ускорения. На наружной обечайке имелись съёмные фланцы, сделанные по профилю вакуумной камеры и имеющие с ней хороший электрический контакт для сохранения скин-эффекта формирования магнитного поля. Откачка велась паромасляным насосом с производительностью 2000 л/сек через ловушку с температурой жидкого азота. Для откачки в стенке одного из фланцев были сделаны горизонтальные щели.

**Рис. 4.** Разрез синхротрона Б-2С в вертикальной плоскости.

- 1 – наружная обечайка,
- 2 – внутренняя обечайка,
- 8 – крышка вакуумной камеры,
- 9,10 – бетатронный сердечник,
- 11 – медные экраны,
- 13(Б) – бетатронные витки,
- 13(4с) – 4 синхротронных витка,
- 13(6) – шестивитковый пакет,
- 12,14 – обратные витки,
- 15 – элемент силовой конструкции,
- 16 – стягивающие шпильки





**Рис. 5.** Разрез синхротрона Б-2С в медианной плоскости

К моменту инжекции электронов во всем объеме камеры создавалось спадающее по радиусу квазистационарное магнитное поле, соответствующее максимуму тока от разряда конденсаторной батареи. Электронная пушка размещалась на внутреннем радиусе. Инжектируемый пучок, разворачиваясь по спирали в виде блина, заполнял всю вакуумную камеру. Шаг спирали определялся величиной напряжения на обходе, создаваемого бетатронным сердечником, на который разряжалась другая конденсаторная батарея. Таким образом реализовался режим накопления.

Ниже приведены основные параметры этого режима:

Энергия инжекции электронного пучка	20 кэВ
Радиус инжекции	16 см
Максимальный радиус накопления	38 см
Энергия электронов на максимальном радиусе	60 кэВ
Количество витков спирали	100-150

Следующий этап – бетатронное ускорение. Включался разрядник бетатронной конденсаторной батареи и начинался рост магнитного поля во всем объеме камеры. Ток разряда, как в режиме накопления, так и в режиме бетатронного ускорения, протекал через все витки ускорителя. Бетатронное соотношение 2:1 вначале выполнялось для среднего радиуса, что приводило к уменьшению радиального размера (энергетического и бетатронного), а в конце бетатронного ускорения орбита расширялась до радиуса, определяемого частотой ВЧ системы. Такой режим был подобран выбором соотношений амплитуд и длительностей вихревого электрического и ведущего магнитного полей. Одновременно за счет адиабатического затухания происходило уменьшение и вертикального размера. К концу бетатронного ускорения вертикальный размер составлял около 2 см, а радиальный, включая энергетический разброс, 6 см. Энергия электронов была около 2 МэВ.

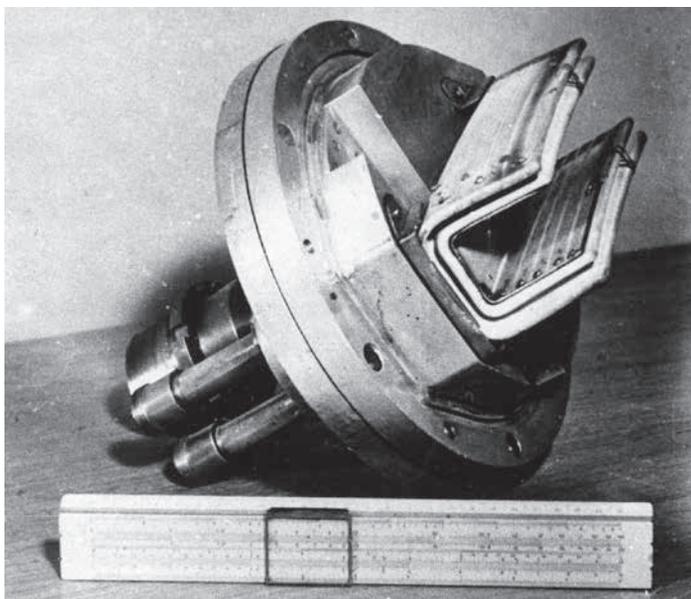
Далее синхротронное ускорение. Пучок вводился в ускоряющий резонатор, включалось ускоряющее поле в резонаторе, поджигался разрядник основной конденсаторной батареи, создающий магнитное поле в области синхротронной орбиты, и пучок ускорялся в синхротрон-

ном режиме. Магнитное поле в синхротронном режиме создавалось на наружном радиусе током в синхротронных витках и шестивитковых пакетах. В конце цикла ускорения на наружный 6-витковый пакет включалась еще одна конденсаторная батарея, ток от которой обеспечивал получение максимальной энергии и корректировал величину показателя спада поля « $n$ ».

Резонатор представлял собой пролетную трубку с разрезом для ввода пучка (рис. 6), фактически являющуюся емкостью, укорачивающей четвертьволновую линию. Конструкция резонатора была выполнена из полистирола, покрытого тонкой медной фольгой с продольными разрезами. Это обеспечивало его «прозрачность» для ведущего магнитного поля. Резонатор работал на 1-й гармонике частоты обращения (116 МГц). Эффективность резонатора (отношение амплитуды ускоряющего напряжения к амплитуде напряжения на резонаторе) составляла около 0,35. В начале цикла ускорения напряжение на резонаторе было 6 кВ, в конце 2-3 кВ. Здесь следует отметить, что исследование синхротронного режима в установке Б-2С было дипломной работой А.Н. Скринского.

В конце цикла ускорения посредством так называемых сдвиговых витков создавалось азимутальное искажение магнитного поля. Равновесная орбита сдвигалась в дефлектор и к выпускному каналу. Последний представлял собой экранирующую от магнитного поля двухслойную (медь и железо) трубку, размещенную по касательной к равновесной орбите и проходящую через алюминиевую стенку наружной обечайки. Конструкция позволяла экранировать магнитное поле на траектории выпуска. Импульс дефлектора не был синхронизирован с фазой ускоряющего напряжения. Чтобы избежать флуктуаций выпущенного тока, за несколько микросекунд до выпуска снималось напряжение с ускоряющего резонатора. Это приводило к разбунчировке сгустка и позволяло иметь стабильный выпуск свыше 50% ускоренных электронов. Дефлектор представлял собой пару короткозамкнутых линий, расположенных под и над равновесной орбитой, и питался от высоковольтного генератора с низким выходным сопротивлением. Амплитуда импульса до 100 кВ, передний фронт около 2 нсек.

Система питания всех элементов магнитной системы была построена на разряде конденса-



**Рис. 6.** Резонатор синхротрона вместе с фланцем

торных батарей через трехэлектродные разрядники. Разрядники поджигались импульсами от водородных тиратронов. В системе питания синхротрона было задействовано 7 разрядников и 7 конденсаторных батарей, обеспечивающих решение следующих задач (рис. 7):

1. Создание квазистационарного поля для накопления.
2. Создание вихревого электрического поля для спирального накопления и бетатронного ускорения.
3. Создание магнитного поля для бетатронного ускорения.
4. Создание магнитного поля для синхротронного ускорения.
5. Создание магнитного поля для коррекции частот бетатронных колебаний в конце синхротронного ускорения.
6. 2 разрядника для питания витков, сдвигающих равновесную орбиту в дефлектор и к выпускному каналу.

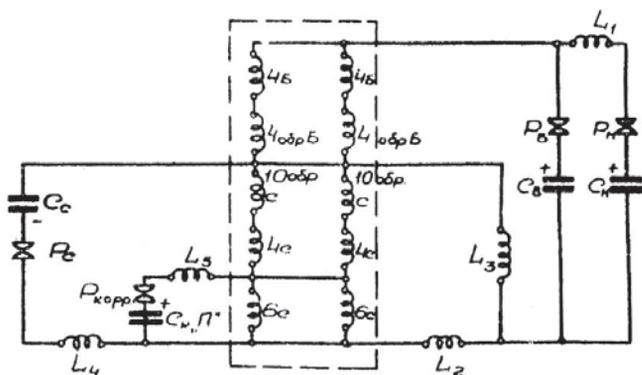


Рис. 7. Схема питания синхротрона

Последние три цепи питания (5,6) не показаны на схеме. Витки синхротрона (прямые и обратные) на рис. 7 обведены пунктиром. Показаны дополнительные индуктивности ( $L_1-L_5$ ), регулирующие соотношение токов в витках синхротрона.

Все разрядники, кроме разрядника основного поля, имели простую конструкцию, состоящую из двух медных полушарий с поджигающим электродом в одном из них (рис. 8). Разрядник основного синхротрон-

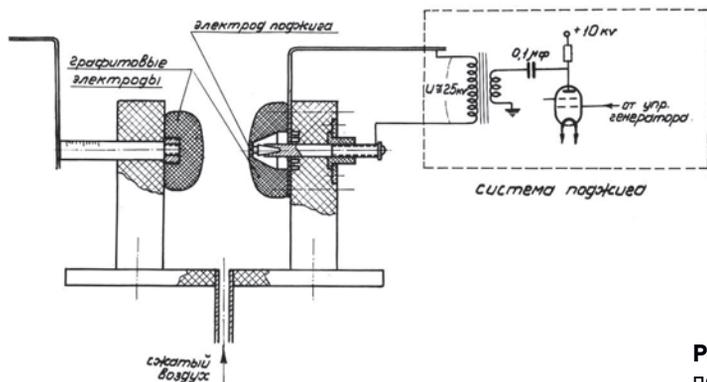


Рис. 8. Разрядник вместе с системой поджига

ного поля с током до 80 кА был более сложной усиленной конструкции, обеспечивающей также подавление звука разряда. Периодическая подстройка разрядников проводилась вручную. Поджигающий импульс формировался схемой на высоковольтном водородном тиратроне. Стабильность запуска разрядников вместе с тиратроном была порядка одной микросекунды. Основная часть энергии, запасенная в конденсаторах, рассеивалась в катушках и обечайках ускорителя, что приводило к нагреву элементов ускорителя. В связи с этим время между циклами ускорения было около 16 сек.

Ниже приведены основные параметры синхротронного режима:

Рабочая энергия	43 МэВ
Радиус равновесной орбиты	412 мм
Магнитное поле на равновесной орбите в конце ускорения	3,48 кГс
Ток в витках, создающих основное поле	80 кА
Длительность цикла ускорения	0.9 мсек
Временной интервал между циклами ускорения	16 сек
Ускоренное число частиц	$3 \cdot 10^{10}$

Стабилизация напряжения на конденсаторных батареях обеспечивалась релейным отключением выпрямителя при достижении в процессе зарядки заданного уровня. Наиболее высокие требования были к напряжению основной конденсаторной батареи, определяющей энергию пучка. Здесь вместо стабилизации напряжения использовалось формирование импульса запуска всего ускорительного цикла в тот момент, когда в процессе зарядки напряжение на этой конденсаторной батарее достигнет заданной величины. Дополнительно были развиты и другие системы стабилизации и привязки момента выпуска. Одна из них была основана на использовании синхротронного излучения, выведенного из ускорителя. Пучок выпускался в нарастающем магнитном поле при энергии, где синхротронное излучение только начинало появляться в оптической области и имело сильную зависимость от энергии. Специальной системой фильтров и зеркал выделялись интенсивности в двух областях спектра, а электронная схема давала отношение интенсивности коротковолновой части спектра на длинноволновую. Когда полученный сигнал достигал определенной величины, срабатывала электроника, формирующая задний фронт напряжения на резонаторе и затем импульс запуска разрядника дефлектора. Это параллельно с системой стабилизации напряжения на конденсаторных батареях обеспечивало кратковременную точность энергии выпущенного пучка не хуже 0,05%. Естественно, температурные уходы и другие медленные нестабильности требовали участия оператора.

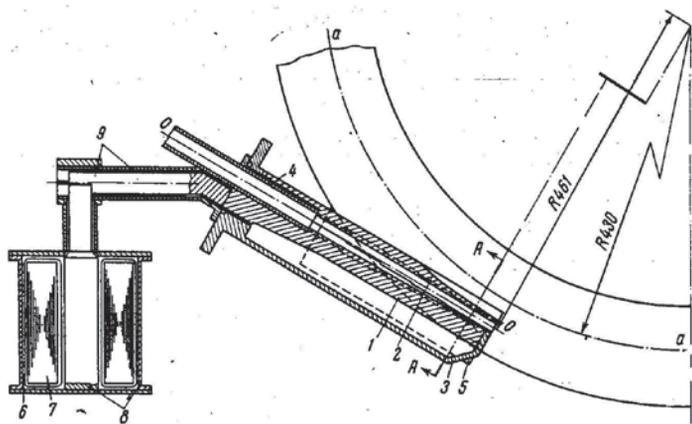
Основу электроники управления и контроля составляли шестиканальные генераторы импульсов, позволяющие расставлять генерируемые импульсы в необходимой временной последовательности. Эти импульсы использовались для запуска импульсных элементов, осциллографов и др. Электронные схемы были выполнены на лампах и тиратронах. Вся электроника была аналоговой, цифровой техники ещё не было.

Система наблюдения за током пучка в основном была построена на измерении тока с расположенных в камере синхротрона свинцовых пробников. Из специальных измерений было установлено, что их эффективность в области бетатронных энергий составляет (20-50)%. Пробники могли передвигаться по радиусу для изучения процессов накопления, бетатронного и синхротронного ускорения, наблюдение велось с помощью осциллографа. На канале перепуска между синхротроном и накопительными кольцами были установлены секционные свинцовые пробники с толщиной в несколько сантиметров. Они позволяли определять заряд и положение центра тяжести пучка. В режиме синхротронного ускорения, когда пучок был сбунчирован, использовался сигнал с пикап-электрода. Точное измерение заряда выпускаемого пучка проводилось с помощью цилиндра Фарадея. В процессе настройки выпуска пучка для измерения его размеров и положения использовалась обычная фото пленка.

В процессе запуска проблем хватало, включая случаи серьезных пробоев витков ускорителя, нарушений вакуума и пр. Многие элементы пришлось серьезно изменить. Работали, как выше вспоминал А. Шленкин, до поздней ночи, часто включая и воскресенье (суббота тогда была рабочим днем). К весне 1963 года синхротрон уже работал. Далее была проблема выпуска. Дефлектор и наносекундный разрядник [4] с обострителем фронта были разработаны Львом Бондаренко, оставшимся в Москве высококвалифицированным специалистом, по совместительству веселым юмористом и балагуром. Выпуск был получен при его участии.

Электронно-оптический канал включал в себя пару дублетов квадрупольных линз, поворотный и коммутирующий магниты. Последний при смене полярности поля переводил направление движения пучка с верхней дорожки коллайдера на нижнюю. Так как накопительные кольца были расположены вертикально, а синхротрон горизонтально, хорошего согласования эмиттанса ускорителя и акцептанса колец не было.

Основные элементы каналов имели импульсное питание с использованием тиратронов и конденсаторных батарей. Такое решение, в ос-



**Рис. 9.** Компенсирующая система для ввода пучка. 1 – внутренняя шина, 2 – съёмная крышка короба, 3 – короб, он же наружная шина, 4 – экранирующая стальная труба, 5 – стальные накладки, 6 – тороидальный пакет железа трансформатора, 7 – первичная обмотка импульсного трансформатора, 8 – тороидальная медная обечайка, она же вторичная обмотка трансформатора, 9 – коаксиальный токоподвод

новном сохранившееся и на последующих установках, было оправдано редкой частотой работы канала. Энтузиастом импульсной идеологии был Андрей Михайлович. В частности, в конструкцию квадрупольных линз была заложена возможность регулировки эффективной длины линз. Это достигалось экранировкой части вакуумной камеры медной цилиндрической втулкой, надетой на непроводящую внутреннюю камеру. Наиболее сложным элементом была система импульсных впускных магнитов. Для ВЭП-1, не имеющего прямолинейных промежутков, задачей этих магнитов была компенсация магнитного поля кольца на траектории ввода пучков. Поэтому они назывались КС (компенсирующие системы) (рис.9).

О тонкостях этого места рассказано выше А.Н. Скринским и ниже в воспоминаниях Татьяны Всеволожской:

*«Задача решалась путем компенсации постоянного поля в момент впуска импульсным полем безжелезного магнита, которое должно было с хорошей точностью повторять конфигурацию постоянного вдоль траектории впуска. Были проведены тщательные измерения рассеянных полей, которые легли в основу конструирования компенсирующей системы (КС).*

*Безжелезный магнит имел квазиоаксиальное сечение. Продольное изменение поля в нем задавалось переменной толщиной внутренней токовой шины, а поперечный градиент – формой профилей внутренней и внешней шин, также переменной вдоль длины магнита. Из-за сложной конфигурации полей не только в пространстве, но и во времени, поскольку поля, проходящие через скин-слой в металле, сдвигаются по фазе, для получения компенсации с высокой точностью предполагалось провести дополнительное шиммирование по результатам измерения полей в реальном магните. И потребовались долгие месяцы кропотливой работы и все упорство и методичность Вадима Пакина для достижения этой цели. Однако область компенсации была узкой – хрупкий, неустойчивый баланс сложения многих мультипольных составляющих. Это приводило к большому значению поля, проникающего сквозь стенку (нож магнита) в апертуру дорожки... В результате система работала неустойчиво. Для того, чтобы в корне изменить ситуацию, нужно было найти принципиально новое конструкторское решение задачи компенсации.*

*И такое решение было найдено. Г.И. Сильвестров предложил, образно выражаясь, использовать для компенсации полей рассеяния сам их источник – магниты накопителя. Часть железа из полюсов вблизи КС была выбрана и заменена шихтованными вкладышами, которые одинаково хорошо пропускали и постоянный, и импульсные магнитные потоки. Теперь и рассеянное, и компенсирующее поля определялись одними и теми же эквипотенциальными поверхностями. Импульсное поле дополнительно формировалось скиновыми поверхностями токонесущих шин, профилированных по форме линий. Компенсация полей с хорошей точностью обеспечивалась практически по всей высоте межполюсного зазора накопительной дорожки. Внешнее поле за но-*

жом магнита в новой КС уменьшилось почти на порядок... В 10 раз увеличилось отношение поля к току. Это позволило уменьшить длительность импульса до 110 мксек и иметь внешние поля на уровне 0,5%».

Следует отметить, что это красивое решение было проверено только на стенде, и оно ждет еще своего применения в будущем.

Самый первый вариант КС для однопорочечного кольца (прототип ВЭП-1) был дипломной работой Валерия Петрова, выполненной под руководством Г.И. Сильвестрова. Окончательный вариант КС был создан В.Н. Пакиным.

## 1.2. КОЛЛАЙДЕР

Проект коллайдера ВЭП-1 выполнялся в 1958–1959 гг. Изготовление было завершено в 1960 г. на Новосибирском турбогенераторном заводе, директором которого был А.А. Нежевенко, будущий заместитель директора ИЯФ. ВЭП-1 был доставлен в Москву, где были начаты работы по его подготовке к запуску. В 1962 году ВЭП-1 был перевезен в Новосибирск.

Конструкция коллайдера имела форму плоского параллелепипеда, в большие грани которого были вмонтированы (сварены) по два кольцевых магнитопровода, являющихся одновременно и полюсами, и крышками вакуумной камеры (рис.10).

Ярма для обратного потока грибообразной формы вместе с катушками располагались внутри колец вне вакуумной камеры. Магнитные полюса, формирующие профиль магнитного поля, устанавливались внутри вакуумной камеры. Остальная часть вакуумной камеры была выполнена из нержавеющей стали. На четырех малых гранях параллелепипеда были

установлены съёмные фланцы с двойным уплотнением, наружным на вакуумной резине, внутренним на свинцовых прокладках. В этой конструкции создавался промежуточный объем между высоким вакуумом и атмосферой.

Промежуточный объем откачивался паромасляными насосами с азотными ловушками, внутренняя часть т.н. азотитами. Последние представляли собой охлажденные жидким азотом поверхности с периодически на-

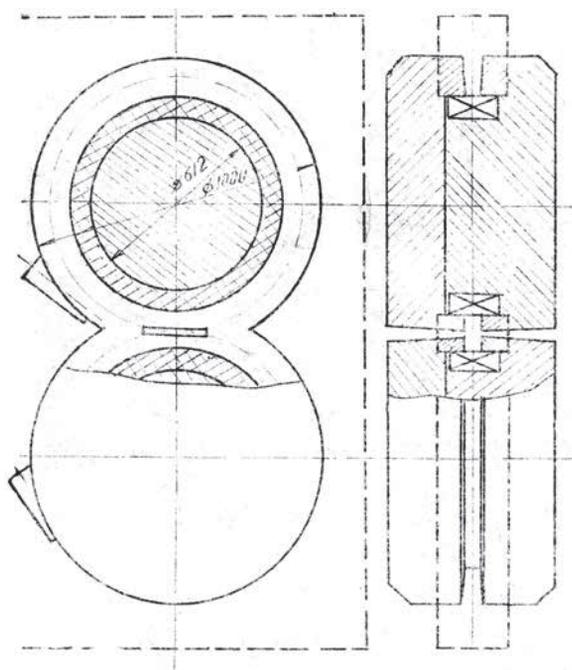
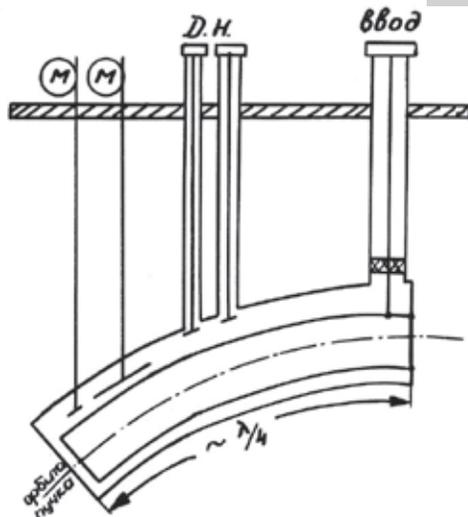


Рис. 10. Магнитная система ВЭП-1

пыляемым на них титаном. Современной техники, металлических разъемных уплотнений и технологии аргоновой сварки тогда в ИЯФ ещё не было. Внутренняя высоковакуумная часть камеры прогревалась до температуры 200 градусов. После такого прогрева удавалось поддерживать надёжную восьмую степень.

За вакуумное хозяйство отвечал Гений Александрович Блинов.

Через вертикально расположенные фланцы со стороны канала осуществлялся выпуск пучков. Другие фланцы служили местом ввода фидеров инфлекторов и резонаторов, пробников и др. Инфлектор был выполнен в виде изогнутой пластины, расположенной на внешнем радиусе, и имел неоднородное по радиусу поле, которое создавалось бегущей навстречу пучку волной. На первом этапе импульс инфлектора формировался тем же генератором, что и импульс дефлектора. Этот импульс имел хвосты, что вело к раскачке впущенного пучка. Впоследствии для питания инфлектора был применен генератор, разработанный А.В. Киселевым, который не имел послеимпульсов. Всю эту наносекундную высоковольтную технику обслуживал и модернизировал Ю.Г. Матвеев.

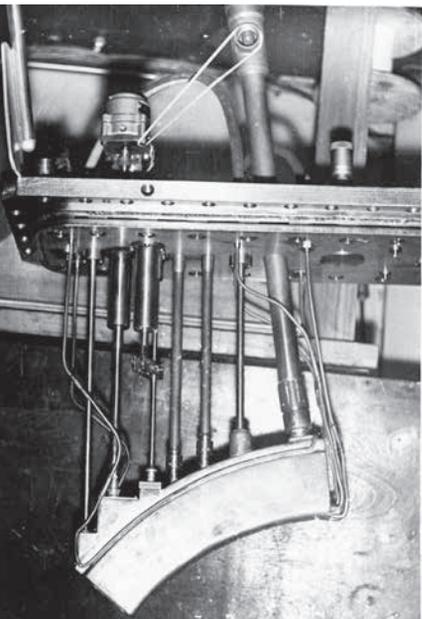


**Рис. 11.** Схема резонатора ВЭП-1.  
ДН – датчики напряжения,  
М – механизмы подстройки, грубой и тонкой

Резонатор представлял четвертьволновый коаксиал с полый внутренней «жилой» (рис.11), через которую пролетал пучок. Резонатор работал на второй гармонике, ускоряющее напряжение достигало 6 кВ. Резонаторы монтировались на верхнем и нижнем фланцах. На рис.12 показан съёмный фланец с ускоряющим резонатором. Разработку всей ВЧ системы под руководством В.С. Панасюка проводил Г.Н. Острийко [5].

Первый этап запуска ВЭП-1 предполагал инжекцию только в верхнее кольцо. Кольцо имело азимутальную симметрию с показателем спада магнитного поля  $n=0,6$ . Система же двух слабофокусирующих колец должна иметь однородное поле в области соприкосновения орбит. Эта область составляла около  $40^\circ$ . Для обеспечения устойчивости пучка величина показателя спада поля « $n$ » в прилегающих к месту встречи областях размером по  $20^\circ$  была увеличена до 1 вместо 0,6 в остальной части орбиты. Это было сделано на втором этапе запуска.

К лету 63-го года В.Л. Ауслендером, С.Г. Поповым и А.Н. Скринским были подготовлены первые рабочие материалы по ВЭП-1, в которых было изложено текущее понимание основных вопросов, таких как устойчивость пучка, его время жизни, размеры и т.д. Материалы оказались полезным пособием для участников работы.



**Рис. 12.** Резонатор ВЭП-1 в сборке на фланце

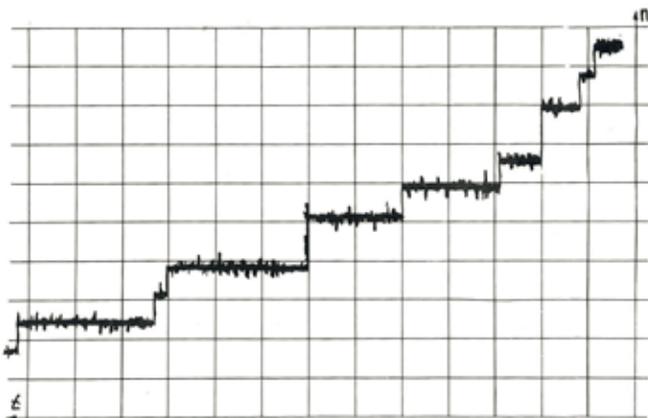
**Основные параметры коллайдера.**

Энергия инжекции	43 МэВ
Максимальная энергия (вместо 2*130 МэВ запланированных)	2·160 МэВ
Радиус равновесной орбиты	43 см
Кратность ускоряющего напряжения	2
Максимальное ускоряющее напряжение	6 кВ
Вакуум	$3 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст.
Время жизни на малом токе (E=43-160 МэВ)	(400-1200) сек
Время затухания на энергии инжекции около	1 сек
Рабочие токи при энергии 160 МэВ	до 100 мА
Максимальная светимость	$5 \cdot 10^{27}$ см <sup>-2</sup> сек <sup>-1</sup>

Захват электронного пучка на верхнюю дорожку накопительного кольца был получен 20 августа 1963 г. Энергия пучка электронов была увеличена до 43 МэВ, что позволило увидеть синхротронное излучение циркулирующего пучка. Это было знаменательное событие не только для участников запуска, но и всего коллектива ИЯФ. А 21 августа в Дубне открылась Международная конференция по физике высоких энергий и ускорителям, где впервые были доложены работы ИЯФ по созданию установок со встречными пучками. Так что первый пучок был получен в нужное время. Для измерения интенсивности пучка использовалось синхротронное излучение, регистрируемое ФЭУ. Калибровка проводилась по одному электрону (рис.13), переход к большой интенсивности осуществлялся через систему оптических фильтров, калиброванных Эдуардом Зининым, создавшим впоследствии всю систему оптического

наблюдения. Света было достаточно, чтобы невооруженным глазом наблюдать один электрон.

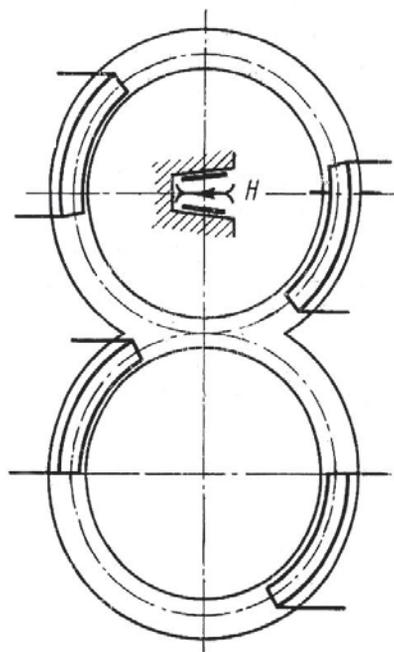
Далее предстояла работа по получению двух пучков и обеспечению их встречи. Сложным местом магнитной системы, как и



**Рис. 13.** Калибровка по одному электрону

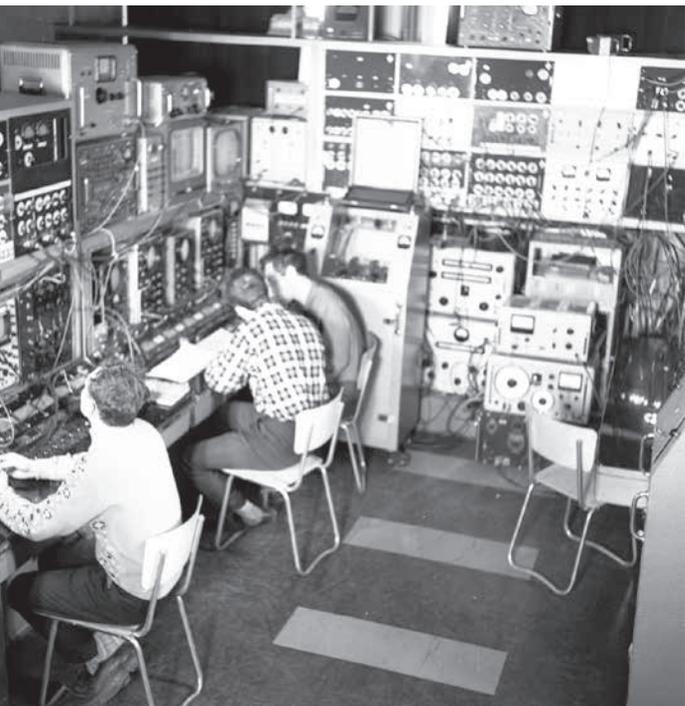
ожидалось, было место встречи, где вдоль орбиты была удалена часть полюсов, чтобы обеспечить вывод электронов, рассеянных на большой угол. Необходимо было получить однородное магнитное поле в месте встречи, где отсутствовали полюса и имелась щель для выпуска рассеянных электронов через тонкую фольгу. Эта задача была успешно решена Л.С. Коробейниковым.

Зима прошла в напряженной подготовке. Это наладка инъекции на нижнюю дорожку, создание системы управления пучками и контроля сведения пучков. Следует отметить, что в отличие от позитрон-электронного коллайдера, где пучки движутся по одной орбите, в электрон-электронном пучки нужно сводить по радиусу, вертикали и фазе. Была создана система управления орбитами с помощью одновитковых корректоров [6]. Витки радиальной коррекции позволяли смещать положение орбит верхней и нижней дорожек таким образом, чтобы обеспечить сведение орбит по радиусу и выставку места встречи по центру щели для выпуска рассеянных электронов. Другой тип витков, выполненный в виде прилегающих к полюсам токовых пластин, расположенных внутри вакуумной камеры, обеспечивал сведение пучков в поперечном (в обычном представлении вертикальном) направлении и регулировку частот бетатронных колебаний (рис. 14). Каждая пластина имела свой источник питания, что обеспечивало возможность в зависимости от соотношения токов создавать градиент или (и) радиальную компоненту поля. На каждой дорожке было установлено 2 пары таких пластин, что позволяло также управлять углом встречи. Пластины и источники питания были изолированы от земли, что давало возможность подавать на них постоянное напряжение для отсоса ионов или ВЧ напряжение для раскачки бетатронных колебаний. Возможность оперативного измерения частот бетатронных колебаний оказалась важнейшим инструментом для настройки коллайдера и вообще для развития пучковой физики.



**Рис. 14.** Расположение пластин для коррекции частот бетатронных колебаний и их резонансной раскачки, управления вертикальным положением орбиты и отсоса ионов

Для обеспечения столкновений, помимо совмещения орбит, необходимо было научиться контролировать одновременное прохождение сгустков через область взаимодействия. Оригинальным решением этой задачи было использование ЭОПов (электронно-оптических преобразователей) с круговой разверткой, как для измерения длины сгустков, так и фазировки пучков для обеспечения их встречи [6]. Разрешение составляло около одного сантиметра, или  $0,3 \cdot 10^{-11}$  сек. Лучи света



**Рис. 15.** В пультовой ВЭП-1

с обеих дорожек через систему зеркал сводились на экран ЭОПа, разница путей света составляла ровно один оборот. Для получения встречи изображения сгустков должны были совпасть. Это достигалось подстройкой фазы напряжений на резонаторах с помощью фазовращателей в высокочастотных трактах питания резонаторов. Оптическая система позволяла наблюдать из места встречи одной телекамерой оба пучка и контролировать сведение их орбит. Следует отметить, что использование синхротронного

излучения явилось важнейшей частью пучковой физики и в какой-то мере способствовало последующему развитию работ с применением синхротронного излучения.

Для оперативного измерения светимости А.П. Онуциным было предложено внутри вакуумной камеры разместить счетчики для регистрации малоуглового рассеяния, имеющего на порядки большее сечение. Первая светимость была зарегистрирована 19 мая 1964 года. Далее велась кропотливая работа по изучению установки, улучшению её параметров и подготовке коллайдера к физическим экспериментам. Шаг за шагом ВЭП-1 продвигался к началу экспериментов по физике высоких энергий [2].

Вспоминает Геннадий Николаевич Кулипанов (2004 год):

*– Поначалу накопления не было, инжентировали однократно. Потом Герман Тумайкин сообразил, что если «бить» длинным импульсом инфлектора, так чтобы впускаемый пучок «бился» один раз, а накопленный – три раза, то у последнего останутся малые колебания. Только после того, как мы это сделали, пошло накопление. Предел в то время был 100 мА. Сейчас этот метод с предударом накопленного пучка используют во всех накопителях, а первыми применили его мы.*

*Сначала «разводили» пучки по фазе, на верхнюю дорожку впускали 60 мА, потом на нижнюю столько же. Поднималась энергия. В процессе подъема корректировались частоты бетатронных колебаний, выставлялась нужная энергия, вводились коррекции для сведения пучков (все это без единого компьютера) по поперечным координатам и по фазе, включалась система стабилизации, и после всего давалось*

разрешение на включение детектора, представляющего систему искровых камер.

Автоматизацией процесса занимались постоянно. Основным узлом управления («компьютером») в то время был реостат с электроприводом. Реостат через стойку БТ-4 управлял током возбуждения мотор-генератора, питающего магнитную систему. Вдоль реостата был тоненький стержень и на нем находилось много концевиков, каждый концевик что-нибудь включал в соответствии с уровнем магнитного поля. Реохорд реостата перемещался и включал концевики, которые вместе с управляющими реле громко щелкали.

А для наблюдения за сведением пучков по СИ сделал систему на шаре конструктор Алексей Щепин. Поначалу, несмотря на все усилия, эта система никак не работала. И даже сам конструктор не мог добиться нужного эффекта. После этого он сделал систему проще, и сведение пучков настраивать стало просто и быстро.

Хочется вспомнить тех, кто в те далекие годы работал на ВЭП-1. Конечно, назвать всех сейчас совершенно невозможно... Магнитными системами занимался Леня Коробейников, ВЧ-системой – Боря Лазаренко, Юра Украинцев, Толя Чернов, системой впуска-выпуска пучка – Юра Матвеев и Андрей Чабанов. Алик Ефимов был лаборантом у Коробейникова, Юра Каркавин, Коля Бегунов – электрики, Ваня Лагутин – лаборант у Давида Весновского, Виктор Семенычев и Володя Стенин – механики, вакуумщики – Блинов Гений Александрович, а Коля Осипов, Володя Крылов и Юра Чесноков – дежурные лаборанты, многие узлы на этапе доводки и запуска установки конструировал Слава Зайцев.

В течение 1965–1968 гг. был поставлены эксперименты при энергиях 2·43 МэВ, 2·100 МэВ, 2·130 МэВ и 2·160 МэВ. Установка была спроектирована на энергию 2·130 МэВ, увеличение энергии было достигнуто за счет размагничивания центрального ярма специальными катушками, которые фактически уменьшали рассеянный поток и разгружали центральное ярмо. В итоге эквивалентная энергия ускорителя электронов, дающего такую же энергию взаимодействия на неподвижной мишени достигла 100 ГэВ!!! (величина, достигнутая только в 1990-е годы). Об этом на экскурсиях на ВЭП-1 с гордостью говорил гостям Андрей Михайлович Будкер. Ещё он любил наблюдать прямо на установке яркое свечение пучка и показывать его гостям, среди которых было много именитых. Максимальная светимость установки составляла около  $5 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Однако понятие светимости в первых экспериментах не использовалось. Основным показателем работы было число событий рассеяния на малые углы и куламы (кулон-амперы), представляющие собой интеграл произведения токов верхней и нижней дорожек за время эксперимента. Отношение «малых углов» к куламам было обратно пропорционально поперечному размеру пучков и характеризовало эффективность встречи, по нынешним понятиям удельную светимость. Пионерские эксперименты по изучению однократного и двойного тормозного излучения послужили основой для последующего мониторинга светимости с использованием этих процессов.

В перерывах между циклами наборов статистики для основных экспериментов, выполняемых совместно с лабораторией В. Сидорова, мы активно занимались пучковой физикой. В первую очередь это было изучение эффектов встречи и нелинейных резонансов, которыми изобиловала магнитная система ВЭП-1. Мы ввели понятие полезной магнитной апертуры, которую теперь называют динамической, и первые провели её измерения в зависимости от величины нелинейностей и частот бетатронных колебаний. ВЭП-1 был большой школой пучковой физики, на нем родились многие методики, которые широко использовались и продолжают использоваться на других установках. На ВЭП-1 возникла идея постановки экспериментов с использованием сверхтонкой внутренней мишени, и после окончания работ со встречными пучками под руководством С.Г. Попова впервые были выполнены такого рода эксперименты уже на одном пучке. Здесь также возникла и была реализована идея выделения монохроматических гамма-квантов из спектра тормозного излучения.

## 2. УСКОРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ [7-14]

Накопительные кольца – это место, где очень удобно заниматься ускорительной физикой, прежде всего в связи со стационарными условиями наблюдения. Кроме того, это были первые накопительные кольца, где экспериментаторов могли ожидать новые эффекты.

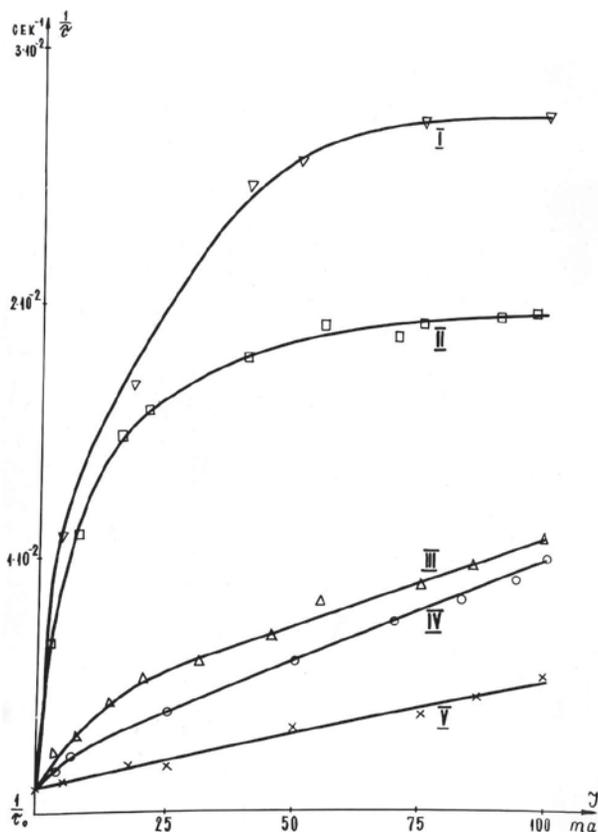
Одним из таких эффектов был эффект внутреннего рассеяния (ЭВР), ограничивающий время жизни при больших токах, открытый на установке «AdA» во Фраскати. На ВЭП-1 он сразу был подробно изучен [9]. Как оказалось, внутрисгустковое рассеяние определяло время жизни во всем диапазоне энергий ВЭП-1 при рабочих токах в режиме набора интеграла светимости (рис. 16), хотя многократное внутреннее рассеяние внутри сгустка, увеличивающее его размеры, несколько уменьшало влияние однократного внутреннего рассеяния.

Однако этого увеличения размеров было недостаточно для получения большого времени жизни пучков, поэтому вводилось искусственное увеличение радиального размера пучков посредством раскачки бетатронных колебаний импульсами, подаваемыми на пластины инфлектора. Это оказалось очень выгодным, так как время жизни увеличивалось (квадратично с радиальным размером) из-за двух эффектов: увеличения объема сгустка и поперечного импульса, определяющего сечение при внутрисгустковом рассеянии. Одновременно и светимость увеличивалась, так как появилась возможность увеличения токов. Диапазон энергий ВЭП-1 (43-160 МэВ) охватывал разные процессы, определяющие размеры и время жизни пучков. Так, в области низких энергий на малых токах размеры пучков определялись многократным рассеянием на остаточном газе, а время жизни – однократным кулоновским рассеянием. В области высоких энергий доминирующими становились эффекты квантовых флуктуаций синхротронного излучения и однократное тормозное излучение. Были выполнены тщательные измерения, подтверждающие наличие этих механизмов, и получено хорошее совпадение с расчетами.

Впервые наблюдались эффекты накопления ионов и их влияния на размеры и время жизни пучка. Ввиду малого расстояния между сгустка-

**Рис. 16.** Зависимость обратного времени жизни пучков от тока.  
 $E=90$  МэВ.

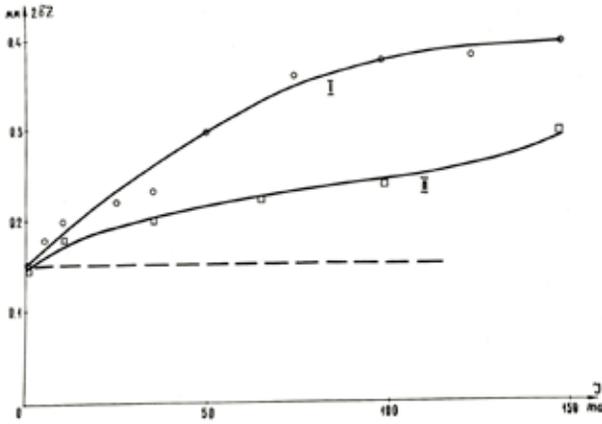
- I – размеры естественные, отсос ионов включен,
- II – размеры естественные, без отсоса ионов,
- III – радиальный размер увеличен,
- IV – вертикальный размер увеличен,
- V – увеличены вертикальный и радиальный размеры



ми ионы не успевали покидать пучок, а накапливались в пучке, что наблюдалось по уменьшению тормозного излучения с равновесной орбиты и уменьшению вертикального размера пучка при включении отсоса ионов. На рис.17 видно, что включение отсоса ионов уменьшает вертикальный размер пучка. Наблюдаемый остаточный рост вертикального размера с включенным отсосом при увеличении тока определяется ростом радиального размера и связью

вертикального и радиального движения. Эксперименты показали, что имеются два механизма влияния ионов на размер пучка: многократное рассеяние и сдвиг рабочей точки из-за пространственного заряда к работающим резонансам. Однако уменьшение поперечных размеров при включении отсоса ионов приводило к уменьшению времени жизни из-за ЭВР. Оказалось, что отсос ионов из пучка слабее улучшает время жизни, чем его ухудшает ЭВР. Поэтому в режиме набора статистики отсос ионов не использовался.

Еще до получения первых встречных пучков встал вопрос об устойчивости режима столкновений пучков. Вначале появились линейные теории, которые давали оптимистические результаты. Но поле встречного пучка является нелинейным, поэтому требовались исследования. К этой задаче по инициативе А.Н. Скринского вначале подключился Я.С. Дербенев и позднее С.И. Мишнев. Было показано, что вблизи нелинейных резонансов должен проявляться эффект, связанный с появлением устойчивых замкнутых орбит и образованием областей бетатронной автофазировки (ОБА), которые с увеличением тока могут перекрываться. Одновременно Б.В. Чириковым были найдены условия перехода регулярного бетатронного движения в стохастическое. Эта

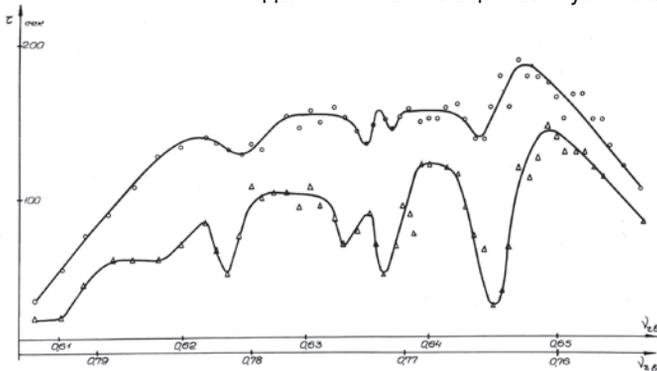


**Рис. 17.** Влияние отсоса ионов на вертикальный размер пучка. I – отсос ионов выключен. II – отсос ионов включен.  $E=100$  МэВ

теоретическая база явилась хорошей поддержкой при проведении экспериментального изучения. Действительно, было обнаружено,

что при столкновении пучков проявляются резонансы даже очень высоких порядков. Обычно это отражалось в увеличении размера пучка и уменьшении времени жизни. Например, вблизи рабочей точки заметно проявлялся даже резонанс 7/9. Поэтому для получения максимальной светимости требовалась тонкая настройка частот бетатронных колебаний. К сожалению, в слабофокусирующей машине невозможно независимое управление вертикальной и радиальной бетатронными частотами, поэтому возможности экспериментатора в этом плане были ограничены. На рис. 18 показано значение времени жизни пучка при наличии встречного пучка и его отсутствии. Видно, что встречный пучок усиливает влияние машинных резонансов. В результате таких исследований были подтверждены ограничения на предельную величину сдвига частот бетатронных колебаний, вызываемого встречным пучком. Стоит отметить, что для измерения времени жизни пучков на базе самописца была создана аналоговая система, позволившая следить за временем жизни непосредственно по шкале самописца. Это обеспечило удобство и оперативность при проведении пучковых экспериментов. Важной частью методики были устройства, разработанные для оперативного измерения продольного и поперечных размеров сгустков.

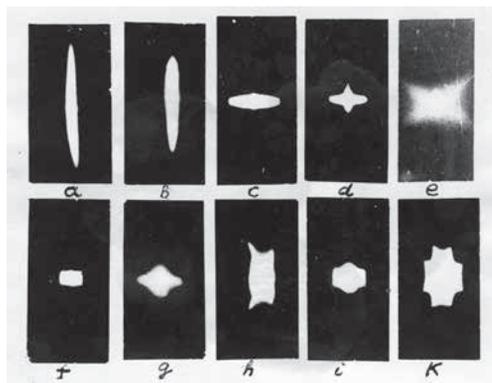
Одновременно началось изучение динамики частиц вблизи машинных нелинейных резонансов и в отсутствие встречного пучка. Магнитная система ВЭП-1 оказалась привлекательной для изучения нелинейного движения. В кольцо были установлены октуполь и секступоль, что по-



**Рис. 18.** Время жизни пучка на верхней дорожке в зависимости от частоты бетатронных колебаний без встречного пучка (верхняя кривая) и при наличии встречного пучка (нижняя кривая).  $E=43$  МэВ

**Рис. 19.** Фотографии поперечного сечения пучка вблизи различных резонансов:

- a)  $Q_r=2/3$ , b)  $Q_r=3/4$ , c)  $Q_s=3/4$ , d)  $Q_z=3/4$  и  $3Q_r-2Q_s=2$ , e)  $2Q_r+Q_z=2$ ,  
 f)  $2Q_r+Q_z-Q_s=2$ , g)  $Q_z=5/6$ , h)  $Q_z+4Q_r=3$ ,  
 i)  $4Q_z+Q_r=4$ , k)  $4Q_z+Q_r=4$  и  $Q_z+4Q_r=3$



зволило менять машинную нелинейность. Имелся также хороший инструментарий для проведения таких исследований. Даже визуально можно было наблюдать богатое разнообразие нелинейных резонансов (рис.19).

С помощью пучка было произведено изучение магнитной системы, измерены квадратичная и кубическая нелинейности, основным источником которых были щели для вывода рассеянных электронов. Это позволило определить резонансные гармоники и провести оценки силы основных резонансов. В частности, были измерены и сравнены с расчетом параметры области бетатронной автофазировки: частоты фазового движения, ширины этой области и времени жизни частиц в ней (рис. 20). Изучен характер движения частиц на суммовых и разностных резонансах. Было исследовано влияние синхротронных колебаний на динамику бетатронного движения. Впервые было показано, что синхробетатронные резонансы расширяют область действия нелинейных резонансов.

Из воспоминаний Г.Н. Кулипанова (Б.В. Чириков, Воспоминания):

– На одном из институтских семинаров, где Б.В. Чириков подробно рассказывал о нелинейных резонансах и стохастической неустойчивости, я осознал, что для изучения нелинейного резонанса как явления, электронный пучок в накопителе – идеальная модель, учитывая следующее:

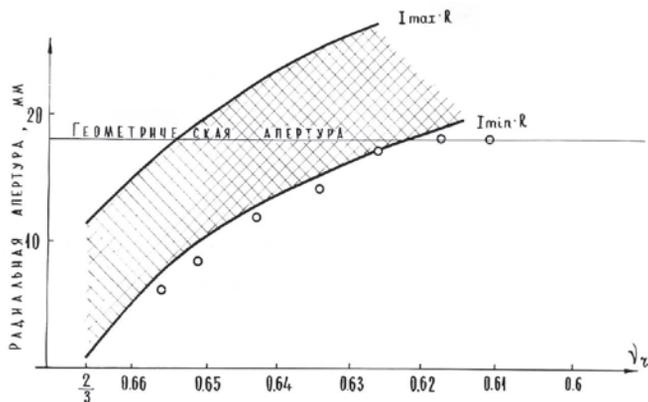
– добротность электронного пучка в накопителе ВЭП-1 как осциллятора составляет  $\sim 10^8$ ;

– магнитная система накопителя позволяет иметь большую и регулируемую величину кубической нелинейности;

– специальная система внешнего резонансного высокочастотного возбуждения (созданная и используемая нами для измерения частот бетатронных колебаний) позволяла возбуждать нелинейный резонанс при любой частоте бетатронных колебаний, не ограничивая себя только естественными «машинными» резонансами;

– изменяя амплитуду высокочастотной раскачки и величину кубической нелинейности, можно легко изменять параметры нелинейного резонанса: частоту фазовых колебаний и размер области автофазировки.

Кроме того, используя вторую внешнюю резонансную высокочастотную раскачку можно исследовать взаимодействие пары резонансов в большом диапазоне их взаимного расстояния и отношения



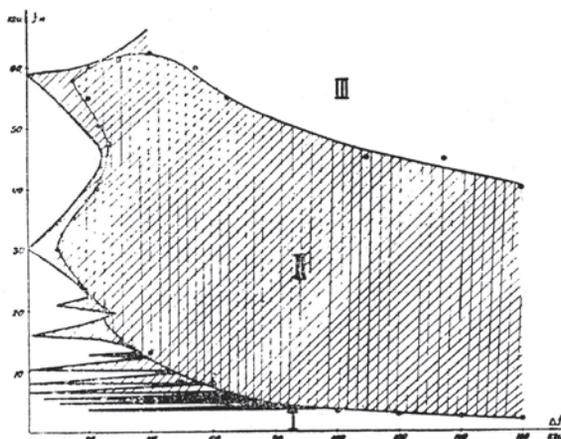
**Рис. 20.** Область бетатронной автофазировки (заштриховано), связанная резонансу  $3Q_r=2$  в зависимости от частоты радиальных бетатронных колебаний (расчет). Нижняя граница области соответствует максимальной допустимой амплитуде, т.е. определяет динамическую (магнитную) апертуру. Можно видеть хорошее совпадение измеренного значения динамической апертуры с расчетом

размеров областей автофазировки и тем самым в «настоящих экспериментах» проверить «критерий Чирикова». Достаточно легко можно было вводить также частотную модуляцию ВЧ напряжения, используемого для возбуждения нелинейного резонанса, что при изменении величины девиации и частоты модуляции моделировало бы периодическое прохождение нелинейного резонанса.

Пучок электронов, представляющий собой ансамбль высокодобротных осцилляторов, совершающих колебания в нелинейной потенциальной яме, действительно оказался объектом, позволившим выполнить исследования по изучению условий перехода регулярного колебательного движения в стохастическое. Изучалось воздействие на такой осциллятор периодических возмущений, близких к его частоте вертикальных бетатронных колебаний (85 МГц). Это воздействие было модулировано частотой, лежащей в диапазоне частот фазовых колебаний (0–60 кГц) в области бетатронной автофазировки (ОБА) при глубине модуляции до 200 кГц. С помощью диссектора и ФЭУ со щелевой диафрагмой наблюдалось поведение пучка. Интерес представляло распределение плотности в поперечном сечении и наличие или отсутствие регулярного движения. Получены интересные результаты, демонстрирующие в зависимости от частоты и глубины модуляции переход из области регулярного движения частиц в область стохастичности (рис. 21). Эксперимент подтвердил правильность известных теоретических исследований, выполненных Б.В. Чириковым.

Следует отметить, что эксперименты по исследованию нелинейных резонансов и «эффектов встречи» часто проводились параллельно с командой ВЭПП-2, многие печатные работы были основаны на совместных исследованиях, в которых принимали участие со стороны ВЭПП-2 В.Л. Ауслендер, Н.С. Диканский, С.И. Мишнев, Ю.М. Шатунов [7]. Это были пионерские работы, доложенные и опубликованные в трудах международных совещаний и конференций, но, к сожалению, не опубликованные в цитируемых журналах и поэтому малоизвестные. Правда, следует заметить, все препринты ИЯФ, описывающие эти эксперименты, были переведены на английский язык в SLAC и FERMILAB, и эти переводы доступны в библиотеках и в настоящее время.

**Рис.21.** Диаграмма устойчивости движения при периодическом прохождении резонанса (при частоте малых фазовых колебаний в ОБА 36 кГц) в зависимости от частоты модуляции и глубины модуляции. Наблюдались разные области движения: I – медленное (адиабатическое) прохождение резонанса, II – стохастическая область (дважды заштрихованная область – полное разрушение ОБА, ординарно-частичное разрушение ОБА), III – модуляционные резонансы (аналог синхробетатронным)



**О когерентных неустойчивостях.** На ВЭП-1 и синхротроне Б-2С наблюдалась продольная неустойчивость. К этому времени в литературе появились первые сообщения о такой неустойчивости и возможности подавления её перестройкой частоты резонатора в сторону низких частот. Подавить неустойчивость удалось соответствующей перестройкой резонатора и генератора. Поперечные неустойчивости на ВЭП-1 не наблюдались. По-видимому, это связано с малым количеством частиц в сгустке ( $5 \cdot 10^9$ ) и большой кубичной нелинейностью. Следует также вспомнить об изучении коллективных явлений в синхротроне Б-2С в квазибетатронном режиме. Наблюдаемая в определенных условиях неустойчивость исследовалась Г. Кулипановым и была интерпретирована как двухпотоковая (диокотронная) неустойчивость. На синхротроне Б-2С впервые наблюдались потери частиц при пересечении синхробетатронных резонансов [14].

За истекшие несколько десятков лет произошёл огромный прогресс в изучении нелинейных явлений и коллективных эффектов. Нынешнее поколение физиков-ускорительщиков с высокой надёжностью может просчитать и предсказать всю динамику частиц в циклических ускорителях и коллайдерах. И бурное развитие всей этой богатой физики началось с первых коллайдеров, к числу которых относится и ВЭП-1 (рис. 22).

**Рис. 22.** ВЭП-1 теперь историческая реликвия. Участники экспериментов (слева направо): Г.Н. Кулипанов, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ВЭП-1 прежде всего была показана принципиальная возможность постановки значимых экспериментов по физике элементарных частиц на встречных пучках. Были сделаны первые шаги в пучковой физике и методике. ВЭП-1 стал хорошей школой для физиков-ускорительщиков и инженеров. Опыт, полученный на этом первом коллайдере, сыграл важную роль в дальнейшем развитии метода встречных пучков.

На ВЭП-1 были впервые поставлены эксперименты с сверхтонкой внутренней мишенью, послужившие основой экспериментов по ядерной физике [15].

В создании комплекса ВЭП-1, его запуске и постановке экспериментов принимал участие большой коллектив физиков, инженеров и лаборантов. Непросто через много лет вспомнить всех участников работы. В первую очередь это были физики и инженеры старшего поколения: Г.И. Будкер, А.А. Наумов, Б.Г. Ерозолимский и В.С. Панасюк, сыгравший важную роль в создании ускоряющих ВЧ систем, Е.С. Миронов, Г.А. Блинов, разработчик вакуумных систем. Следует вспомнить и Е.А. Абрамяна, создавшего бетатрон Б-2, послуживший базой для создания первого синхротрона. Конструкторскими работами в Москве руководил И. Бендер. Далее назовем московскую команду физиков и инженеров, принявших на разных этапах участие в создании и запуске комплекса ВЭП-1. Это Л.И. Бондаренко, А. Кадымов, оставшиеся в Москве, и продолжившие эту работу в Новосибирске А.Н. Скринский, С.Г. Попов, Л.С. Коробейников, Г.И. Сильвестров, Ю.Г. Матвеев, Г.Н. Острейко. В Новосибирске к работе подключились С.И. Мишнев, Г.М. Тумайкин, Б.А. Кудинов, Г.Н. Кулипанов, Т.А. Всеволожская, Э.И. Зинин, А.В. Киселёв, Б.В. Лазаренко, Ю.Г. Украинцев, В.Н. Пакин, Л.Л. Данилов, Д.К. Весновский, И.А. Кесельман, Б.Ф. Баянов, А.С. Медведко и др. В этом перечне не названа другая часть команды физиков и инженеров, создававшая системы регистрации и участвующая наравне с ускорительщиками в постановке первых экспериментов на встречных пучках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Байер, Г.И. Будкер, Г.А. Блинов, Л.Н. Бондаренко, Б.Г. Ерозолимский, Л.С. Коробейников, Е.С. Миронов, А.А. Наумов, А.П. Онучин, В.С. Панасюк, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев. Встречные электрон-электр. пучки. Труды Междунар. конф. по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с. 274.
2. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Состояние работ на электрон-электронном накопителе ВЭП-1. Атомная энергия, 1965, 19, № 6, с. 497.
3. С.Г. Попов. Сильноточный синхротрон Б-2С и его применение в качестве инжектора установки со встречными электрон-электронными пучками. Дисс. на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1964.

4. Л.И. Бондаренко. Импульсный однооборотный выпуск пучка электронов с энергией 50 МэВ из синхротрона Б-2С. Дисс. на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1963.

5. Г.Н. Острейко. Устройства высокочастотного питания комплекса установок встречных электрон-электронных и позитрон-электронных пучков. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Новосибирск, 1967.

6. Э.И. Зинин, Л.С. Коробейников, Г.Н. Кулипанов, Б.Л. Лазаренко, Ю.Г. Матвеев, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Т.П. Стародубцева, Г.М. Тумайкин. Система управления и контроля пучков в электрон-электронном накопителе ВЭП-1. Атомная энергия, 1966, т. 20, № 3, с. 220-223.

7. В.Л. Ауслендер, Э.И. Зинин, Г.Н. Кулипанов, С.И. Мишнев, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов. Время и размеры электронного пучка в накопителе. Там же. стр. 200-206.

8. В.Л. Ауслендер, Г.Н. Кулипанов, С.И. Мишнев, А.А. Наумов, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Экспериментальные данные по взаимодействию пучков при встрече. Атомная энергия, 1966, 20, №3, с. 213.

9. В.Л. Ауслендер, Л.С. Коробейников, Г.Н. Кулипанов, С.И. Мишнев, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М. Шатунов. Проявление нелинейных резонансов в накопителях. Атомная энергия, 1967, 22, № 3, с. 179-188.

10. Г.Н. Кулипанов, С.И. Мишнев, А.Н. Скринский. Изучение стохастической неустойчивости при периодическом пересечении резонанса. Труды Междунар. конф. по ускорителям, Ереван, 1969, Атомиздат, 1970, т. 2. стр. 300-303.

11. Н.С. Диканский, Г.Н. Кулипанов, Б.А. Лазаренко, С.И. Мишнев, С.Г. Попов. Изучение прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний за счет радиационного затухания. Там же. стр. 308-311.

12. Г.М.Тумайкин. Изучение поведения электронного пучка в накопителе ВЭП-1. Дисс. на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1967.

13. Г.Н. Кулипанов. Экспериментальное исследование нелинейных резонансов. Дисс. на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1969.

14. Г.Н. Кулипанов, С.Г. Попов, Г.М. Тумайкин. Эксперименты по изучению потерь в циклических ускорителях при прохождении через нелинейные резонансы. Труды Всесоюзного совещания по ускор. зар. частиц. Москва, 1970, т. 2, стр. 374-378.

15. Г.И. Будкер, А.П. Онуцин, С.Г. Попов, Г.М. Тумайкин. Эксперименты с мишенью в электронном накопителе. Ядерная физика, 1967, 6, с.775.

## ВЭПП-2 – ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР ИЯФ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Уже на первой стадии развертывания работ по ВЭП-1, когда ещё не было ясно, какие подводные камни могут встретиться на этом пути, Андрею Михайловичу с его коллегами и учениками хватило смелости приступить к осуществлению рискованного по тем временам проекта – установки со встречными электрон-позитронными пучками. К тому же ещё ничего не было известно о подобных планах других лабораторий.

Вспоминает Владимир Николаевич Байер [1]:

*– В октябре 1959 г. в кабинете А.М. Будкера состоялась длительная дискуссия, посвященная работам института по программе встречных электрон-электронных пучков, в которой принял участие И.Я. Померанчук. В дискуссии перемежались теоретические соображения по проверке квантовой электродинамики на малых расстояниях в электрон-электронном рассеянии на большие углы и технические детали, относящиеся к установке ВЭП-1.*

*Большого восторга все сказанное у И.Я. Померанчука не вызвало и никаких слов поддержки не последовало. Впрочем, у остальных участников также не наблюдалось энтузиазма. Проводив И.Я. Померанчука,*



*Андрей Михайлович заглянул ко мне и посетовал, что как-то наша программа не производит впечатления и нужно думать еще, как ее усовершенствовать. Я ответил, что программа будет неизмеримо более богатой, если вместо электрон-электронных встречных создать электрон-позитронные встречные пучки. Первая реакция Будкера была резко негативной, и он ушел, но минут через 20 вернулся. В последовавшей после этого дискуссии мы много раз менялись местами, убеждая друг друга и высказывая сомнения в возможности их создания. В итоге Андрей Михайлович потребовал, чтобы я отложил все дела и оценил возможность реализации новой программы...*

*На фоне того, что и установки с электрон-электронными встречными пучками были еще далеки от завершения, и далеко не все считали, что их удастся запустить, предложение создать электрон-позитронные встречные пучки с резко повышенными требованиями к интенсивности и качеству пучков не встретило поддержки у многих известных ученых в Академии наук СССР.*

*Первые возражения, типа «А у вас все аннигилирует!» были легко опровергнуты, поскольку сечение аннигиляции заметно меньше, чем сечение рассеяния на малый угол, которое определяет время жизни*

пучка и которое одинаково для электронов и позитронов. Гораздо сложнее было преодолеть общий отрицательный настрой.

*И.В. Курчатов направил программу электрон-позитронных встречных пучков на отзыв трем ведущим специалистам. Отзывы были разные, но все резко отрицательные. Игорь Васильевич тогда, посмеиваясь, заявил: «Значит, в этом есть что-то нетривиальное. Надо делать».*

По воспоминаниям В.Н. Байера, уже в декабре 1959 года была подготовлена первая схема проекта. Чтобы обеспечить рождение К-мезонов, была выбрана энергия пучков 700 МэВ. В начале 1960 года началось формирование команды, и вскоре А.Н. Скринский был назначен главой лаборатории.

## 2. ИНЖЕКТОР [2-7]

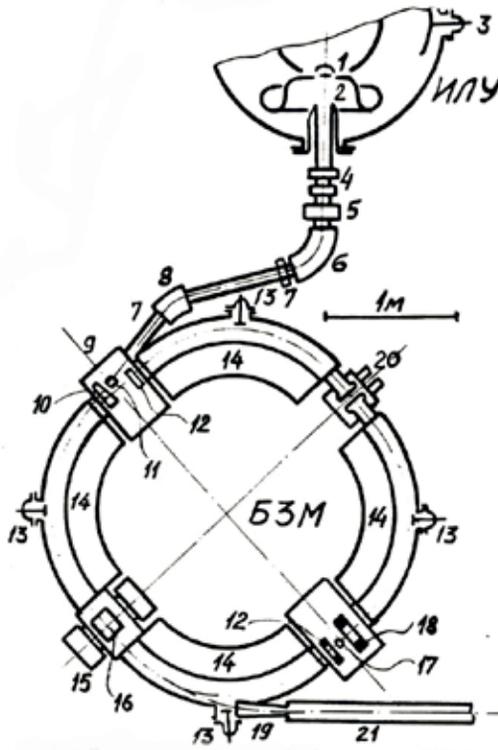
С самого начала А.М. Будкеру было ясно, что институт не может пойти по пути использования в качестве инжектора линейного ускорителя, который мог бы обеспечить высокую интенсивность электронов и, соответственно, позитронов. Не было в институте сложных технологий для создания такого ускорителя, а в стране не было мощных и надежных клистронов. Потребовались бы, как показывает нынешний опыт, многие годы для создания такого инжектора. Однако полученный к этому времени в ИЯФ опыт создания ускорителей показал, что и решения с безжелезными синхротронами типа Б-2С не годятся для создания высокоэнергичного и быстроциклического синхротрона. И А.М. Будкер с А.А. Наумовым сделали следующий шаг, предложив конструкцию, в которой магнитное поле формируется одновитковыми токовыми шинами и магнитными полюсами. Преимущества такой конструкции магнитов заключаются в малой величине рассеянных полей, возможности большей частоты повторения и обеспечения малого времени ускорения. В используемых в то время многовитковых конструкциях магнитов большая индуктивность не позволяла этого сделать. К примеру, в сооружаемом тогда в Томске синхротроне «Сириус» время ускорения было 40 мс, а в синхротроне Б-3М, о котором речь пойдет ниже, около 1,5 мс. Это важно с точки зрения подавления разного вида неустойчивостей, свойственных сильноточному ускорителю.



**Рис. 1.** А.А. Наумов и А.М. Будкер

О начале работ по проектированию синхротрона вспоминает В.В. Петров: «После окончания МГУ в начале 1960 года мне поручили заниматься синхротроном Б-3М – первым в то время железно-безжелезным синхротроном под руководством Алексея Александровича Наумова, оказавшего большое влияние на мою жизнь, включая последующий переезд в Новосибирск. Началось все с создания макета в масштабе 1:3, на котором проверялись общие принципы формирования магнитного поля железными полюсами и скиновыми поверхностями медных шин. На этой работе я впервые встретился с конструктором Валентином Сергеевичем Николаевым, поступившим в ИЯФ в один день со мной, дружба с которым прошла через многие годы... В конце 1960 года я впервые приехал в Новосибирск, пока только в командировку, для испытаний «восьмушки» – полномасштабной модели Б-3М. Это было весьма кстати, поскольку в Москве после окончания МГУ мне в течение долгих месяцев не давали общежития, и ночевать приходилось на диване в кабинете Будкера, подложив под голову стопку журналов и укрываясь рабочим халатом».

Инжекционная часть комплекса ВЭПП-2 состояла из импульсного линейного ускорителя (ИЛУ), электронно-оптической системы транспортировки пучка, электронного синхротрона (Б-3М), устройства впуска-выпуска, набора систем питания элементов комплекса, управления и контроля. Схема комплекса ИЛУ – Б-3М показана на рис. 2.



**Рис.2.** Схема ускорительного комплекса ИЛУ – Б-3М.

- 1 – электронная пушка,
- 2 – ускоряющий зазор,
- 3 – экран для подстройки частоты,
- 4 – дублет квадрупольных линз,
- 5 – резонатор,  $A = 10$  см,
- 6, 8, 10 – поворотные магниты,
- 7 – квадрупольные линзы,
- 9 – прямолинейный промежуток Б-3М,
- 11 – дефлектор Б-3М,
- 12 – линза Панофского,
- 13 – горизонтальные пробники,
- 14 – дипольные магниты Б-3М,
- 15 – бетатронный сердечник,
- 16 – инфлектор,
- 17 – вертикальный пробник,
- 18 – пояс Роговского,
- 19 – выпускное отверстие,
- 20 – ускоряющий резонатор,
- 21 – электронно-оптический канал Б-3М - ВЭПП-2

За время своего существования комплекс ИЛУ – Б-3М прошел несколько этапов модернизации, так что в дальнейшем будет приведено, в основном, описание финального его состояния, с указанием, по возможности, и первоначальных разработок.

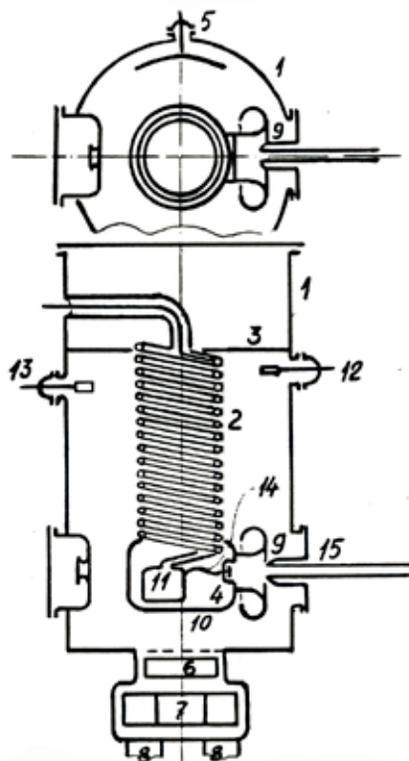
Форинжектор электронов ИЛУ представляет собой резонансный контур, образованный четвертьволновой спиральной линией, нагруженной на конце емкостной насадкой, в которой размещена электронная пушка. Система питания ускорителя работает в режиме автогенерации на триодах ГК-5А. Для анодного питания автогенератора используется модулятор, подающий на анод лампы импульс напряжения 30 кВ с током 1 кА. Схема ИЛУ показана на рис. 3.

В баке 1 (высотой 2,5 м, диаметром 2 м) из нержавеющей стали размещена медная спираль 2 длиной 40 м, состоящая из 12 витков, которая образует спиральную линию. К нижней части спирали крепится насадка 10, внутри которой расположены электронная пушка 4 и вакуумноплотный контейнер 11 с внутренним атмосферным давлением. Импульс на управляющую сетку для отпираания пушки и запирающее напряжение подается по высоковольтным кабелям, проходящим внутри спирали в контейнер. Там же проходят кабели для нагревателя катода. Мощность для возбуждения подводится к первому верхнему витку (на рис. 3 не указано).

После включения режима автогенерации в резонансном контуре ИЛУ постепенно за время около 1 мс запасается энергия, при достижении максимального напряжения вклю-

**Рис. 3.** Схема импульсного ускорителя электронов ИЛУ (верхняя часть – разрез в сечении пушки).

- 1 – корпус резонатора,
- 2 – медная спираль,
- 3 – медный экран,
- 4 – электронная пушка,
- 5 – экран для подстройки частоты резонатора,
- 6 – вакуумный шибер,
- 7 – азотная ловушка,
- 8 – магниторазрядные насосы,
- 9 – формирующие электроды,
- 10 – емкостная насадка спирали,
- 11 – вакуумноплотный контейнер,
- 12 – измерительная петля,
- 13 – петля обратной связи,
- 14 – коаксиал высоковольтного питания пушки,
- 15 – электронно-оптический канал ИЛУ – Б-3М

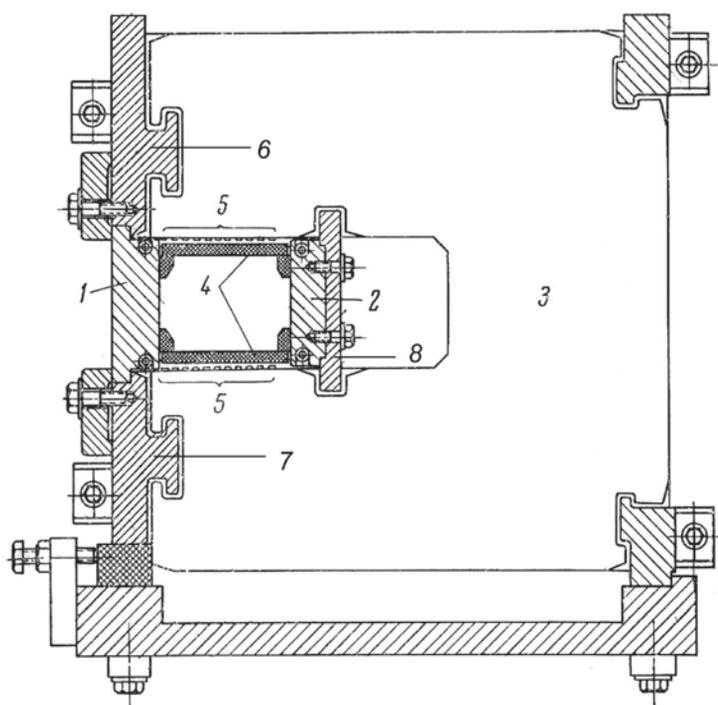


чается электронная пушка на время одного оборота электронов в синхротроне.

В ускоряющем зазоре ИЛУ на пучок кроме продольного электрического поля действуют поперечные магнитные поля, обусловленные током спирали и током смещения насадки 10. Формирующие электроды 9 позволяют уменьшить влияние магнитных полей на ускоряемые частицы и существенно ослабить увеличение эффективного фазового объема. Далее пучок проходит через электронно-оптический канал, состоящий из системы поворотных магнитов и квадрупольных линз. Оптическая схема канала обеспечивает согласование оптических и дисперсионной функций синхротрона с параметрами инжектируемого пучка. Ось канала лежит ниже медианной плоскости синхротрона, выпуск пучка производится в прямолинейном промежутке по вертикали с использованием параллельного переноса.

#### Основные параметры ИЛУ:

Частота резонатора	2,5 МГц
Напряжение на ускоряющем зазоре	2,5 МВ
Длительность выпущенного сгустка электронов	30 нс
Импульсный ток электронов	30 А
Импульсная мощность генератора	3 МВт



**Рис. 4.** Поперечный разрез магнита Б-3М.

1,2 – токонесущие шины;  
3 – магнитопровод;  
4 – крышки из эпоксита;  
5 – корректирующие витки;  
6,7,8 – бобышки из нержавеющей стали

Электромагнит синхротрона – кольцевой ( $R \cong 1$  м), С-образный, с четырьмя прямолинейными промежутками по 40 см каждый, в которых расположены системы впуска, выпуска, контроля, бетатронный сердечник и резонатор.

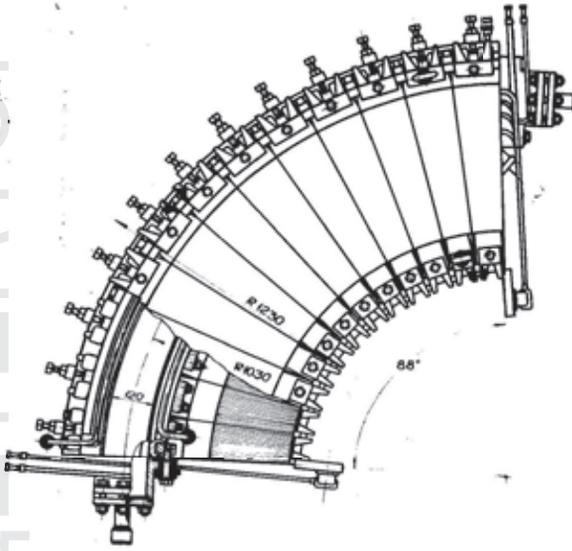
На рис. 4 показан разрез поперечного сечения магнита Б-3М. Магнитное поле создается импульсным током, протекающим по шинам 1 и 2 в противоположных направлениях. Основная часть магнитного потока замыкается через магнитопровод 3. В такой конструкции магнитное поле за наружной шиной пренебрежимо мало, что позволяет решить проблему вывода пучка через небольшое отверстие в шине. Длительность импульса, питающего магнит, выбрана такой, что толщина скин-слоя, в данном случае  $\sim 0,3$  см, много меньше толщины шины. Поэтому необходимая форма поля в рабочей области создается как наклоном полюсов магнитопровода 3, так и соответствующим профилем шин, обеспечивающим расчетное значение показателя спада магнитного поля  $n=0.6$ . В силу особенностей формирования поля такой магнит можно назвать «железно-безжелезным».

Магнитопровод синхротрона набран из листов трансформаторной стали Э-44 толщиной 0,35 мм. Листы стали склеены в короткие (по азимуту) блоки эпоксидной смолой с наполнителем из кварцевой пыли. Это было сделано потому, что, к сожалению, в то время еще не было опыта изготовления клееных магнитов большой длины. Каждый квадрант (рис. 5) состоит из 12 блоков (рис. 4). В каждый блок с помощью эпоксидной смолы и изолирующих прокладок вклеены бобышки из нержавеющей стали 6, 7, 8, к которым, после их прецизионной обработки на карусельном станке, крепятся токонесущие шины 1, 2.

Электромагнит и вакуумная камера представляют собой единое целое. Токонесущие шины являются одновременно боковыми стенками вакуумной камеры. В токонесущие шины впаяны медные трубки водяного охлаждения. Все квадранты соединены последовательно. Шины на торцах магнитов коммутируются с помощью рамочных фланцев, уменьшающих рассеянные поля на торцах. Азимутальный размер каждого магнита составляет  $88^\circ$ . Каждый квадрант смонтирован на стальной тумбе, которая крепится на общей толстой стальной плите на бетонном фундаменте.

Горизонтальные крышки 4, сделанные из эпостека (стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой) и покрытые внутри аквадагом, вкуче с токонесущими шинами образуют вакуумную камеру синхротрона. Многолетний опыт эксплуатации показал их отличную радиационную стойкость. Снаружи на крышках имеются пазы, в которые заложены корректирующие витки 5, позволяющие регулировать градиент и положение медианной плоскости. Для радиальной коррекции орбиты используются специальные витки на ярмах. Полная апертура вакуумной камеры составляет 120 мм по радиусу и 80 мм по высоте.

Системы впуска и выпуска уменьшают вертикальную и радиальную апертуру соответственно на 30 мм (на первом этапе работы синхротрона инжекция производилась по радиусу в середине квадранта и ограничивала радиальную апертуру на 2 см). Выпускной канал проходит через середину шин квадранта и расположен таким образом, что ось канала касательна к орбите в точке выпуска. Поперечное сечение окна выпускного канала –  $2,3 \times 2,3$  см.



**Рис. 5.** Разрез квадранта Б-3М, вид сверху

Для возбуждения электромагнита совместно с Всесоюзным электротехническим институтом им. Ленина была создана система питания, обеспечивающая получение однополярных импульсов тока длительностью  $1,5 \cdot 10^{-3}$  сек при токе амплитудой до 150 кА. Импульсный ток создается при

колебательном разряде мощной конденсаторной батареи ёмкостью  $C = 20\,000$  мкФ на индуктивность электромагнита  $L \cong 10^{-5}$  Гн через систему коммутирующих вентилей. В качестве коммутатора на первом этапе запуска использовались ртутные игнитроны, затем тиристоры. В промежутке между рабочими импульсами батарея перезаряжается через вспомогательную индуктивность. Для равномерной загрузки сети батарея разбита на 18 групп, которые заряжаются поочередно и лишь в момент разряда на шины электромагнита включаются параллельно.

В Б-3М принята однооборотная инжекция. Инфлектор расположен в прямолинейном промежутке, работает в режиме бегущей волны и обеспечивает полное гашение вертикального угла траектории частиц.

Энергия инжектируемого в Б-3М пучка недостаточна для синхротронного режима, поэтому с помощью специального бетатронного сердечника пучок предварительно ускоряется до энергии 7 МэВ, после чего включается высокочастотная ускоряющая система и основное ведущее магнитное поле.

До 1985 года высокочастотная система Б-3М работала на третьей гармонике частоты обращения частиц. Для получения необходимого ускоряющего напряжения от генератора требовалась импульсная ВЧ-мощность порядка 1,5 МВт. При этом лампа выходного каскада генератора работала с токами, близкими к предельным, ввиду чего она довольно быстро теряла эмиссию, и ее приходилось часто менять. Кроме того, возникали трудности, связанные с неустойчивостью пучка в режиме с тремя распределенными по азимуту сгустками, что ограничивало величину захваченного и ускоренного тока.

С учетом указанных недостатков, ВЧ-система Б-3М была подвергнута кардинальной модернизации. Ускоряющая система была перестроена на первую гармонику частоты обращения. Вакуумный ускоряющий резонатор выполнен в виде двух короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий, на свободных концах которых закреплены бобышки, образующие ускоряю-

щий зазор. Для уменьшения геометрических размеров резонатора объем между проводниками линий заполнен ферритом.

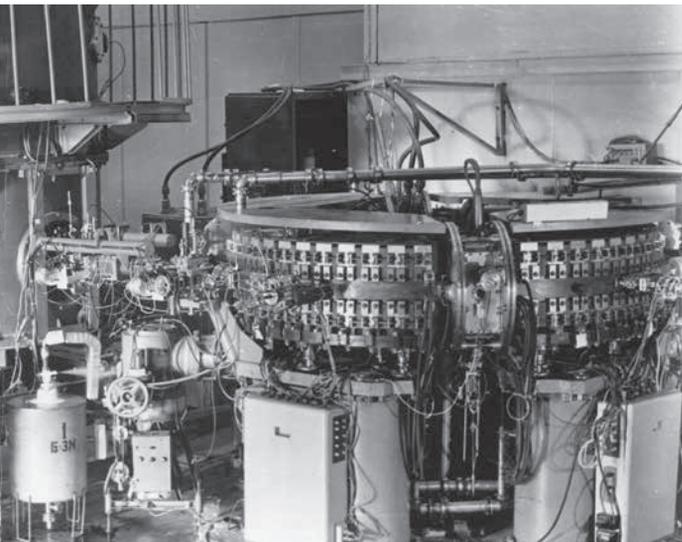
Выпуск из синхротрона однооборотный. На первом этапе работы в качестве дефлектора использовалась короткозамкнутая линия длиной около 80 см с волновым сопротивлением 50 Ом, на которую подавался высоковольтный импульс порядка 90 кВ. Серьезными недостатками этого дефлектора были трудность заведения пучка в него перед выпуском и неизбежные потери электронов. В последующем был изготовлен укороченный дефлектор в виде С-образного сердечника длиной 10 см с магнитопроводом из листов железа марки ХВП толщиной 80 мкм, изолированных друг от друга лаковой изоляцией и спеченных при высокой температуре под давлением. Дефлектор был установлен в прямолинейном промежутке на конце коаксиального герметизированного токопровода, который можно перемещать по вертикали дистанционно.

Синхротрон проработал свыше 50 лет, обеспечивая работу трех электрон-позитронных коллайдеров: ВЭПП-2, ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. За эти годы модернизации подверглись инжектор, системы впуска-выпуска, ВЧ-система, системы питания и электроника. Последняя прошла длинный путь от аналоговых устройств стабилизации, контроля и управления до современной цифровой компьютерной техники.

#### **Основные параметры синхротрона Б-3М:**

Энергия инжекции	2,5 МэВ
Максимальная энергия	250 МэВ
Радиус поворота в магнитах	103 см
Длина прямолинейного промежутка	40 см
Бетатронные частоты $Q_z$ ; $Q_x$	0,87; 0,77
Максимальное ускоряющее напряжение	24 кВ
Частота повторения	1 Гц
Ускоренное число электронов	$3 \cdot 10^{11} \text{сек}^{-1}$

Руководил созданием инжекторной части коллайдера Алексей Александрович Наумов. Под его руководством удалось менее чем за два года смонтировать и запустить синхротрон. Основу команды составляли молодые физики-выпускники МГУ, начавшие работать еще в Москве: Валерий Петров, Геннадий Яснов, Александр Киселев и участник войны Иван Тимошин, ещё до запуска ушедший на другую тематику. В Новосибирске команда пополнилась еще рядом сотрудников: Вячеславом Туркиным, Владимиром Купчиком, Вячеславом Сербиным и другими. Естественно, без квалифицированной команды инженеров и прежде всего радистов создание синхротрона-инжектора было невозможно. Это были приехавшие из Москвы Вадим Семёнович Панасюк, Лев Юдин, Геннадий Острейко, Олег Курнаев. В Новосибирске добавились Евгений Мельников (до ИЯФ главный инженер Новосибирской радиостанции), Евгений Харитонов, Александр Панфилов, Иван Макаров, Виктор Ерохов, Владимир Кузнецов, Анри Егоров, Виктор Петров, Владимир Пильский, Владимир Нифонтов, будущий писатель Давид Константиновский, Нина Коршунова, Геннадий Кочурин и другие. Их усилиями было создано много мощных уникальных систем питания установок



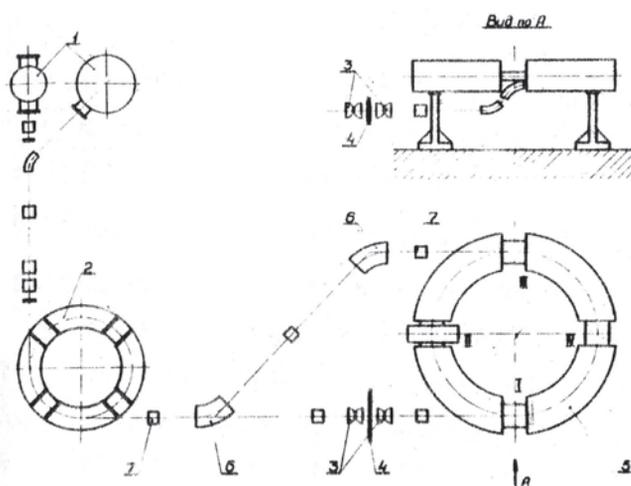
**Рис 6.** Синхротрон Б-3М, слева ИЛУ и канал ИЛУ – Б-3М

комплекса и сложнейшей по тем временам электроники управления и контроля. В последующие годы появлялись новые сотрудники, которые вносили свой вклад в развитие этого уникального ускорителя и поддержание его работоспособности. Это Геннадий Кузнецов, Валентин Давидовский, Анатолий Кожемякин, Вячеслав

Клюев, Петр Воробьев, Павел Климин, Александр Михайличенко, Александр Лысенко, Василий Просветов, сотрудники радиофизической лаборатории Эдуард Купер, Анатолий Медведко, Григорий Куркин и другие. И почти полвека отдал этому синхротрону механик Николай Чуприков.

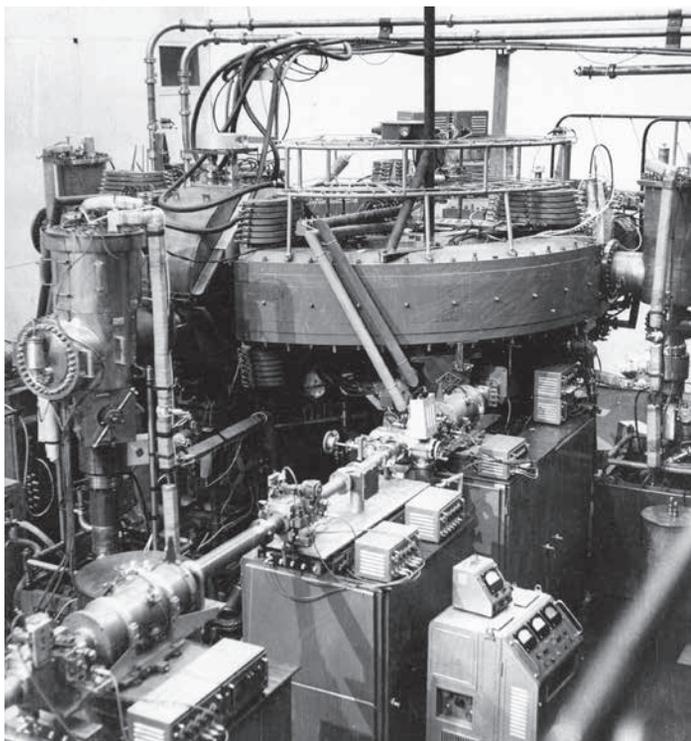
### 3. НАКОПИТЕЛЬНАЯ ДОРОЖКА

Схема расположения всего комплекса, включая синхротрон и электронно-оптические каналы, показана на рис. 7. Накопительная дорожка представляла собой слабофокусирующий рейстрек с четырьмя одинаковыми промежутками. Два промежутка использовались для инжекции электронов и позитронов, в третьем промежутке был расположен резонатор, и последний (противоположный резонаторному) был предназначен для постановки экспериментов [8-9].



**Рис. 7.** Схема комплекса ВЭПП-2 (до модернизации).  
 1 – ИЛУ (1-й и 2-й варианты),  
 2 – синхротрон Б-3М,  
 3 – параболические линзы,  
 4 – конвертор,  
 5 – коллайдер ВЭПП-2,  
 6 – горизонтальные поворотные магниты,  
 7 – квадрупольные линзы

**Рис. 8.** Вид на коллайдер ВЭПП-2 и позитронный канал вместе с конверсионной системой



О начале работ по созданию ВЭПП-2 вспоминает А. Лившиц – руководитель конструкторского отдела ИЯФ:

*– 1960 год мне запомнился многим. Весной я приехал в Сибирь. В этом году началась усиленная разработка ВЭПП-2. Ни одно здание ещё не было выстроено, поэтому конструкторская группа работала у меня на квартире. Группа состояла из меня, моей жены и молодых специалистов Н. Кузнецова и Г. Корнюхина. В моей квартире в двух маленьких комнатах жила моя*

*семья, а в большой комнате стояли 4 кульмана, на которых мы работали. Атмосфера в этом маленьком коллективе была чудесной, мы были молоды и полны энтузиазма... Летом мы переехали в огромный зал на 5-м этаже пристройки к цеху. Значительную часть этого зала занимал чертёж ВЭПП-2, вид сверху в натуральную величину, который мы вычертили мелом на полу. Чертёж страшно понравился Андрею Михайловичу. Он любил его показывать гостям и начальству...*

Работы по конструированию, производству и сооружению ВЭПП-2 были выполнены в короткие сроки, от начала конструирования до получения первого пучка прошло около четырех лет. При этом надо отметить, что по тем временам это была очень сложная в технологическом плане установка.

Основные параметры ВЭПП-2:

Максимальная энергия 670 МэВ

Число поворотных магнитов 4

Радиус кривизны 150 см

Длина прямолинейных промежутков 4×60 см

Фокусировка слабая  $n = 0,6$

Рабочая апертура (с учетом септум-магнитов, инфлекторных пластин, приемников излучения и радиальных пластин отсоса ионов):

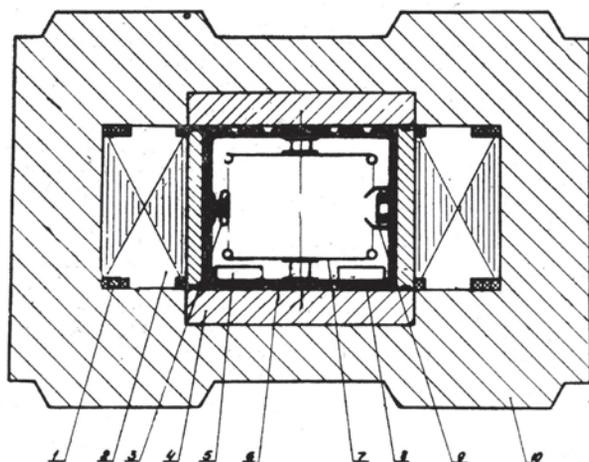
По вертикали  $\pm 38$  мм

По радиусу  $\pm 55$  мм

Рабочие токи ( $E=510$  МэВ) 40 мА×40 мА

Максимальная светимость  $3 \cdot 10^{28}$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>

Квадранты сконструированы в виде электромагнитов закрытого типа. Наклон поверхности полюсов к горизонтали составлял  $3^{\circ}35'$ , что обеспечивало  $n = 0,6$  в области вакуумной камеры. Магнитные измерения проводили А. Скринский, Б. Левичев, В. Ауслендер, Л. Каштанов, Ю. Пупков. Наиболее сложным оказалось нахождение медианной плоскости, для таких измерений использовались пермаллоевые датчики. Окончательная проверка была выполнена пучком альфа-частиц.



**Рис. 9.** Поперечный разрез квадранта ВЭПП-2 (после реконструкции).  
 1 – обратные витки Q-коррекции,  
 2 – обмотка основного поля,  
 3 – пластина разведения частот бетатронных колебаний,  
 4 – полюс,  
 5 – магниторазрядный насос,  
 6 – витки Q-коррекции,  
 7 – пластины вертикального разведения орбит (или инфлектор),  
 8 – внутренняя камера,  
 9 – приемник излучения,  
 10 – ярмо

На рис. 9 показано поперечное сечение магнита и вакуумной камеры после проведенной в 1968–1969 гг. модернизации [10]. Полюса являются крышками наружной вакуумной камеры, боковые стенки камеры выполнены из латуни. Между этими стенками и обратными ярмами (снаружи и внутри) магнитопровода располагались медные шины, по которым пропускался ток, создающий магнитное поле. Для охлаждения к шинам были припаяны медные трубки, через них протекал дистиллят. Шины располагались по высоте в 2 ряда, коммутация шин была сделана внутри промежутков. На первом этапе коммутация осуществлялась с помощью специальных дуг и болтовых соединений, а после модернизации в экспериментальном и резонаторном промежутках были смонтированы более компактные соединения, спаянные серебряным припоем. Вся эта часть с точки зрения современных конструкций магнитов и технологий их производства выглядела примитивной и была на самом деле ненадежной. И это доставляло немало хлопот физикам и обслуживающему персоналу. Установка питалась от мотор-генератора, установленного в энергокорпусе, максимальный ток при энергии 670 МэВ был около 7 нА. Вакуумная система в квадрантах конструктивно была выполнена в виде вложенных одна в другую двух камер: наружной, с не очень высоким вакуумом, и внутренней – высоковакуумной. В промежутках также была реализована система «двойного» вакуума. Наружная камера откачивалась диффузионными насосами с азотными ловушками. Уплотнения наружной вакуумной камеры резиновые. Её слабым местом были так называемые тройные стыки, особенно на участках перехода от квадранта

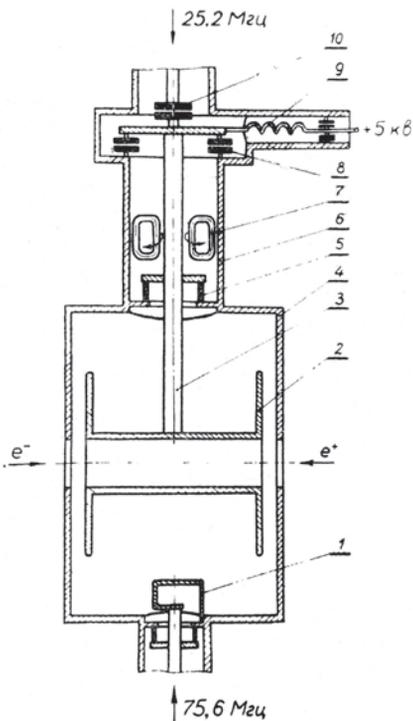
к промежутку, поэтому сборка камеры требовала определённого опыта или, лучше сказать, мастерства. Внутренняя высоковакуумная камера в квадрантах (после модернизации медная камера была заменена на нержавеющей) была теплоизолирована от наружной и допускала возможность прогрева до температуры 400 градусов. Узлы внутренней камеры в промежутках собирались с помощью уплотнений из отожжённой меди, зажимаемых между фланцами, технология аргоновой сварки ещё не была освоена. При этом допускалось небольшое перетекание между внутренней и наружной камерами. В процессе модернизации установки в 1968–1969 годах в квадрантах вблизи полюсов между внутренней и наружной камерами были установлены корректирующие витки, позволяющие регулировать градиент, квадратичную и кубичную нелинейности, а также положение медианной плоскости. До проведения модернизации такой возможности управления параметрами магнитной структуры не было, и это ограничивало экспериментальные возможности. Внутри камеры в двух квадрантах были расположены пластины электронного и позитронного инфлекторов, в двух других – пластины для электростатического разведения орбит электронов и позитронов. На внутреннем радиусе во всех квадрантах были размещены пластины, создающие неоднородное электрическое поле, для разведения бетатронных частот электронного и позитронного пучков и отсоса ионов. При модернизации в камерах под нижними пластинами инфлектора и системы электростатического разведения были установлены распределенные магниторазрядные насосы с общей скоростью откачки около 10 тыс. литров/сек при максимальном поле 1,5 Тл, а на внешнем радиусе был размещён приёмник синхротронного излучения. Приёмник представлял собой тонкую танталовую ленту, которую для обезгаживания можно было нагревать электрическим током. При большом токе пучка и высокой энергии сама лента прогревалась от синхротронного излучения до температуры несколько сотен градусов. Промежутки откачивались с помощью азотитов-охлажденных до температуры жидкого азота поверхностей, на которые напылялся титан, являющийся хорошим сорбентом. Всё это обеспечило получение высокого вакуума в условиях мощного синхротронного излучения. Хочется отметить, что это было первое использование магниторазрядных насосов, работающих в магнитном поле накопителя. Время жизни пучка на малых токах достигало десяти часов, при токе 100 мА – около четырех часов. Высокий вакуум создавался усилиями лаборатории Г. Блинова; здесь начинал свою карьеру В. Анашин, в разработке распределенной откачки большая заслуга В. Ауслендера и М. Малева.



**Рис. 10.** В.Л. Ауслендер – один из руководителей работы по запуску ВЭПП-2

Длина сгустка до модернизации была около 80 см, соответственно, длина области взаимодействия пучков – свыше 50 см при длине прямолинейного промежутка 63 см. Это существенно снижало эффективность регистрации продуктов реакции. С целью укорочения сгустка была проведена замена высокочастотной системы [11-12]. Был создан новый резонатор, работающий одновременно на первой и третьей гармониках частоты обращения. Конструкция резонатора приведена на рис. 11. Внутри корпуса резонатора 4 размещена трубка с дисками на концах. Она образует внутренний проводник коаксиальной линии с емкостями дисков. Собственная частота соответствующей резонансной моды равна третьей гармонике частоты обращения. Электрическое поле в зазорах направлено одинаково относительно движения частицы. Емкость параллельно соединённых дисков и индуктивность короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии, создаваемой штангой 3 и трубой 6, образуют моду с частотой, равной первой гармонике частоты обращения. Электрическое поле 1-й гармоники в зазорах направлено в разные стороны, эффективное ускоряющее напряжение, возникающее из-за изменения фазы пролёта, составляет 25% от напряжения на зазоре. Так как ускоряющая система на первой гармонике является пролётной трубкой с двумя зазорами, равновесные фазы электронов и позитронов на первой гармонике смещены на  $180^\circ$ , и это оказалось неожиданностью при попытке организовать встречу пучков на первой гармонике в резонаторе и, соответственно, в промежутке, противоположном резонаторному. Объяснение этому «парадоксу» было найдено А. Скринским. Поэтому на 1-й

гармонике проводилось только накопление позитронов с расстроенным вниз и выключенным резонатором третьей гармоники. По окончании накопления позитронов включалось напряжение возбуждения резонатора 3-й гармоники, затем резонатор настраивался при обеспечении фазировки 1-й и 3-й гармоник таким образом, чтобы все позитроны попали в одну область устойчивости. Инжекция электронов велась на 3-й гармонике с включенным вертикальным разведением орбит позитронов и электронов и их бетатронных ча-



**Рис. 11.** Схематический разрез резонатора ВЭПП-2.

- 1 – петля возбуждения 3-й гармоники,
- 2 – труба с дисками,
- 3 – штанга,
- 4 – корпус резонатора,
- 5 – керамический резонатор,
- 6 – наружная труба шунтирующей индуктивности,
- 7 – рамки настройки первой гармоники,
- 8, 10 – разделительные емкости,
- 9 – дроссель

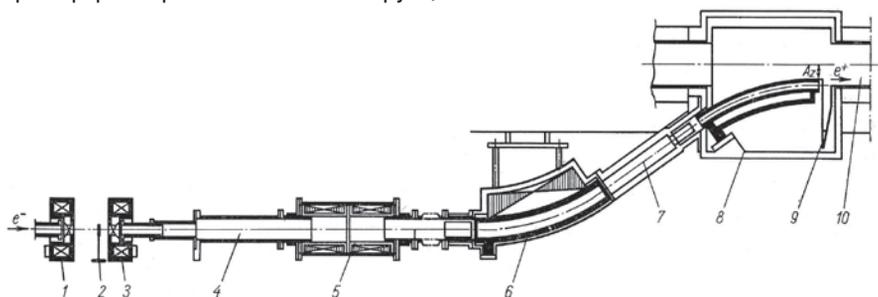
стот. Сепаратриса выбиралась таким образом, чтобы обеспечить встречу сгустков в экспериментальном промежутке и резонаторе. Амплитуда ВЧ-напряжения: 1-я гармоника 8 кВ (эф.), 3-я гармоника – 200 кВ. Длина сгустка с новой ВЧ-системой уменьшилась до 20 см.

При конструировании резонатора впервые учитывались требования к спектру высших собственных частот резонатора с целью обеспечения затухания когерентных синхротронных и бетатронных колебаний. В разработке этого оригинального резонатора участвовали М. Карлинер, И. Шехтман, И. Седляров, Виктор Петров, В. Вещеревич, конструктор В. Меджидзаде и др. Следует отметить, что на первом (до модернизации) резонаторе была обнаружена свойственная этому резонатору так называемая пондеромоторная неустойчивость. Механизм её возникновения связан с деформацией резонатора и, соответственно, изменением его резонансной частоты вследствие давления, вызываемого электромагнитным полем, на диски резонатора.

#### 4. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ. СИСТЕМЫ ВПУСКА-ВЫПУСКА. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ [13-17]

Расположение синхротрона и накопителя выбрано таким образом, чтобы минимизировать количество элементов каналов и облегчить требования к стабильности магнитных полей в элементах. Впуск электронов и позитронов производился в противоположных промежутках. Работами по созданию каналов руководил Г.И. Сильвестров.

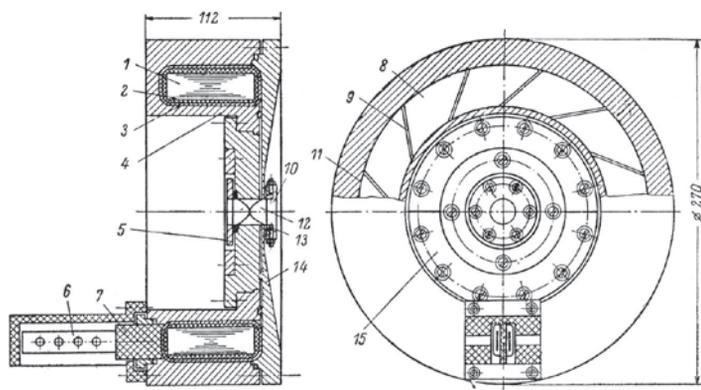
Наиболее сложными элементами каналов были септум-магниты и конверсионная система, являющиеся частью позитронного тракта. Конструкция септум-магнитов – безжелезная в форме коаксиала с уравновешенной по электромагнитным силам центральной шиной со скиновым формированием профиля поля (рис. 12). При энергии электронов 200 МэВ угол поворота составлял 35 градусов, ток – 200 кА, магнитное поле – 8.9 кГс. Питание магнитов осуществляется через импульсный понижающий трансформатор кабельной конструкции. Похожая кон-



**Рис. 12.** Схема размещения элементов позитронного тракта ВЭПП-2:  
1 – первая Ха-линза, 2 – конвертор, 3 – вторая Ха-линза,  
4 – вакуумпровод, 5 – квадрупольный дублет, 6 – нижний впускной магнит, 7 – равновесная траектория впуска, 8 – верхний (впускной) септум-магнит, 9 – медианная плоскость накопителя, 10 – высоковакуумная камера накопителя

струкция септум-магнитов использовалась и при создании последующих коллайдеров. В разработку септум-магнитов основной вклад внес В. Пакин, а их питания Б. Баянов.

Получение позитронов производится конверсией электронов через гамма-кванты на конверсионной мишени из вольфрама толщиной около 1 рад. единицы (0,3 см). Для эффективного собирания позитронов с конвертора использовалась предложенная А.М. Будкером короткофокусная параболическая линза (Ха-линза) [16]. Линза представляет собой два параболоида вращения, соприкасающиеся своими вершинами. Конструкция выполнена из единого блока бериллия, толщина стенок параболоида – 0,2 мм. Ток свыше 100 кА и длительностью около 1 мксек подводится к линзе от расположенного концентрично с линзой понижающего трансформатора с малой индуктивностью рассеяния и создаёт осесимметричное фокусирующее магнитное поле, интеграл которого вдоль траектории растёт линейно с отклонением от оси линзы.



**Рис. 13.** Параболическая линза с трансформатором.

- 1 – сердечник,
- 2, 8 – первичная обмотка,
- 3, 9, 11 – изоляция,
- 4 – вторичный виток,
- 5, 15 – прижимные фланцы,
- 6, 7 – ввод первичной обмотки,
- 10, 13 – цанговые контакты,
- 14 – торцевой фланец,
- 12 – параболическая линза

Разработка этого сложного и прецизионного изделия (рис. 13) была выполнена Г. Сильвестровым, Л. Даниловым, С. Родионовым и конструктором К. Шрайнером [16]. Расчеты конверсионной системы выполнялись Т. Всеволодской [17] при поддержке теоретика В. Сынаха. В системе впуска в ВЭПП-2 не было предудара по накопленному пучку, поэтому в режиме накопления использовалась только часть акцептанса. Это существенно уменьшало захват позитронного пучка.



**Рис. 14.**  
А.В. Киселев

Важной частью комплекса были системы впуска-выпуска, включающие в себя высоковольтные наносекундные генераторы, дефлектор и два инфлектора, обеспечивающие впуск позитронов и электронов. Чтобы получить многократное накопление, высоковольтные импульсы не должны были иметь «хвостов» и обеспечивать надёжную синхронизацию со временем прихода сгустка. Эта задача была успешно решена А.В. Киселевым [4].

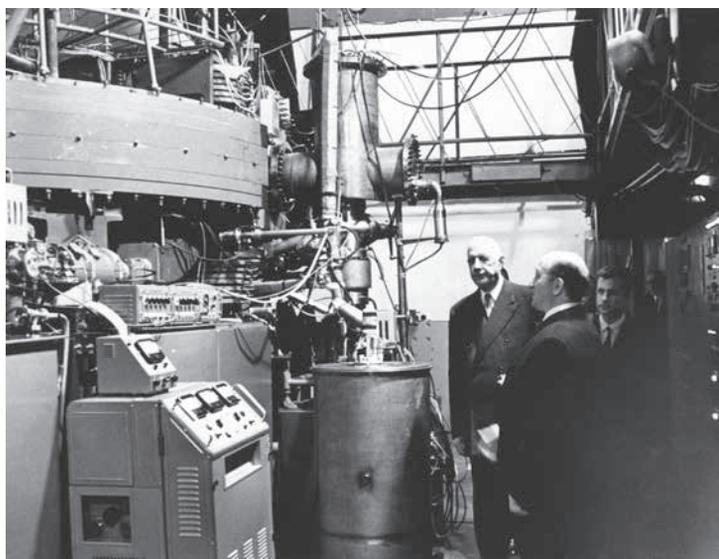
## 5. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая инжекция электронного пучка в ВЭПП-2 была осуществлена в июне 1964 года, первые позитроны в накопителе были получены в мае 1965 года [18,19].

Эксперименты с двумя пучками начались в июле 1966 года на энергии  $2 \times 380$  МэВ. Позитронный ток был около 5 мА, электронный – десятки миллиампер. В 1966 году система искровых оптических камер зарегистрировала первые  $\pi$ -мезоны. Это было начало физики на встречных электрон-позитронных пучках. На ВЭПП-2 стали часто появляться журналисты и кинооператоры, тема экспериментов с антивеществом стала очень популярной. Приведём небольшой фрагмент:

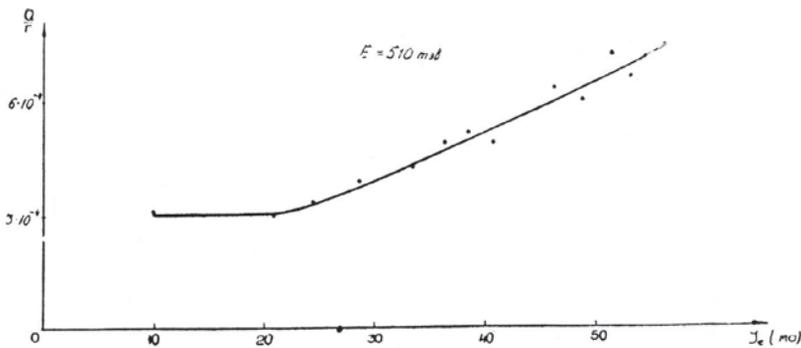
*«...Удалось накопить интенсивный пучок позитронов. Это значит, что исследователи заставили искусственно родиться и организовать гостей из антимира, очень редко залетающих на нашу планету с космическими лучами. Ученые накопили их огромное количество и заставили короткоживущие в земных условиях позитроны жить часы и сутки, необходимые для эксперимента. ...Зловещая опасность над исходом эксперимента нависла, едва начали сводить два пучка электронов и позитронов. Пучок электронов, имея более сильное магнитное поле, угнетал гостей из антимира. Сначала он только уродовал пучок позитронов, у того, как говорили сибиряки, «отрастали уши», а при более сильном токе вовсе уничтожал его. Надо было понять это явление, провести длинный цикл экспериментальных и теоретических работ и, наконец, восстановить справедливость. И сибиряки нашли эти методы, образно говоря, доказали, что с помощью разума можно наладить сосуществование и с представителями антимира».* Луч из антимира. Ванда Белецкая, «Огонёк» № 16, 1966, стр. 16.

Посещали ИЯФ и именитые гости. И, конечно, экскурсия на ВЭПП-2 была важной частью программы.



**Рис. 15.** Президент Франции Шарль де Голль в зале ВЭПП-2. Справа – Г.И. Будкер

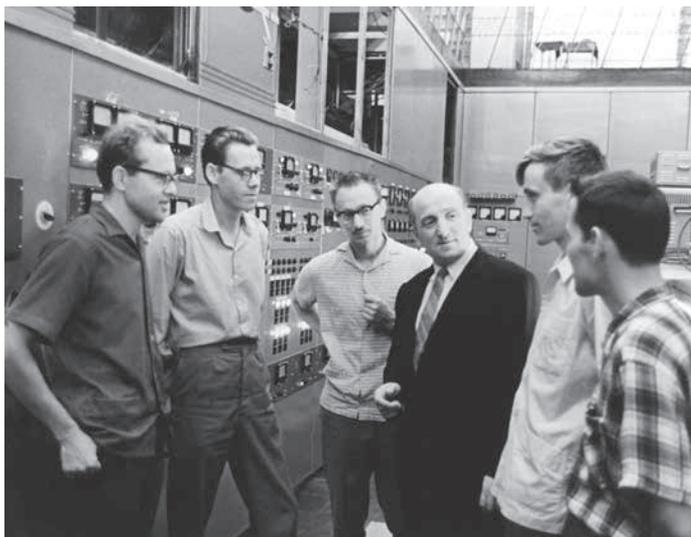
Постепенно усилиями большого коллектива улучшались параметры установки: увеличивался ток инжектора, в связи с установкой параболических линз возрос коэффициент конверсии. В режиме накопления позитронов время жизни пучка определялось, в основном, эффектом внутреннего рассеяния (ЭВР), и это должно было сильно ограничивать максимальный накопленный ток. Однако в промежутках времени между ударами импульсом инфлектора пучок не успевал затухать до равновесного размера. В итоге начальная скорость накопления позитронов 1 мА/мин не сильно падала, а накопленный ток позитронов поднялся до 40 мА. На таких токах велись эксперименты в последние годы работы комплекса при максимальной светимости  $3 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Режим работы был следующий. Вначале велось накопление позитронов на энергии 120 МэВ при энергии конвертируемого электронного пучка 250 МэВ. Время накопления составляло не более часа. Затем позитроны ускорялись до энергии 200 МэВ, включалась 3-я гармоника ВЧ напряжения и электростатическое разведение орбит электронов и позитронов. В течение примерно минуты накапливался нужный ток электронов, далее ускорение до энергии эксперимента и сведение пучков. Максимальная энергия пучков составляла  $2 \times 670$  МэВ. На первом этапе оперативное измерение светимости велось по рассеянию на малые углы посредством счетчиков, расположенных в промежутках впуска. В процессе модернизации были созданы условия для регистрации однократного и двойного тормозного излучения. С этой целью на пути гамма-квантов тормозного излучения из прямолинейного промежутка были сделаны окна в ярах и шинах и уменьшена толщина стенки вакуумной камеры. Использование квантов однократного и двойного тормозного излучения позволило точнее измерять светимость и поставить первые эксперименты по двухфотонной физике.



**Рис. 16.** Отношение кулон-амперов (Q) к числу событий (Г) тормозного излучения от тока. График отражает увеличение размера пучков при увеличении тока

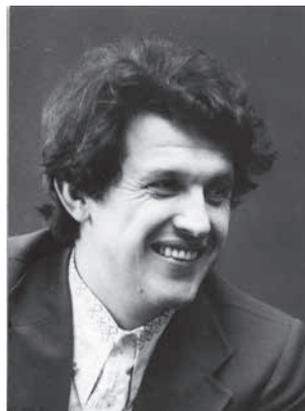
На рис. 16 представлены результаты по эффективности встречи в зависимости от тока электронов (сильный-слабый пучки). По вертикальной оси отложено отношение интеграла произведения токов электронов и позитронов (кулон-амперы) к количеству гамма-квантов двойного тормозного излучения. График отражает увеличение вертикального размера позитронного пучка.

**Рис. 17.** А.М. Будкер с учениками в пультовой ВЭПП-2.  
Слева направо: В.А. Сидоров, И.Я. Протопопов, С.Г. Попов, А.М. Будкер, А.Н. Скринский, В.В. Петров



На установке ВЭПП-2 были впервые зафиксированы и изучены многие коллективные эффекты. В изучение когерентных явлений помимо руководителей работы А. Скринского и В. Ауслендера большой вклад внесли Н. Диканский, М.М. Карлинер, И.А. Шехтман, Виктор Петров, И. Седляров, Г. Куркин [20-22]. О том, как были объяснены механизмы возникновения этих неустойчивостей и найдены способы их подавления, рассказывает Николай Диканский:

*– Первый в мире электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2 начал работать с двумя пучками в 1965 году. Эта установка была интересна во всех отношениях не только тем, что на ней начались первые в мире эксперименты по столкновению электронов и позитронов, но и целым фейерверком различных эффектов в динамике частиц. Возможность наблюдения за поведением пучков с помощью телевизионных камер позволила увидеть форму пучков и их долговременное поведение. Кроме этого, можно было наблюдать быстрые процессы с помощью электронно-оптических преобразователей и фотоэлектронными умножителями. Значительный пласт информации мы получали с помощью пикап-электродов.*



*В 1965 году мне было поручено изучение вопросов когерентной устойчивости пучков в накопителе. А.Н. Скринский предложил мне заняться эффектом конечной проводимости стенок вакуумной камеры. В это время уже была работа А. Сесслера и Дж. Ласлета для несгруппированного пучка. Нам же нужно было понять, а что будет для сгруппированного пучка. А. Скринский рассуждал в терминах остаточного поля, моей задачей было получить это поле в конкретной прямоугольной трубе. Каково было моё удивление, когда я просуммировал гармоники поля, связанные с конечной проводимостью стенок,*

и увидел, что остаточное поле после пролёта сгустка медленно убывает со временем как  $\frac{z(t-\tau)}{\sqrt{t}}$ .

Я показал этот результат А. Скринскому и М. Карлинеру, который стоял с ним рядом. Марлен Моисеевич сказал – это диффузия поля из стенок. Конечно, поле, которое проникло в стенки, медленно выходит обратно и помнит координату смещения при пролете. Суммируются поля за много оборотов и в результате, если

$k - \frac{1}{2} < v_z < k$  – неустойчивость,  $k < v_z < k + \frac{1}{2}$  – демпфирование.

Весной 1965 года в ИЯФ приехала группа американских ускорительщиков из Стэнфорда, Беркли и Брукхейвена. Э. Курант доложил результаты своих расчетов, они точно совпали с нашими.

Мы обнаружили, что начиная с токов более 1 мА скорость затухания вертикальных колебаний становится значительно больше, чем обычное радиационное затухание. Визуально (на телеэкране) уже невозможно было видеть процесс уменьшения вертикального размера. Было обнаружено, что декремент когерентного затухания пропорционален числу частиц в сгустке.

Независимость декремента от бетатронной частоты проверялась в широком диапазоне перестройки частоты  $\Delta v_z = \pm 0,1$ , за исключением области разностного машинного резонанса связи и на когерентном вертикальном резонансе. Исчезновение когерентного затухания на резонансе связи обусловлено тем, что дипольный момент сгустка на этом резонансе равен нулю. Появление же вертикальной когерентной неустойчивости (вне области резонанса связи) означало превышение инкремента вертикальной неустойчивости над декрементом вертикального быстрого затухания.

Как выяснилось впоследствии, явление быстрого когерентного затухания связано с излучением энергии сгустка частиц в ТЕМ-волну пластин инфлектора.

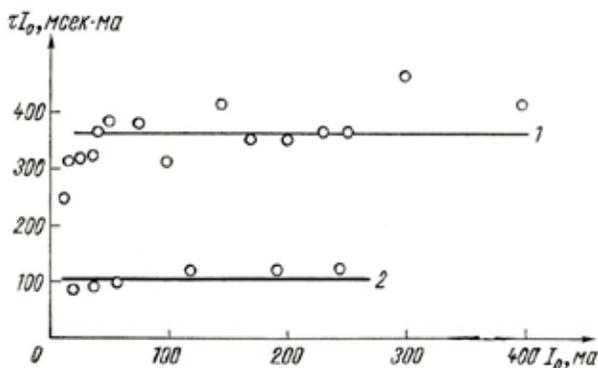
Появление вертикальной когерентной резонансной неустойчивости было связано с пластинами вертикального разведения электронов и позитронов. Эти пластины были соединены с высоковольтными источниками через большое сопротивление длинными кабелями. Оказалось, что собственная частота этой системы (пластина, в.ч. кабель) была близка:

$$\omega_z + \omega_{п.к.} = \omega_0,$$

что соответствует суммовому когерентному резонансу.

После нагрузки этих кабелей на волновое сопротивление скорость быстрого затухания возросла в три раза (рис. 18).

**РАДИАЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ.** Возникновение этой неустойчивости препятствовало накоплению больших позитронных токов в выбранной рабочей точке по  $v_r$ . Неустойчивость появлялась в узкой полосе бетатронных частот  $\Delta v_r = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$  при токах свыше 2 мА. Обычно возбуждение неустойчивости происходило после воз-



**Рис. 18.** Зависимость произведения времени быстрого затухания на ток пучка в зависимости от тока. Пластины разведения пучков не согласованы (1), нагружены на волновое сопротивление (2)

буждения вертикальных колебаний. Пучок, не успев затухнуть по вертикали до установленного размера, быстро увеличивал радиальный размер до  $a_r \approx 1,5$  см. Инкремент неустойчивости линейно зависел от числа частиц.

Основная часть частиц совершала когерентные колебания в течение нескольких минут, картина этого явления напоминала Сатурн с его кольцом.

Подавление неустойчивости было достигнуто введением системы радиальной обратной связи.

**ПРОДОЛЬНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ.** Естественно, первая неустойчивость, которую увидели, была робинсоновская – связанная с неправильной настройкой резонатора по отношению к частоте обращения частиц. В релятивистском случае когерентные фазовые колебания неустойчивы, если частота обращения частиц (частота ВЧ-генератора) выше резонансной частоты ускоряющего резонатора. Физический смысл неустойчивости прост. Если когерентные потери уменьшаются с увеличением энергии сгустка от равновесной, то это приводит к раскачке когерентных колебаний.

При правильной настройке резонатора тем не менее появлялась продольная неустойчивость. Объяснил это явление М.М. Карлинер возбуждением 18 паразитной моды основного резонатора. Поэтому после модернизации в новом резонаторе все паразитные моды были перестроены в нужном направлении. Поскольку паразитных мод великое множество, то в машинах следующих поколений были разработаны так называемые одномодовые резонаторы. Однако, в то время, используя весь арсенал метода подавления неустойчивостей, нам удалось получить рекордные токи накопленных пучков. Так, например, на энергии инжекции электронов 200 МэВ нам удалось накопить  $10^{12}$  электронов в одном сгустке. Это соответствовало 4 А циркулирующего тока.

Как это удалось: если есть резонансные неустойчивости, то должны быть режимы, когда резонансная система поглощает энергию когерентного движения, т.е. демпфирует когерентное возбуждение. После модернизации в резонаторе можно было работать на

1-й и 3-й гармониках частоты обращения, при этом резонатор 3-й гармоники имел высокое шунтовое сопротивление 1 МОм и добротность 12000. Используя идею резонансного демпфирования, надо было создать разностный когерентный резонанс:  $\omega_3 + \omega_c = 3\omega_0$

Здесь  $\omega_3$  – частота резонатора гармоники,  $\omega_c$  – частота фазовых колебаний.

Знак «+» перед частотой фазовых колебаний соответствует разностному резонансу, т.к. синхротронная масса отрицательная! Значит, энергия дипольных фазовых колебаний поглощается в резонаторе гармоники. Время когерентного затухания при токах порядка ампера достигало сотен микросекунд.

К сожалению, ограничения по эффектам встречи не позволили использовать большие накопленные токи.

Как и на ВЭП-1, на ВЭПП-2 была выполнена большая программа экспериментов по изучению эффектов встречи и нелинейных резонансов. Были исследованы критерии разведения орбит электронов и позитронов и частот их бетатронных колебаний, необходимые для получения больших токов. В частности, наблюдалось и исследовано когерентное

возбуждение одного пучка при накоплении другого. В изучении когерентных и некогерентных эффектов встречи ведущая роль принадлежит С.И. Мишневу [23].



**Рис.20.** С.И. Мишнев

Ещё на этапе запуска, будучи студентами, в работу на ВЭПП-2 включились И. Вассерман, Ю. Пупков, Ю. Шатунов. В дальнейшем при ведущем участии Ю. Шатунова на ВЭПП-2 были поставлены первые эксперименты по обнаружению радиационной поляризации, явления, предсказанного советскими физиками А. Соколовым и И. Терновым.

Вспоминает Ю.М. Шатунов:

– Хорошо известно, что история радиационной поляризации началась в 1963 году с работы теоретиков МГУ (А. Соколов, И. Тернов и др.), которые, решая уравнение Дирака в однородном магнитном поле, обнаружили эффект самополяризации электрона. Когда на ВЭПП-2 «запахло» пучком, разговоры на эту тему достигли и пультовой комплекса, где мы проводили ежедневно большую часть суток. По-видимому, я больше других проявлял интерес к этой новости, так что в июле 1966 года при поступлении в аспирантуру мне была записана тема: «Радиационная поляризация электронов и позитронов» (руко-

водитель А.Н. Скринский). Реальность на комплексе в то время была крайне далека от столь высоких материй.

С расстояния в почти 50 лет трудно вспомнить, кто сказал «а», а кто – «б», но шаг за шагом стала вырисовываться схема эксперимента. К этому времени В. Байер и В. Хозе (по просьбе А.Н. Скринского) уже написали статью на тему поляриметрии на электронных накопителях. И, естественно, мы выбрали самый дешевый способ измерения поляризации [24] по внутрисгустковому рассеянию электронов (Тушек-эффект). Но оказалось, что на ВЭПП-2 это можно сделать вообще бесплатно. На кольце имелись два сцинтилляционных счетчика, расположенные в противоположных промежутках, для измерения светимости по  $e^+e^-$  рассеянию на малые углы. Г. Тумайкин, который в ходе модернизации сменил В. Ауслендера на посту начальника комплекса, нашел вариант использования этих счетчиков для измерения поляризации. Рассеиваясь друг на друге, электроны обменивались энергией и выходили из пучка. При этом один из электронов регистрировался одним счетчиком вскоре после рассеяния, в то время как второй достигал другого счетчика через 1,5 оборота.

Перерыв на модернизацию позволил вставить в вакуумную камеру ВЭПП-2 первый в мире деполяризатор. По оценке, из-за большой неопределенности энергии ВЭПП-2 требовался генератор мощностью около 1 кВт с быстрой перестройкой частоты и шумовой модуляцией. В ИЯФ такого не нашлось и мы с Е.П. Мельниковым поехали на глушилку (на Горской), где он раньше работал. Там у нас ничего не получилось, но мы увидели новенький «ВЯЗ». И вскоре удалось получить такой генератор в ИЯФ прямо с завода в Красноярске. Блок управления этим генератором был разработан М. Егорычевым.

Из-за напряженной программы работы с детекторами пучковое время для радиационной поляризации появилось нескоро. «Первым делом, все знают, самолеты», ну а красивая девушка поляризация – потом. Конечно, нам удавалось иногда увидеть в счетчиках Тушек-эффект, но не более того. Кстати, этими счетчиками в лаб. 3 «заведовал» С. Середняков. Таким образом, он автоматически присоединился к измерению поляризации.

Реальные измерения удалось начать только осенью 1970 года. Надо сказать, что оценка спиновой диффузии на деполяризующих резонансах показывала, что наилучшие условия для поляризации должны быть в районе 640 – 650 МэВ. Время поляризации на ВЭПП-2 для этой энергии было около часа и ожидаемая степень поляризации 50 – 60%. Время жизни пучка было явно недостаточно (2-3 часа). Нормированная на квадрат тока пучка скорость счета Тушек-эффекта изменялась во много раз больше, чем от ожидаемого вклада поляризации. Сказывалось изменение размеров пучка из-за накопления ионов и сдвига частот от них и от пространственного заряда. Но со временем ситуация улучшалась, так что стало возможным провести измерения. Делалось это следующим образом: электронный ток

100 мА выдерживался при заданной энергии 2 часа, после чего начинался набор статистики в несколько циклов по 200 секунд. Затем включался деполяризатор в некотором интервале частот; снова набиралась статистика и опять включалось ВЧ-поле уже в следующем диапазоне. Всего в каждом цикле делалось пять шагов по частоте с заполнением шумовой модуляцией.

Скачок скорости счета составлял 1,1%, что соответствовало степени поляризации  $0,52 \pm 0,13$ . В контрольных заходах без включения ВЧ деполяризатора и с включением заведомо в другом месте по энергии скачков не наблюдалось. Аналогичные измерения были сделаны еще в 4 точках по энергии. Частота деполяризации при этом изменялась линейно с энергией. Однако при этом сканировании обнаружилось 3 или 4 точки, которые явно выпадали из линейной зависимости частоты деполяризации. К сожалению, на этой печальной ноте оборвалась песня ВЭПП-2.

При попытке поднять энергию обмотка одного из магнитов с ослабленным охлаждением основательно приварилась на «землю». Так как в этот момент разворачивались работы по созданию ВЭПП-2М, было решено начать вторую модернизацию комплекса. Шел тогда ноябрь 1970 года. Судьба полученных данных по поляризации на ВЭПП-2 была следующей. В декабре был подготовлен черновик препринта, который попал на глаза теоретикам, и они объявили научной общественности об открытии радиационной поляризации. Сначала В. Хозе на Зимней школе ЛИЯФ, затем В. Байер в УФН. Но нашей публикации так и не появилось. Упомянутые 3-4 точки, которые впоследствии были объяснены деполяризацией мощным ВЧ полем на боковых резонансах, вызывали тогда сомнение.

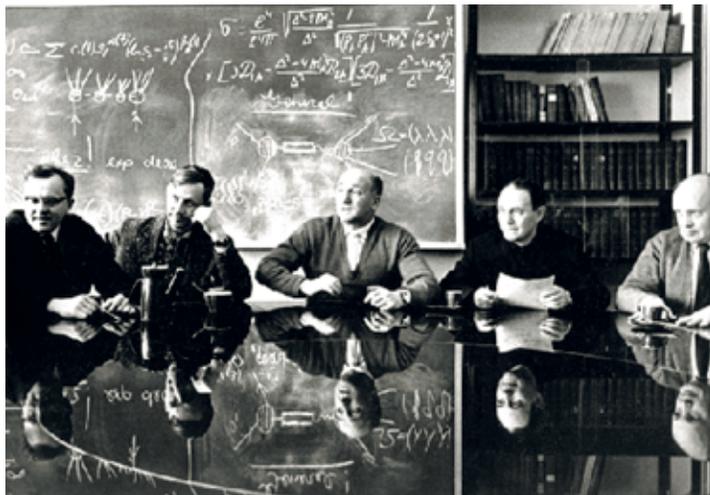
Подробное описание этого пионерского эксперимента изложено в главе «Поляризованные пучки в ИЯФ», написанной Ю.М. Шатуновым.

Эксперименты на ВЭПП-2 продолжались до ноября 1970 года. В связи с решением о создании нового коллайдера ВЭПП-2М кольцо ВЭПП-2 было переоборудовано в бустер. Электронный канал был ликвидирован, была организована переполосовка поля и элементов бывшего позитронного канала. До июня 1987 года бустер обеспечивал электронами и позитронами экспериментальную программу ВЭПП-2М.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ВЭПП-2 были поставлены первые в мире физические эксперименты по физике элементарных частиц на встречных электрон-позитронных пучках. Первым таким экспериментом было наблюдение р-мезонного резонанса. Была открыта новая эпоха в физике элементарных частиц. За разработку метода встречных пучков (создание установок ВЭП-1 и ВЭПП-2) группе сотрудников ИЯФ во главе с Г.И. Будкером в 1967 году была присуждена Ленинская премия.

**Рис. 21.** Лауреаты  
Ленинской премии  
(слева направо):  
В.А. Сидоров,  
А.Н. Скринский,  
Г.И. Будкер,  
А.А. Наумов,  
В.С. Панасюк



## ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Байер. Сорок лет действующим электрон-позитронным коллайдерам. Препринт ИЯФ 2006-50. Новосибирск, 2006.

2. Г.И. Яснов. Высоковольтные инжекторы сильноточных импульсных синхротронов. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Новосибирск, 1973 г.

3. В.В. Петров. Сильноточный синхротрон Б-3М – инжектор для позитрон-электронного накопителя ВЭПП-2. Диссертация на соиск. уч. степени к. ф.-м. н. Новосибирск, 1969 г.

4. А.В. Киселев. Однооборотный выпуск из синхротрона Б-3М ИЯФ СО РАН СССР и инжекция в накопитель ВЭПП-2. Дисс. на соиск. уч. степени к. ф.-м. н. Новосибирск, 1965.

5. В.Ф. Туркин. Ускорительный комплекс электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М. Диссертация на соискание ученой степени к. ф.-м.н.. Новосибирск, 1990 г.

6. Л.И. Юдин. Радиотехнические устройства для однооборотной инжекции электронов в сильноточный синхротрон. Дисс. на соиск. ученой степени к. т. н. Новосибирск, 1964 г.

7. В.С. Панасюк. Радиотехнические устройства безжелезных ускорителей и установок встречных пучков Института ядерной физики. Сильноточный синхротрон со специальной конструкцией электромагнита и внешней инжекцией электронов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 1964 г.

8. В.Л. Ауслендер, В.Н. Байер, Г.А. Блинов, Г.И. Будкер, А.В. Киселев, Е.А. Кушниренко, А.А. Лившиц, Е.С. Миронов, А.А. Наумов, В.С. Панасюк, С.Н. Родионов, В.А. Сидоров, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, В.С. Сынах, Л.И. Юдин. Встречные позитрон-электронные пучки (Работы по встречным электрон-электронным, позитрон-электронным, протон-протонным пучкам в Институте ядерной физики СО АН СССР). Труды Междунар. конф. по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с. 274.

9. В.Л. Ауслендер, Г.А. Блинов, Г.И. Будкер, М.М. Карлинер, А.В. Киселев, А.А. Лившиц, С.И. Мишнев, А.А. Наумов, В.С. Панасюк, Ю.Н. Пестов, В.А. Сидоров, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев,

И.А. Шехтман. Состояние работ на позитрон-электронном накопителе ВЭПП-2. Атомная энергия, 1965, 19, № 6, с. 497.

10. В.Л. Ауслендер, Г.И. Будкер, И.Б. Вассерман, Н.С. Диканский, М.М. Карлинер, М.Д. Малев, С.И. Мишнев, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин, А.Г. Хабахпашев, Ю.М. Шатунов, И.А. Шехтман. Реконструкция установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. Труды VII Междунар. конф. по ускор. частиц высоких энергий, Ереван: Изд. АН АрмССР, 1970, т. 2, с. 26.

11. И.К. Седляров. Разработка и исследование ускоряющих резонаторов электрон-позитронных накопителей ВЭПП-2 и ВЭПП-3. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1978 г.

12. В.М. Петров. Высоочастотная система установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1971 г.

13. Т.А. Всеволожская, В.Н. Пакин, Г.И. Сильвестров. Впускные магниты электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2. Атомная энергия, 22, 1967, стр. 210.

14. В.Н. Пакин. Исследование и создание импульсных систем для впуска и выпуска на комплексах со встречными пучками ВЭП-1, ВЭПП-2 и ВЭПП-3. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Новосибирск, 1976 г.

15. Г.И. Сильвестров. Электронно-оптические каналы установок со встречными пучками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф.-м. наук. Новосибирск, 1969 г.

16. Л.Л. Данилов, С.Н. Родионов, Г.И. Сильвестров. Параболическая линза для аксиально-симметричной фокусировки релятивистских частиц. ЖТФ, 1967, т. XXXVII, в. 5, стр. 914.

17. Т.А. Всеволожская. Методы получения вторичных частиц для инжекции в накопители. Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф.-м. наук. Новосибирск, 1976 г.

18. В.Л. Ауслендер, Т.А. Всеволожская, Л.Л. Данилов, С.И. Мишнев, А.А. Наумов, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский. Инжекция и накопление позитронов. Атомная энергия, 1967, 22, в. 3, с. 206.

19. В.Л. Ауслендер. Накопление электронов и позитронов на установке ВЭПП-2М. Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф.-м. наук. Новосибирск, 1965 г.

20. Н.С. Диканский. Исследование когерентной устойчивости пучков в накопителях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Новосибирск, 1969 г.

21. Н.С. Диканский, А.Н. Скринский. Поперечная когерентная неустойчивость сгустка заряженных частиц. Атомная энергия, 21, 1966, стр. 176.

22. Н.С. Диканский, М.М. Карлинер, А.Н. Скринский, В.Е. Шапиро, И.А. Шехтман. Взаимодействие когерентных бетатронных колебаний с внешними системами. Атомная энергия, 22, 1967, стр. 188.

23. С.И. Мишнев. Исследование взаимодействия встречных пучков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Новосибирск, 1975 г.

24. В.Н. Байер, В.А. Хозе. Эффекты рассеяния частиц внутри пучков поляризованных электронов в накопителях. Атомная энергия, 1968, т. 25, № 5, с. 440.

## ГЛАВА 3

И.А. Кооп, Г.М. Тумайкин

## КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2М

## ВВЕДЕНИЕ

1970 год. На ВЭПП-2 проведена модернизация и ведутся эксперименты с модернизированным детектором, на котором впервые установлены проволочные искровые камеры и водяные черенковские счетчики. На сооружаемой в 13-м здании установке ВЭПП-3 с планируемой энергией 2х3,5 ГэВ получен захват электронного пучка. Проведенные к этому времени эксперименты по наблюдению ро- и фи-мезонов (ВЭПП-2 и АСО) вызвали большой интерес физиков к области энергий ВЭПП-2 и ВЭПП-3, хотя пару лет назад область энергий ВЭПП-3 по мнению теоретиков не вызывала интереса. До открытия пси-мезонов оставалось ещё 4 года. Незадолго до этого появилась идея существенного увеличения светимости с использованием малой  $\beta$ -функции [1]. Реализация этой идеи открывала новые горизонты для физики на встречных пучках. А.Н. Скринский в начале 1970 года нацелил своего ученика И. Коопа на изучение способов получения малой  $\beta$ -функции. В течение года идут дискуссии (в основном между В. Балакиным и А. Скринским), в какой области энергий быстрее могут быть получены значимые результаты. Усиление интереса к области энергий 2х700 МэВ и выше произошло после наблюдения на модернизированном детекторе на ВЭПП-2 и итальянской установке Adone многоадронных событий, не предсказываемых существующими в то время теориями. Летом этого года во время отдыха в Болгарии А.Н. Скринский и Л.М. Барков активно обсуждали сложившуюся ситуацию и пришли к заключению, что наряду с развёртыванием работ по запуску ВЭПП-3 надо срочно строить коллайдер с высокой светимостью на области энергий ВЭПП-2. И уже осенью при поддержке А.М. Будкера было принято решение о сооружении установки ВЭПП-2М, создаваемой на базе комплекса ВЭПП-2.

Из воспоминаний Э.М. Трахтенберга, ведущего конструктора ВЭПП-2М (ныне сотрудника Аргонской Лаборатории, США):

*– Для выполнения работы в первую очередь было создано конструкторское бюро. Сложилась команда более опытных: Н.И. Зубков, А.Ф. Пономарева, П.И. Батурин, А.В. Евстигнеев, Труда Вечеславова, Володя Хорев, Г. Черных и совсем молодых конструкторов: Леня Щеголев и мои любимицы, Люба черненькая и Галя беленькая (Л.Г. Исаева и Г.И. Эрг).*

*Андрей Михайлович Будкер проявлял постоянный и очень активный интерес к ВЭПП-2М, особенно на проектной стадии. Первые пару месяцев, когда выбирались основные проектные решения, часам к десяти утра он вызывал «на ковер» к себе в кабинет*



Тумайкина, Мишнева и меня. Часто в этих обсуждениях участвовал А.Н. Скринский, который в это время вместе со своим учеником И. Коопом тратил много времени на разработку оптической структуры, иногда начальник конструкторского отдела А.А. Лившиц. Пару раз, когда Андрей Михайлович чувствовал себя не очень хорошо, он просил нас приехать к нему в коттедж, предоставляя нам свой знаменитый курчатовский ЗИМ. Мы не ждали, пока весь проект будет готов, первыми были разработаны основные компоненты магнитной системы, и сразу началась подготовка к их производству.

Александр Абрамович Нежевенко (гл. инженер ИЯФ) очень плотно следил за изготовлением ВЭПП-2М. Раз в неделю у него в кабинете была планерка с привлечением всех участников проекта. Обычно я докладывал, что сделано за неделю и какие возникли проблемы, надо было постоянно быть готовым к критике, особенно если были претензии со стороны Экспериментального производства.

Чтобы поместить накопитель на энергию 700 МэВ в очень тесное пространство на месте установки ВЭП-1, пришлось закладывать поворотные магниты с радиусом 1,2 метра и полем на орбите пучка почти 1,8 Тесла. Я не встречал ни одного зарубежного накопителя, где бы были магниты с таким большим полем. В кольце было восемь поворотных магнитов и 8 промежутков: четыре так называемых длинных и четыре технических, коротких. Чтобы разгрузить промежутки от коммутационных шин катушек магнитов, было предложено сделать вывод обмотки магнитов через середину обратного ярма, это тоже было новым решением.

Поскольку в поворотных магнитах было очень высокое поле, для их изготовления нужна была высококачественная малоуглеродистая сталь, точнее, железо АРМКО. Мы с Н.А. Кузнецовым несколько раз съездили на Магнитогорский металлургический комбинат и уговорили главного инженера и главного прокатчика выпустить для нас временный ГОСТ на прокатку такого железа толщиной 160 мм, вместо стандартного 30 мм. Потом мы ездили в Главчермет утверждать этот ГОСТ. Прокатка была на стане номер 2, знаменитом броневом стане, на котором в войну катали плиты для танка Т-34. Это был многоклетевой стан, от печи, где слитки разогревали, до конца конвейера метров 600.

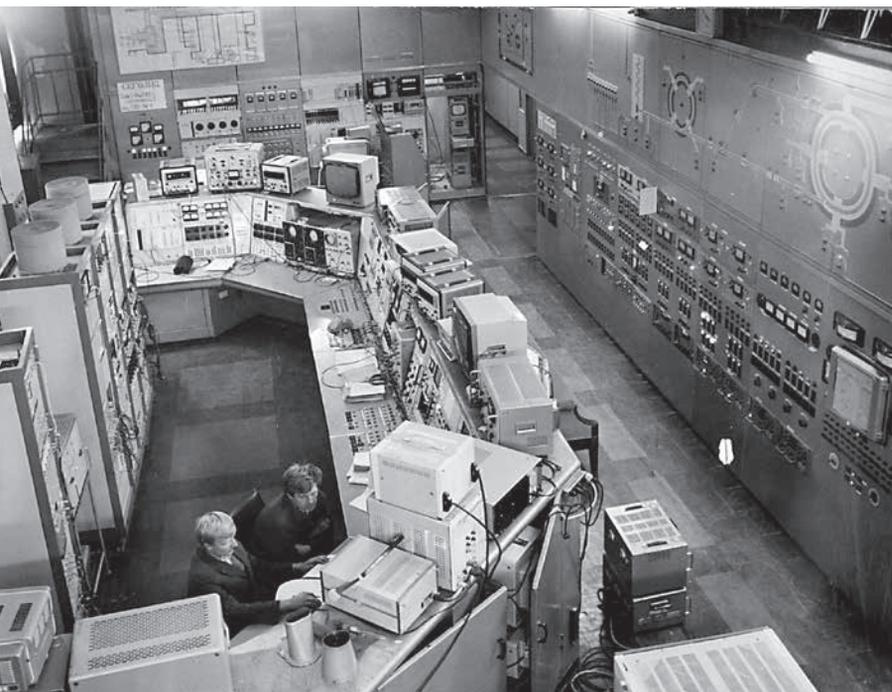
Полюса квадрупольных линз должны иметь очень точный параболический профиль. Ваня Кооп предложил сделать совсем специальный профиль, заложив туда коррекцию нелинейностей. Как точно обработать такой профиль, было непонятно, станков с программным управлением еще не существовало. Мы предложили создать специальные фасонно-профильные резцы и обработать ими полюса линз на продольно-строгальном станке, точность которого мы довели до максимума. Режущую кромку резцов доводил под микроскопом по моим координатам прекрасный слесарь-инструментальщик Сергей Лагутин с точностью в несколько микрон вручную. Чтобы точно установить квадрупольные линзы, очень жесткий нержавеющей

кронштейн, на котором они стояли, был окончательно обработан вместе с медианной плоскостью поворотного магнита, а посадочная часть линзы тоже была сделана заодно с ее верхней половиной. В горизонтальной плоскости линзу фиксировали точные штифты, установленные с помощью шаблона. Таким образом, правильная установка линз достигалась автоматически без всякой выставки и дополнительных деталей.

Хочу сказать несколько слов про конструкцию квадрупольных линз. Они располагались в длинных промежутках, и для того чтобы увеличить телесный угол детекторов, их надо было сделать как можно компактней. Мы выбрали максимально возможную плотность тока (40 Ампер на квадратный миллиметр сечения медной шины), а также сделали все стыки обмотки паяными. Это позволило сильно уменьшить размеры обмотки за границами ярма. Обмотка состояла из двух половин, в каждой из которых одновременно паялось (в вакуумной печи) 34 стыка. Это было техническое решение без права на ошибку, так как стыки были одновременно и токовые, и вакуумные, и вряд ли сейчас я решился бы на такой риск, но чего не сделаешь по молодости. Неоценимую помощь в пайке этих обмоток оказал инженер-сварщик Экспериментального производства Дмитрий Евгеньевич Куклин, и мы сумели в короткий срок сделать 32 таких пайки без брака.

Когда началась сборка накопителя, неоценимый вклад внес главный механик лаборатории М.А. Тимошенков, один из самых лучших механиков, с кем мне пришлось работать (и в Москве, и в Новосибирске, и в Чикаго). У него был 8-й разряд, который в ИЯФе присваивался Ученым Советом. Он мог работать на всех станках, был также хорошим сварщиком, предельно аккуратен и ответственен. Впервые (теперь я могу сказать в мире) вакуумная камера накопителя с вакуумом лучше 10 наноторр была сделана полностью сварная. Тут мы убили сразу трех зайцев: сэкономили место в периметре машины, потому что сварные фланцы были тонкие, сэкономили деньги, так как соединения в производстве были гораздо дешевле т.н. русского конфлэта, и смогли немного увеличить телесный угол детекторов в экспериментальных промежутках.

Все указанные выше факторы: осознанная коллективом физиков важность поставленной задачи, каждодневная поддержка работы руководством института, удачно выбранные физический проект и технические решения, достаточная квалификация коллектива, умноженная на энтузиазм, способствовали рекордно быстрому сооружению и запуску установки. Потребовалось примерно полтора года от начала проектирования до получения циркулирующего электронного пучка, полученного 15 июля 1972 года [2]. Назовем основных участников работы. Это физики: А.Н. Скринский, постоянно контролирующий ситуацию, И.Б. Вассерман, И.А. Кооп, В. Кутовой, С.И. Мишнев, Г.М. Тумайкин (руководитель лаборатории), Ю.М. Шатунов, В.Ф. Туркин, А.П. Лысенко, А.Н. Кирпотин (программист), М.Н. Захваткин (электроника) и др.



**Рис. 1.**  
Пультовая.  
Работу ведут  
И.А. Кооп  
и Ю.М. Шатунов

И, естественно, реализация проекта была бы невозможна без плодотворного сотрудничества с лабораторией М.М. Карлинера. Системы питания магнитных элементов создавались усилиями А.С. Медведко, В.Н. Боровикова, Б.А. Баклакова, С.П. Петрова, переход на цифровую электронику и управление от ЭВМ проводила команда В.И. Нифонтова и Э.А. Купера, А.М. Батракова. Здесь был впервые опробован созданный А.В. Леденевым прецизионный цифровой вольтметр, высокочастотную систему создавали В.М. Петров, Г.И. Куркин, А.А. Полунин, Е.В. Козырев (временный резонатор), И.К. Седляров, М.Н. Егорычев, И.В. Купцов. Вакуумную систему курировал М.Д. Малев, электропроект выполняла группа А.И. Морозова. ВЭПП-2М создавался не на голом месте, здесь имела готовая инфраструктура комплекса ВЭПП-2 и высококвалифицированный коллектив инженеров, лаборантов и механиков. Это: Е.П. Мельников, Е.Н. Харитонов, В.Н. Ерохов, вскоре после запуска ушедшие на ВЭПП-4, П.А. Климин, Г.Д. Кочурин, Н.Н. Коршунова, П.П. Антонова (Липатова), А.А. Митько, М.И. Непомнящих, В. Селезнёв, Н.И. Чуприков, В.Н. Епанчинцев, В.И. Матросов и др. ВЭПП-2М проработал на эксперимент свыше 25 лет, за это время появились новые физики и инженеры: П.В. Воробьев, Е.А. Переведенцев, А.Б. Валишев, П.М. Иванов, А.А. Михайличенко, А.А. Полунин, В.П. Просветов и др., вложившие немало усилий в его функционирование, развитие и постановку экспериментов как ускорительных, так и с детекторами. В течение многих лет на ВЭПП-2М, имевшем в своем диапазоне энергий самую высокую светимость, был выполнен огромный, признанный в мире цикл экспериментов по физике элементарных частиц и с поляризованными пучками.



**Рис. 2.** В новой пультовой комплекса ВЭПП-2М.  
За «круглым столом» сидят слева направо: П.М. Иванов,  
Ю.М. Шатунов, П.А. Климин, А.А. Валишев, П.В. Воробьев,  
И.Н. Нестеренко, В.П. Просветов, А.П. Лысенко, В.Н. Осипов

## **1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ. [3,4,5].**

### **1.1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ВЭПП-2М.**

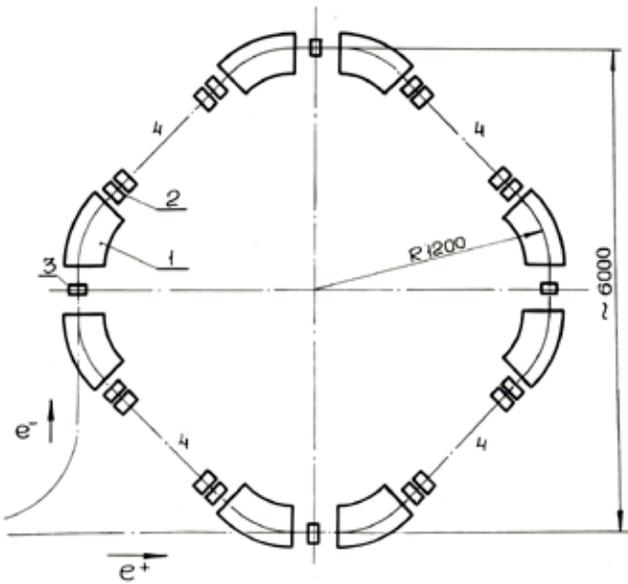
#### **1.1.1. Оптическая структура**

К моменту разработки накопительного кольца ускорительной об- щественностью уже были осмыслены основные идеи, которые нужно за- ложить в создание установки для получения высокой светимости. К это- му времени также имелся большой опыт, полученный в ИЯФ на ВЭП-1, ВЭПП-2 и на первых зарубежных установках (ACO, Adone, Stanford rings). При выборе оптической структуры накопительного кольца нужно было удовлетворить ряду условий, таких как: получение малой  $\beta$ -функции в месте встречи, обеспечение набега фаз бетатронных колебаний на эле- менте периодичности в середине области устойчивости, выбор набега фазы между местами встречи чуть выше величины кратной  $\pi$ , получение большого радиального фазового объёма пучков и коротких сгустков с размерами меньше  $\beta$ -функции, создание возможности управления вер- тикальным размером и др. Ещё одно важное условие для нашего случая – минимальные размеры кольца, чтобы его можно было разместить на месте установки ВЭП-1.

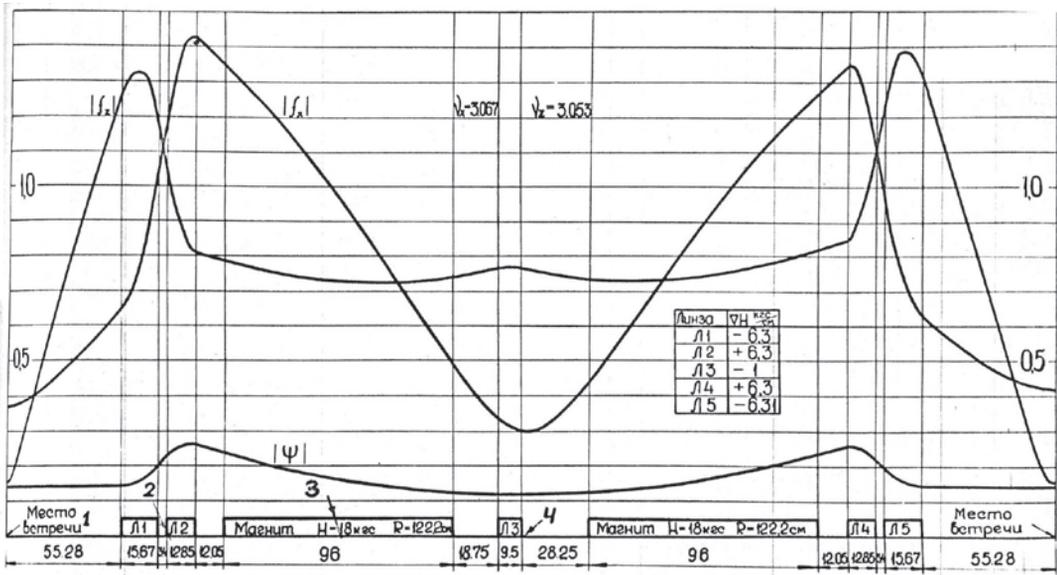
Был найден простейший вариант, состоящий из четырех зеркаль- но-симметричных элементов периодичности с использованием квадра- польных линз и поворотных магнитов с однородным полем. Это был исходный вариант, состоящий только из симметрично расположенных относительно места встречи дублетов квадрупольных, далее симме-

трично расположенных поворотных магнитов, за которыми идут технические промежутки. Для того, чтобы иметь лишнюю степень свободы в подстройке бетатронных частот и структуры, в эти промежутки были установлены дополнительные линзы. Эти линзы пришлось сместить относительно центра технического промежутка, чтобы увеличить участок вдоль орбиты для размещения септум-магнитов. Это несколько исказило

структуру от четырех элементов периодичности к двум. Выбранная схема размещения магнитных элементов и структура элемента периодичности приведены на рис. 3 и рис. 4.



**Рис. 3.** Схема размещения элементов накопителя. 1 – поворотные магниты, 2 – дублеты квадрупольных линз, 3 – технические линзы, 4 – длинные промежутки



**Рис. 4.** Структура элемента периодичности (четверти коллайдера)

### Основные параметры магнитной системы накопителя ВЭПП-2М

Максимальная энергия	670 МэВ
Средний радиус кольца	284,57 см
Количество поворотных магнитов	8
Радиус кривизны в поворотных магнитах	122 см
Максимальная величина поля	1,825 Тл
Полюсный зазор магнита	3 см
Градиент магнитного поля в основных линзах	0,64 Тл/см
Количество и длина основных линз	8(12,85 см)+8(15,67 см)
Градиент магнитного поля в дополнительных линзах	0,1 Тл/см
Количество и длина дополнительных линз	4 (9,5 см)
Длина прямолинейного промежутка	110,56 см
Длина короткого промежутка	45 см
Частоты бетатронных колебаний вертикаль., горизонт	3,06; 3,08
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	0,167
Характеристика структуры в месте встречи:	
Вертикальная $\beta$ -функция	6,5 см*
Горизонтальная $\beta$ -функция	45 см*
Эмиттанс $\epsilon_x/\epsilon_z$	$2 \cdot 10^{-5} / 2 \cdot 10^{-7}$ см-рад

\* фактически имеется небольшое отличие  $\beta$ -функций и  $\Psi$ -функций в начале и конце элемента периодичности из-за смещения линз в коротких промежутках. Эта асимметрия в области взаимодействия легко устранялась включением коррекций в квадрупольных линзах.

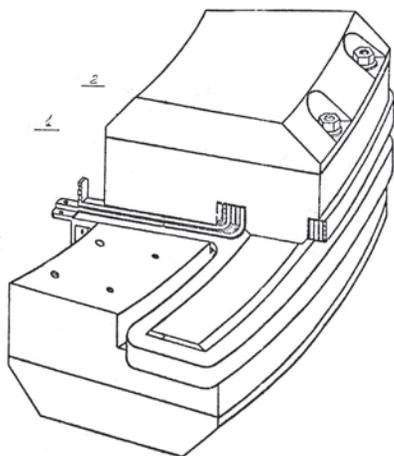
Из четырех длинных промежутков с малой  $\beta$ -функцией три промежутка использовались для детекторов, один, расположенный между участками впускных каналов, для резонатора. В промежутке, противоположном резонаторному, был установлен первый детектор ОЛЯ. После окончания экспериментов с этим детектором в 1979 г. промежуток использовался для проведения ускорительных экспериментов, в частности для установки спиральных ондуляторов. В 4 коротких промежутках были установлены септум-магниты и пластины инфлекторов.

В исходном режиме зависимости бетатронных частот от импульса были:  $\Delta\nu_z = -9,6\Delta p/p$ ,  $\Delta\nu_x = -7,7\Delta p/p$ . Для компенсации хроматизма в структуру кольца вблизи дублета квадрупольных линз были установлены секступольные линзы. Рядом с секступольными линзами были размещены октупольные линзы. На полюсах последних имелись дополнительные обмотки, с помощью которых можно было создавать skew-квадрупольное поле.

#### 1.1.2. ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Апертура вакуумной камеры и, соответственно, магнитных элементов определялась из соображений удовлетворительного времени жизни циркулирующих пучков и фоновых условий при проведении экспериментов. Ограничение периметра кольца размерами зала ВЭПП-1 требовало разработки сильнополевых и компактных магнитных эле-

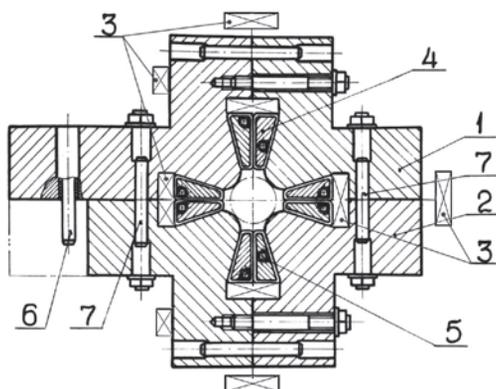
ментов. Для уменьшения потерь периметра из-за коммутации токоподвода к катушкам поворотных магнитов были выведены через проём в ярме (рис. 5).



**Рис. 5.** Поворотный магнит (одна четверть удалена)

Для вывода пучков синхротронного излучения и гамма-квантов тормозного излучения от встречных пучков магнитопровод выполнен С-образным.

Поворотные магниты и линзы изготовлены из низкоуглеродистой стали Армко, что дало возможность получить магнитное поле до 18 кГс и градиент 6,4 кГс/см при апертуре в линзах с диаметром вписанного круга 34 мм. Полюса линз обрабатывались специальным профильным резцом на строгальном станке. По результатам магнитных измерений, проведенных на модели, была проведена коррекция профиля. Магнитопровод линзы состоял из 4 частей, его прецизионная сборка и установка на кронштейн обеспечивалась с помощью штифтов (рис. 6). Число витков на полюсе линзы равно двум, на ярме магнита расположены две обмотки по 3 витка. Магниты и линзы были запитаны последовательно от одного сильноточного источника с током 8 кА. У магнитов на основных катушках были намотаны витки для коррекции поля, у линз имелись катушки коррекции градиента и катушки, создающие радиальное поле для коррекции вертикальной орбиты. К сожалению, это поле не является однородным, но такое решение было принято из недостатка места для размещения обычных корректоров. Катушки установлены на ярме (не на полюсах), что требует равного числа витков во избежание замагничивания магнитопровода.



**Рис. 6.** Квадрупольная линза (разрез).

- 1, 2 – верхняя и нижняя части ярма,
- 3 – корректирующие катушки,
- 4 – основные витки,
- 5 – трубки охлаждения,
- 6 – посадочный штифт,
- 7 – сборочные штифты

Квадрупольные линзы (фокусирующая и дефокусирующая), а также секступольные и октупольные устанавливались с использованием посадочных штифтов на жестком нержавеющей кронштейне, прикрепленном к торцу магнита. Посадочная поверхность кронштейна обрабатывалась одновременно с медианной плоскостью половины магнита. Посадочные отверстия на кронштейне сверлились по кондукторной плите, устанавливаемой также по штифтам, привязанным к посадочным отверстиям в медианной плоскости магнита. По специальному шаблону также устанавливались 2 геодезических знака, располагаемые на конце кронштейна и другом торце магнита. В итоге магнит и линзы представляли единый блок со своими геодезическими знаками, обеспечивающими выставку всего кольца. Полученная точность выставки основных квадрупольных линз была порядка 0,06 мм.

### 1.1.3. СИСТЕМА ПИТАНИЯ. СТАБИЛИЗАЦИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ

Впервые в ИЯФ мощная система питания накопителя была построена на основе трехфазного выпрямителя. Для подавления пульсации использовалась система обратной связи со специальным трансформатором, вторичная обмотка которого была включена последовательно, и батарея электролитических конденсаторов. Для питания корректирующих обмоток использовался один цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), управляющий через коммутатор слаботочными (10 А) источниками.

Стабильность энергии частиц в накопителе определяется в основном тремя факторами: стабильностью величины магнитного поля, стабильностью положения магнитных элементов, стабильностью частоты ускоряющего напряжения. Современная электроника обеспечивает высокую точность частоты, поэтому определяющую роль в уходах энергии играли первые два фактора. В процессе работы для улучшения стабильности магнитного поля была создана система, основанная на измерении поля и управлении им с помощью ЯМР таким образом, что необходимое поле задается частотой синтезатора нутационного ядерного магнетометра. Для учета второго фактора был разработан измеритель радиальных уходов положения магнитных элементов  $\Delta R_i$ . Естественно предположить, что изменение энергии  $\Delta E/E$  определяется как

$$\Delta E/E = k/n \sum_{i=1}^n \Delta R_i/R_i,$$

где  $R_i$  – радиусы геометрической установки  $n$  магнитов и линз,  $k$  – коэффициент, определяемый конструкцией магнитной системы накопителя, примерно обратно пропорциональный коэффициенту пространственного расширения орбит.

Используя прецизионное измерение энергии методом резонансной деполяризации при стабилизации магнитного поля и одновременном измерении смещений в течение некоторого времени удалось получить величину коэффициента  $k$ , которая оказалась равной  $7,5 \pm 0,6$ . Введя этот коэффициент в программу, можно было компенсировать уходы



энергии, связанные с изменением положения магнитных элементов, соответствующей перестройкой величины магнитного поля. Полученная стабильность энергии была на уровне  $10^{-5}$ , что обеспечивало проведение прецизионных экспериментов [6].

**Рис. 7.** М.А. Тимошенко и И.Б. Вассерман производят юстировку магнитных элементов.

## 1.2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

Для получения высокой светимости необходимо иметь сгустки с длиной меньшей размера  $\beta$ -функции в месте встречи, т.е. порядка 5 см, для чего необходимо использовать высокую кратность ускоряющего напряжения. Исходя из наличия стандартного генератора «ЛЕН» была выбрана рабочая частота 201 МГц, что соответствовало кратности, равной 12. Соотношение периметров бустера ВЭПП-2 и нового кольца была выбрано 2:3, что упрощало систему синхронизации их высокочастотных систем. Инжекция могла проводиться в любую из 12 сепаратрис, точность синхронизации  $\sim 0,5$  нсек, что составляло 1/10 длины сепаратрисы. Работа со встречными пучками велась в режиме по одному сгустку электронов и позитронов. Основными разработчиками электроники были Г.Я. Куркин и В.М. Петров.

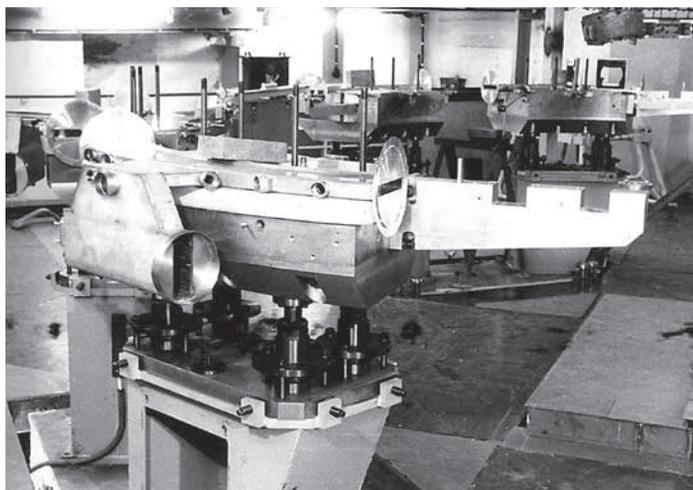
При мощности генератора 7,5 кВт на резонаторе можно было иметь ускоряющее напряжение до 300 кВ, что обеспечивало работу на предельной энергии. На этапе запуска были использованы временные резонатор и генератор, что позволило быстро проверить работу магнитной системы на низкой энергии.



**Рис. 8.** Разработчики резонаторов И.К. Седляков и Е.В. Козырев около резонатора после его демонтажа

### 1.3. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Для обеспечения времени жизни пучков в несколько часов и нормальных фоновых условий при проведении эксперимента нужно было иметь средний вакуум порядка  $10^{-9}$ , а в экспериментальных промежутках  $10^{-10}$  торр в условиях мощного синхротронного излучения. Для получения такого вакуума была создана система откачки, основанная на использовании сосредоточенных и распределенных магниторазрядных насосов. Распределенные магниторазрядные насосы двухэлектродной конструкции располагались в магнитном поле на внутреннем радиусе вакуумной камеры, сосредоточенные были приварены к наружной части камеры. Эти насосы имели трехэлектродную конструкцию, что обеспечивало большую скорость откачки аргона. Для уменьшения гажения от синхротронного излучения в камере были установлены штыревые приемники излучения, обеспечивающие нормальное падение излучения. Это существенно уменьшало величину рассеянного излучения. Приемники охлаждались водой, а их поверхность была позолочена. В линзовых участках приемники излучения были выполнены в виде сплюснутой трубки, охлаждаемой водой. В экспериментальные промежутки были установлены геттерные насосы, основанные на распылении титана. Все сборные элементы вакуумной камеры соединены между собой сваркой с помощью тонких фланцев с тонкими кольцевыми проточками. Это позволяло производить разборку каждого стыка с последующей заваркой 5-6 раз. Общий вид вакуумной камеры магнита показан на рис. 9. После сборки на месте можно было проводить прогрев распределенного насоса и камеры посредством пропускания тока через анод, имеющий два вывода, расположенных на разных концах вакуумной камеры магнита. Между стенкой камеры и полюсом имелись теплоизолирующие прокладки, что давало возможность вести прогрев без разборки магнитов. В разработке и наладке вакуумной системы важная роль принадлежит М. Малеву и В. Осипову.



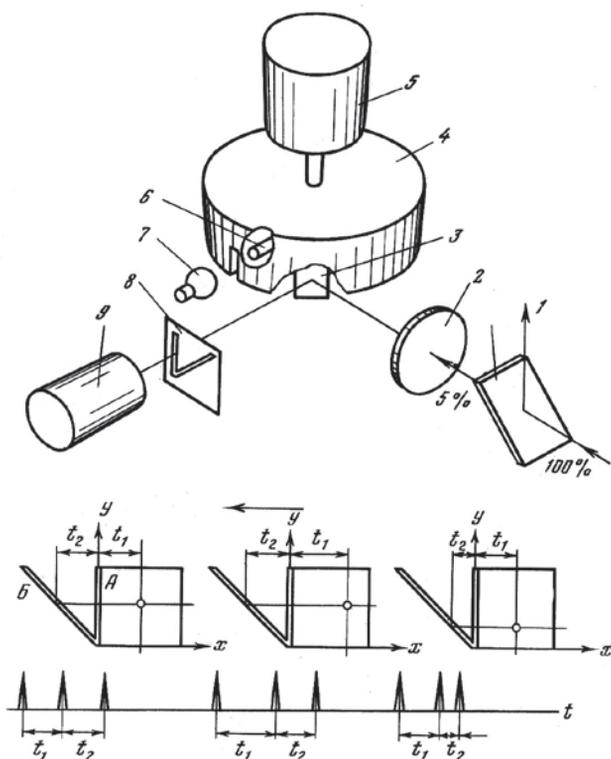
**Рис. 9.** Участок вакуумной камеры поворотного магнита вместе с его нижней частью и кронштейном для установки линз. Видны отверстия для приемников излучения и вывода синхротронного излучения

## 1.4. ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ

Ограничение периметра установки и требование ее компактности не позволяли использовать пикап-электроды. Основным методом измерения параметров пучка и положения равновесной орбиты был оптический метод, основанный на использовании синхротронного излучения [7]. К этому времени имелся большой опыт такой диагностики, полученный на установках ВЭП-1 и ВЭПП-2. В вакуумных камерах 8 магнитов было 16 окон для вывода синхротронного излучения, по 8 для электронов и позитронов. Два окна использовались для экспериментов с синхротронным излучением в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, остальные 14 окон были предназначены для систем диагностики.

В основу устройства для измерения координат пучка положен принцип механической развертки оптического изображения пучка соответствующего определенному сечению вакуумной камеры, и регистрация светового излучения пучка, проходящего через стробирующую щель, фотоэлектронным умножителем (рис. 10). Для измерения координат была предложена схема на основе двух стробирующих щелей, расположенных под углом  $45^\circ$ , которая решает эту задачу с помощью одного развертывающего зеркала и одного приемника излучения (ФЭУ). Ниже показан характер изменения положения сигналов в зависимости от положения пучка в сечении камеры накопителя. Положение сигналов от первой и второй щелей относительно первого (опорного) импульса однозначно связано с горизонтальной и вертикальной координатами пучка. После обработки сигналов временные интервалы, соответствующие координатам, преобразуются в числа и поступают в ЭВМ.

После обработки сигналов временные интервалы, соответствующие координатам, преобразуются в числа и поступают в ЭВМ.



**Рис. 10.** Устройство для измерения координат пучка.

1 – полупрозрачное зеркало, на которое падает СИ от пучка, 2 – объектив, 3 – вращающееся зеркало, 4 – маховик со щелевой диафрагмой датчика опорного импульса, 5 – двигатель, 6 – фотодиод пучка опорного импульса, 7 – осветитель датчика опорного импульса, 8 – пластина со стробирующими щелями, 9 – ФЭУ,  $t_1$  и  $t_2$  – расстояния между импульсами при разных положениях пучка



Измерение тока проводилось по интенсивности синхротронного излучения. На первом этапе для калибровки величины тока использовалось наблюдение отдельных электронов, в последующем был установлен магнитомодуляционный измеритель постоянного тока.

**Рис. 11.** Э.И. Зинин. Разработчик систем диагностики с использованием СИ

Поперечные размеры пучков измерялись по синхротронному излучению с помощью диссектора с электромагнитным отклонением, на фотокатод которого фокусировалось изображение пучка, продольные размеры и распределение по сепаратрисам определялись диссектором ЛИ-602 с электростатическим управлением, на пластины которого подавалось ВЧ напряжение с частотой обращения.

Разводка пучков синхротронного излучения по разным приборам проводилась посредством полупрозрачных зеркал и фокусирующих линз. Для визуального наблюдения за пучками были установлены телевизионные камеры.

## 1.5. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА [8,9]

О длинном пути автоматизации вспоминает А.Н. Кирпотин:

– С самого начала предполагалось, что установка ВЭПП-2М будет управляться через компьютер. Токи магнитных элементов задавались прецизионными 16-канальными ЦАПами, с точностью  $5 \cdot 10^{-5}$ . Этим ЦАПам требовалось непрерывно (50 гц) читать данные из специального блока памяти. Поначалу операторы вручную заносили туда нужные коды. В сентябре 1973 года на ВЭПП-2М началось управление от компьютера. В первый год использовалась недавно купленная «Одра-1304» (это была английская «ICL-1900», выпускавшаяся Польшей по лицензии). «Одру» вывели на орбиту И.Я. Протопопов и Б.В. Левичев. Помнятся рукописные переводы, сделанные Борисом Васильевичем с английского и польского. Кстати, Левичев в студенчестве по обмену учился в Праге; яхтсмен; одиннадцатый



прыжков с аэростата (не из самолета); шумный, язвительный, добрый и заботливый...

Игорь Яковлевич написал для ВЭПП-2М демонстрационную программу, вскоре появилась и рабочая. «Одра» по одному из своих каналов крутила коды в памяти ЦАПов; по двум другим каналам оператор общался с управляющей программой в «Одре» через телетайп RFT. Передавать коды из ЭВМ в ЦАПы – всего лишь техническая задача; а чтобы делать управляющую программу, нужно сначала иметь какую-то концепцию, сценарий работы, список команд... Была принята следующая концепция:

- Есть «режимы» и «массивы».

- ВЭПП-2М может находиться в одном из 4 режимов: накопление электронов, перепуск электронов, накопление позитронов, перепуск позитронов (и еще режим «выпуск»). Режимы пронумерованы (1-4), и есть «местоимение» – «режим 0» – текущее состояние.

- Массивы задают возможные состояния независимых частей комплекса (кольцо ВЭПП-2М, ВЭПП-2, ИЛУ-БЗМ), массивы имеют имена.

- Каждый «режим» задается комбинацией «массивов». Траектории переходов (например, подъем энергии перед перепуском) тоже могут быть заданы цепочкой массивов.

- Ну и собственно команды – это «перейти в нужный режим», например, «1» или «2»...

Надо сказать, что эта концепция благополучно пережила все реинкарнации системы управления ВЭПП-2М. Конечно, был обеспечен сервис для редактирования массивов и таблиц переходов, их архивирование (сначала на перфоленте и файлах «Одры», потом [как теперь модно говорить] «в облаке» системы «Радиус» Шувалова). Еще, например, на «Одре» работала простенькая программа перестройки оптики: по бетатронным частотам и бета-функциям за 20 секунд рассчитывался нужный массив.

Осенью 1974 года произошла первая реинкарнация – перешли на другую ЭВМ. В чем-то это был шаг назад. «Одра-1304» по своей архитектуре намного опережала другие ЭВМ. В частности, ее операционная система позволяла одновременно работать нескольким программам. И «Одра», находившаяся в 13-м здании, управляла сразу тремя установками: ВЭПП-3, НАП и ВЭПП-2М. Все же полной одновременности не получалось, и управляться втроем через один компьютер было некомфортно. Было решено переселиться на отдельную ЭВМ. Прямо в пультовой ВЭПП-2М (а не в 13-м здании как «Одра») появилась ЭВМ «М-6000» (НПО «Импульс», Северодонецк), клон «HP 2116» фирмы Hewlett-Packard.

Вместо RFT появились хороший перфоратор, быстрый фотосчитыватель и венгерский алфавитно-цифровой дисплей «Видеотон-340». Никакой операционной системы, просто коллекция драйверов; кросс-компиляция программ на ассемблере на технической М-6000 в ВЦ.

К этому времени В. Гусев сделал специальный канал для чтения из фиксированной области ОЗУ «М-6000» в память ЦАПов – и теперь для программиста отправление кодов в ЦАП выглядело просто как запись

в массив памяти. В этой инкарнации появились средства измерения: медленная «Липа» и быстрые АЦП Батракова и Каргальцева. Такие устройства должны обслуживаться асинхронно, в режиме прерывания, чему очень не способствовала устаревшая архитектура машины. Но все это не помешало решить основные задачи. Работала, например, программа «Автоматика», которая по данным измерений управляла режимом комплекса (накопление, перепуск, и т.д.) – оператор задавал нужные параметры и действия на простом языке, похожем на Forth.

Переход на М-6000 прошел быстро, далее был постепенный прогресс. В 1976 г. Шувалов запустил систему «Радиус» – локальную сеть М-6000. У ВЭПП-2М появился удобный архив для программ и данных; перфоленты остались в прошлом.

К этому времени в ИЯФ были разработаны средства визуализации – известные ЦДР [цветные растровые дисплеи], прослужившие до распространения IBM PC.

Быстро увеличивалась номенклатура измерительных устройств. Аппаратура создавалась в 6-й лаборатории и группе М.Н. Захваткина. Последний курировал всю аппаратуру в пультовой комплекса.

Далее стали распространяться мини-ЭВМ Электроника-60, Электроника-100 (клоны PDP-11) – на ВЭПП-2М они появлялись локально, в изолированных подсистемах комплекса.

В 1984 году был начат переход на новые компьютеры – «Одрята». Они были разработаны в ИЯФ, представляли собой интеллектуальные крейт-контроллеры САМАС с системой команд «Одры»; к этому времени уже успешно использовались на ВЭПП-4. Работу по переходу на новую систему управления выполнял А.П. Лысенко. К моменту, когда БЭП заменил накопитель ВЭПП-2 (1989 г.), 8 «Одрят» обеспечивали все функции управления и измерений.



**Рис. 12.** Практически все программы управления ВЭПП-2М «Одрятами» были написаны А.П. Лысенко

## 2. БУСТЕРНЫЙ РЕЖИМ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-2. СИСТЕМЫ ВПУСКА-ВЫПУСКА. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

Коллайдер ВЭПП-2М был создан на базе закончившего работу комплекса ВЭПП-2, включавшего в себя синхротрон БЗ-М (энергия 250 МэВ) с инжектором ИЛУ (энергия 3 МэВ), электронный и позитронный каналы от синхротрона до слабофокусирующего старого коллайдера ВЭПП-2 (рис. 14). В новой схеме ВЭПП-2 стал бустерным накопительным коль-

цом, в котором поочередно накапливались позитронные и электронные пучки. В процессе модернизации был оставлен только прямой канал с конверсионной системой, обеспечивающей получение позитронного пучка с энергией 120 Мэв. К началу работы ВЭПП-2М в системе конвер-

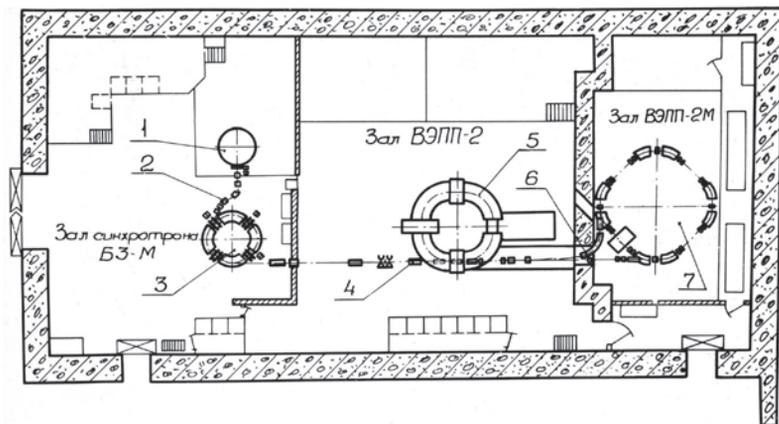


**Рис. 13.** В.Ф. Туркин

сии параболические линзы были заменены на цилиндрические литиевые, что в несколько раз увеличило скорость накопления позитронов (до 2 мА в мин) [10]. В.Ф. Туркиным была проведена модернизация синхротрона, что вместе с повышением надежности увеличило выпущенный ток.

Для поочередного впуска электронов и позитронов была организована переполюсовка источников питания ВЭПП-2, части элементов канала и системы впуска-выпуска. ВЧ система по-прежнему работала на двух частотах: 1-й и 3-й гармониках частоты обращения.

Относительное размещение коллайдера ВЭПП-2М и бустера было выбрано таким образом, чтобы упростить каналы перевода пучков, уменьшив прежде всего число поворотных магнитов. В итоге: три импульсных септум-магнита (два впускных и один выпускной), три постоянных магнита, сопряженных с септум-магнитами и обеспечивающих параллельный перенос пучков в вертикальной плоскости, и один 90-градусный магнит, поворачивающий электронный пучок в горизонтальной плоскости. Последние четыре магнита имели постоянное питание и были включены последовательно в цепь питания накопительных колец, что согласованно с их энергией меняло поле этих магнитов и снижало требование к стабильности тока. Оптическое согласование обеспечивалось 5 квадрупольными линзами, запитанными от слаботочных источников постоянного тока.



**Рис. 14.** Схема комплекса ВЭПП-2М. 1 – инжектор электронов ИЛУ, 2 – канал от ИЛУ к синхротрону (3), 4 – от синхротрона до ВЭПП-2 (5), 6 – канал от ВЭПП-2 к ВЭПП-2М (7) – до установки бустера БЗП

Для увеличения акцептанса ВЭПП-2М в режиме накопления использовалась схема с предударом по циркулирующему пучку. Инфлектор, состоящий из двух согласованных пластин, находился в следующем после впуска коротком промежутке на расстоянии чуть больше 0,75 длины волны вертикального движения от септум-магнита. Прединфлектор с одной согласованной пластиной был расположен на таком же расстоянии перед септум-магнитом, т.е. в коротком промежутке, противоположном инфлекторному. Импульс, проходящий через прединфлектор, по прямому кабелю подавался на одну из пластин инфлектора, расположенную в противоположном промежутке. В итоге возбужденные прединфлектором колебания через 1,5 волны наполовину гасились инфлектором. Схема с предударом, впервые примененная в ИЯФ, а ныне широко используемая, позволяет вести эффективное накопление без потери частиц из циркулирующего пучка.

Использование бустера с последующим ускорением до энергии эксперимента обеспечивает практически непрерывное проведение эксперимента при светимости, близкой к предельной. Инжекция затухшего в ВЭПП-2 пучка позволила уменьшить акцептанс ВЭПП-2М и, соответственно, апертуру и габариты магнитных элементов.

Акцептанс ВЭПП-2 по бетатронному движению на 2 порядка превышал акцептанс ВЭПП-2М, что давало в десятки раз большую скорость накопления позитронов по сравнению с вариантом прямой инъекции в ВЭПП-2М без бустера. Конечно, это был не оптимальный вариант бустера, тем более что надёжность ВЭПП-2 оставляла желать лучшего. Поэтому был спроектирован новый бустерный накопитель БЭП (рис. 15), введённый в строй в 1989 году [11]. Это позволило на порядок поднять скорость накопления позитронов и обеспечить предельную светимость при высокой энергии.



**Рис. 15.**  
Бустерное кольцо БЭП  
(фото 2003 года)

### Основные параметры БЭП (до модернизации).

Максимальная энергия	700 МэВ
Средний радиус кольца	355,71 см
Количество поворотных магнитов	24
Радиус кривизны в поворотных магнитах	128 см
Максимальная величина поля	1,824 Тл
Полюсный зазор магнита	4 см
Градиент магнитного поля в Ф и Д линзах	0,248 / -0,372 Тл/см
Количество и длина основных линз	12(25,1 см)+12(16,25 см)
Длина прямолинейных промежутков	63,7 см
Частоты колебаний	
вертик., горизонт., синхр.	3,2; 3,4; 0,001
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	0,05
Времена затухания (E=700 МэВ)	
бетатр, синхр. мсек	6,28; 7,3; 2,94
Частота ВЧ (кратность 2)	26,83 МГц
Напряжение ВЧ	60 кВ
Потери энергии на СИ за оборот	17 кВ
Энергетический размер ВЧ-сепаратрисы	+ -0,03
Вертикальная $\beta$ -функция, макс.	290 см
Горизонтальная $\beta$ -функция, макс.	256 см
Дисперсия	41 см
Эмиттанс $\varepsilon_x / \varepsilon_z$	$2 \cdot 10^{-5} / 2 \cdot 10^{-7}$ см <sup>2</sup> ·рад
Максимальный накопленный ток с инъекцией из БЗМ	0,6 А

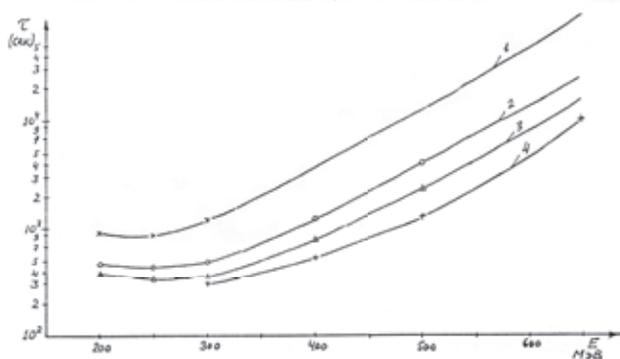
На БЭП был выполнен цикл работ по динамике пучка, что способствовало улучшению его работы [12-14].

### 3. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ И СВЕТИМОСТЬ [15-16]

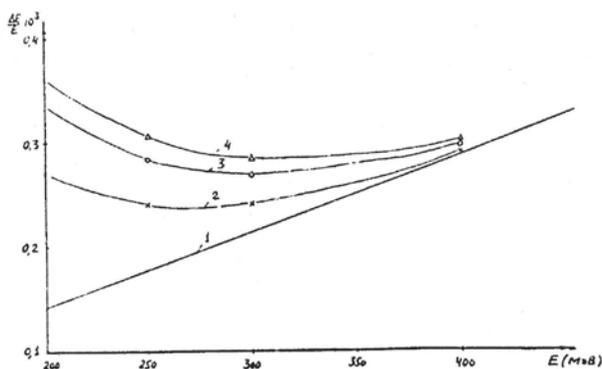
Особенностью области энергий ВЭПП-2М от 150 до 670 МэВ является сильная зависимость параметров пучков от эффекта внутреннего рассеяния (ЭВР). При токах от одного миллиампера и выше и вакууме  $10^{-9}$  торр, ЭВР определяет время жизни пучков во всем диапазоне энергий (рис. 16) и существенно увеличивает радиальный бетатронный размер и энергетический разброс в области энергий до 400 МэВ (рис. 17). Это явление было полезным для увеличения светимости. Тем не менее, этого оказалось недостаточно, и были предприняты попытки дополнительного увеличения радиального размера посредством установки в один из промежутков сверхпроводящей змейки с полем 7,5 Тл. Были предпосылки, что уменьшение времени затухания и увеличение эмиттанса позволят в области энергий 500-700 МэВ достичь светимости  $2 \times 10^{31}$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>. Однако эти надежды не оправдались. Максимальное увеличение светимости было получено на низких энергиях, при 250 МэВ было достигнуто 5-7-кратное увеличение пиковой светимости, однако при этом существенно уменьшалось время жизни. Включение змейки приводило к асимметрии набегу

бетатронных фаз, прежде всего по вертикали, между местами встречи. Для уменьшения этого эффекта была проведена соответствующая коррекция оптики. Несмотря на это пригодное для эксперимента значение светимости было ниже. Не удалось получить и заметного увеличения предельных параметров пространственного заряда, которое ожидалось получить в связи с уменьшением времени затухания. По-видимому, это было связано с апертурными ограничениями и, в частности, с влиянием змейки на величину динамической апертюры. В области  $\phi$ -мезона эффект от змейки был порядка двух.

**Рис. 16.** Зависимость времени жизни от энергии для разных токов (1-1 мА, 2-3 мА, 3-7 мА, 4-10 мА) [15]



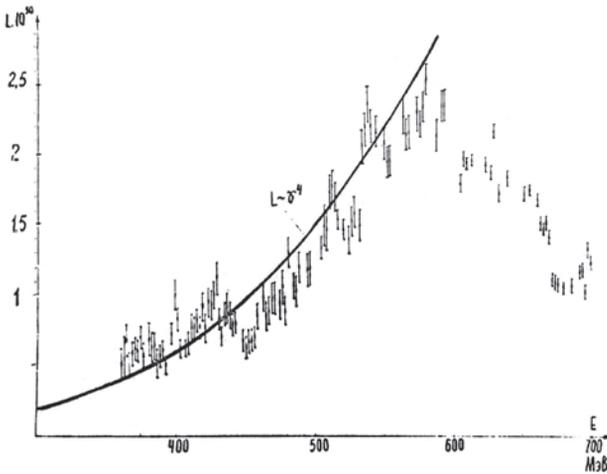
**Рис. 17.** Зависимость разброса энергий в пучке от энергии для разных токов. 1-1=0 мА, 2-1=2 мА, 3-1=4 мА, 4-1=7 мА [15]



В пучковых экспериментах, выполненных на установке как до установки змейки, так и после её установки, основное внимание было уделено вопросам изучения эффектов встречи и повышения светимости. Эксперименты и компьютерное моделирование подтвердили правильность выбора рабочей точки по частотам бетатронных колебаний таким образом, чтобы набег фазы бетатронных колебаний между местами встречи лежал чуть выше величины, кратной  $\pi$ . Также было показано, что искусственное введение асимметрии набегу бетатронной фазы действительно усиливало эффекты встречи и уменьшало светимость [15]. Так как выбранная рабочая точка лежала вблизи линейных (разностного и суммового) резонансов связи, то были поставлены эксперименты по

изучению этих резонансов и их влиянию на светимость. Для изменения их силы и, соответственно, величины вертикального размера использовались skew-квадрупольные линзы. Было показано, что максимальная светимость достигается при определенном начальном вертикальном размере в отсутствии встречного пучка. В этом случае с увеличением токов встречных пучков наблюдается одновременное увеличение вертикальных размеров встречных пучков. Ограничение предельных токов обычно было связано с предельной величиной линейного сдвига радиальной бетатронной частоты. Исследовалось также влияние различных типов модуляции, обусловленных синхротронными колебаниями, на

величину параметров пространственного заряда. На рис. 18 представлены результаты измерения светимости в диапазоне энергий (360-700) МэВ, полученные в эксперименте с детектором ОЛЯ.



**Рис. 18.** Светимость ВЭПП-2М в эксперименте с детектором ОЛЯ (1975–1979 гг.)

Ограничение светимости при высоких энергиях было обусловлено возможностью получения достаточного количества позитронов. После введения в строй бустерного накопителя БЭП светимость в области высоких энергий (600-700 МэВ) была увеличена в 2-3 раза, а в области низких энергий, как упоминалось выше такое же увеличение было получено благодаря установке сверхпроводящей змейки. Максимальное значение светимости  $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  было получено в области  $\phi$ -мезона, где установка работала значительное время, и поэтому было больше возможностей для оптимизации. Здесь же были достигнуты предельные значения линейных сдвигов частот бетатронных колебаний ( $\xi_z = 0,06, \xi_x = 0,027$ ) [16]. Это даже несколько превышает расчетные значения, заложенные при проектировании установки.

В 90-е годы в связи с разработкой новой установки с круглыми пучками, названной позднее ВЭПП-2000, на ВЭПП-2М был поставлен новый цикл экспериментов по динамике пучка. Было проведено экспериментальное изучение радиальной динамической апертуры и когерентных эффектов взаимодействия встречных пучков [17]. Динамическая апертура определялась по характеру изменения «тушековского» времени жизни от напряжения на ускоряющем резонаторе. Измерения показали, что радиальная апертура примерно в 1,5 раза меньше расчетной, вычисленной с учетом секступольных линз.

#### 4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На установке имелось 4 длинных промежутка с малой  $\beta$ -функцией, в одном из них был установлен резонатор, три других предназначались для экспериментов по физике элементарных частиц. Эксперименты на первом детекторе ОЛЯ, созданном группой Л.М. Курдадзе, начались в конце 1974 года [18]. Первые результаты по измерению массы  $\phi$ -мезона с использованием калибровки энергии методом радиационной поляризации, выполненные на этом детекторе, были доложены осенью 1975 года на V Международном симпозиуме по физике высоких энергий и элементарных частиц в Варшаве. Детектор ОЛЯ проработал на ВЭПП-2М до 1979 года, после чего был перевезён на ВЭПП-4. За время работы был набран интеграл светимости 3 обратных пикобарна.

В 1977 году на другом промежутке под руководством Л.М. Баркова были поставлены эксперимент по измерению масс заряженных каонов [19]. Массы заряженных каонов ( $K^+$  и  $K^-$ ) были измерены в реакции распада  $\phi$ -мезона на положительный и отрицательный  $K$ -мезоны по разнице между энергией встречных пучков и кинетической энергией каонов. Абсолютная калибровка энергии пучков проводилась методом резонансной деполяризации с точностью  $2 \times 10^{-5}$ , а кинетическая энергия каонов определялась по пробегам в ядерной эмульсии. Каоны идентифицировались в эмульсии по характерному виду распада  $K^+$  и захвату  $K^-$  ядрами фотозульсии в конце своего пробега. В эксперименте определялась сумма масс  $K^+$  и  $K^-$ . Калибровка соотношения пробег-энергия в эмульсии осуществлялась моноэнергетическими протонами на накопителе НАП-М с электронным охлаждением.

После экспериментов с эмульсией в этот промежуток, был установлен детектор Ю.Н. Пестова, состоящий из двух плоских искровых счетчиков с локализованным разрядом, установленных на разных расстояниях (62 и 12 см) от пучка. Такое расположение счетчиков и их высокое временное разрешение (70 пикосек) обеспечивало разделение коллинеарных электронов (позитронов), мюонов и пионов по разнице временной задержки между импульсами пиона вблизи порога рождения. Эксперимент было измерение форм-фактора пиона вблизи порога рождения. Эксперимент был проведен в диапазоне энергий от  $2 \times 200$  до  $2 \times 230$  МэВ, набранный интеграл светимости 65 обр. нанобарн [20]. В эти же годы в противоположном месте встречи были поставлены эксперименты с детектором на основе искровых оптических камер [21]. Было измерено сечение рождения пары  $\pi^+\pi^-$  при энергии 200 МэВ, интеграл светимости составил меньше одного обратного нанобарна.

В последующие 20 лет эксперименты велись с двумя детекторами КМД (криогенный магнитный детектор) с 1979 года и НД (нейтральный детектор) с 1982 года и их модификациями КМД-2 и СНД (сферический нейтральный детектор).

Важнейшей частью криогенного магнитного детектора КМД был расположенный на оси пучка сверхпроводящий соленоид, создающий магнитное поле 3,3 Тл. Магнитное поле и оптическая искровая камера

Коллайдеры и детекторы

позволяли определять знак заряженных частиц и измерять их импульс. Чтобы уменьшить влияние поля соленоида на оптику накопителя рядом с этим соленоидом были установлены компенсирующие. Эксперименты на этом детекторе велись с 1979 по 1985 годы. В 1991 году на этот промежуток был установлен новый универсальный детектор КМД-2 со сверхтонким (0,4 рад. длины) соленоидом, дрейфовой камерой и кристаллическим калориметром.

Нейтральный детектор был поставлен на место детектора с искровыми оптическими камерами. Основу детектора составлял калориметр, состоящий из кристаллов NaI(Tl) с ФЭУ, что давало возможность эффективной регистрации  $\gamma$ -квантов. Следующий детектор этого типа имел сферическую форму, отсюда его название СНД. Он обеспечивал наблюдение как нейтральных, так и заряженных частиц.

КМД (КМД-2) и НД (СНД) стояли в противоположных промежутках, что обеспечивало одновременный набор статистики. Хотя особенности детекторов позволяли эффективно наблюдать разные типы событий, полученные на этих двух детекторах результаты дополняли друг друга и давали возможность проводить сравнение. Эксперименты на этих детекторах велись с перерывами свыше двадцати лет, основные результаты в области энергий до  $2 \times 700$  МэВ были получены здесь, на коллайдере ВЭПП-2М, что признано мировой научной общественностью. Набранный интеграл светимости на этих детекторах около 100 обратных пикобарн. Описание этих детекторов и детектора ОЛЯ представлено в отдельных главах части II.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ

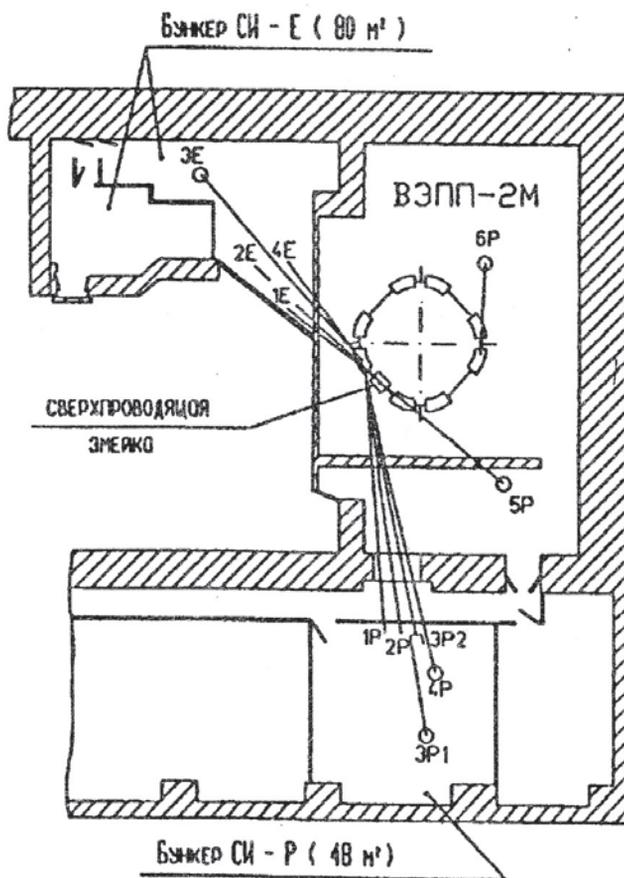
На накопительном кольце ВЭПП-2М проведен большой цикл экспериментов с поляризованными пучками. Это были пионерские работы, фактически открывшие целое направление в физике элементарных частиц. Подробное описание этих экспериментов представлено в отдельной главе, написанной Ю.М. Шатуновым.

## 6. ВЭПП-2М – ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ [22]

При проектировании накопительного кольца в конструкцию магнитов и вакуумной камеры сразу были заложены возможности постановки экспериментов с использованием синхротронного излучения. Энергия ВЭПП-2М и величина магнитного поля в поворотных магнитах позволяли работать в области ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от  $2 \times 10^3$  до 3 ангстрем. Для экспериментов с длинноволновой частью излучения были сооружены вакуумные каналы с дифференциальной откачкой, включающие в себя участки с малой проводимостью, буферные объёмы и аварийные быстродействующие шибера. При использовании коротковолнового излучения разделение высокого вакуума накопителя от низкого вакуума в экспериментальной

станции осуществлялось посредством бериллиевой фольги. Первые эксперименты по изучению спектров поглощения были поставлены сотрудниками Института неорганической химии СО АН СССР в 1974 году.

В 1984 году резонатор был переставлен в противоположный промежуток, а на его место была установлена сверхпроводящая змейка с полем до 7,5 Тл. Таким образом появилась возможность использовать излучение короче одного ангстрема. Было сооружено два защищённых бункера, где были установлены экспериментальные станции, и могло работать несколько групп (рис. 19). Из поставленных на ВЭПП-2М работ в первую очередь следует отметить эксперименты по изучению стимулированной синхротронным излучением десорбции в условиях высокого вакуума. Начало этих работ было связано с проектом суперколлайдера SSC (США, Даллас) в 1991 году, однако после закрытия этого проекта эксперименты были продолжены для другого коллайдера LHC (ЦЕРН, Женева). Выбор ВЭПП-2М для этих целей был обусловлен тем, что спектр излучения его электронов был близок к спектру синхротронного излучения протонного пучка этих коллайдеров. Так эксперименты на малом коллайдере помогли создать Большой Адронный Коллайдер-БАК (LHC), [23].



**Рис. 19.** Расположение экспериментальных помещений и каналов СИ на накопителе ВЭПП-2М (1995 г.). Название станций: 3Е – фотоэлектронная спектроскопия для химического анализа; 2Р – люминесценция с временным разрешением; 3Р1 – метрология в мягком рентгеновском излучении; 3Р2 – ВУФ спектроскопия и метрология; 4Р, 6Р – стимулированная газовая фотодесорбция; 5Р – измерение параметров позитронного пучка

## ЛИТЕРАТУРА

1. P.L. Morton and I.R. Rees. IEEE Transactions on Nuclear Science, v.ns-14, № 3, pt. 3, p. 630, 1967.
2. Г.И. Будкер, В.Е. Балакин, Л.М. Барков, В.Н. Боровиков, И.Б. Вассерман, Э.И. Зинин, М.М. Карлинер, И.А. Кооп, А.А. Лившиц, А.П. Лысенко, С.И. Мишнев, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Э.М. Трахтенберг, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов. Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М Новосибирского института ядерной физики. Труды III Всесоюзного сов. по ускор. зар. частиц. Из-во «Наука» Москва, 1973, т. 1, стр. 318-323.
3. Г.М. Тумайкин. Электрон-позитронный накопитель с большой светимостью для экспериментов по физике высоких энергий. Дисс. на соиск. докт. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1978.
4. И.А. Кооп. Разработка и экспериментальное изучение фокусирующей структуры электрон-позитронного накопителя с большой светимостью (ВЭПП-2М). Диссертация на соиск. канд. физ. мат. наук, Новосибирск, 1976.
5. Э.М. Трахтенберг. Электрон-позитронный накопитель большой светимости (конструирование и расчет основных узлов). Диссерт. на соиск. к.т.н, Новосибирск, 1973.
6. Б.А. Баклаков, И.Б. Вассерман, В.Ф. Веремеенко, М.М. Карлинер, Г.Я. Кезерашвили, С.П. Петров, Н.Г. Потапов, Ю.А. Пупков, Ю.М. Шатунов. Стабилизация средней энергии пучков в накопителе ВЭПП-2М при проведении прецизионных экспериментов. Труды седьмого Всесоюзного сов. по ускор. зар. частиц. Дубна, 1981 г., т. 1, стр. 338-340.
7. Э.И. Зинин, В.П. Кутовой. Система измерения и контроля основных параметров пучка в накопителе ВЭПП-2М. Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Из-во «Наука», т. 2, стр. 31-320, 1975.
8. С.Е. Бару, В.А. Гусев, М.Н. Захваткин, А.Н. Кирпотин, И.А. Кооп, Э.Л. Неханевич, С.И. Мишнев, В.А. Сидоров, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов. Управление ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-2М со встречными электрон-позитронными пучками. Препринт ИЯФ 75-86, Новосибирск 1975.
9. М.Н. Захваткин. Система автоматизированного управления и контроля ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М. Диссерт. на соиск. к.т.н., Новосибирск, 1985.
10. Б.Ф. Баянов, Г.И. Будкер, Г.С. Виллевалд, Т.А. Всеволожская, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров, В.А. Таюрский, А.Д. Чернякин. Светосильная оптика с большими магнитными полями для эффективного получения пучков вторичных частиц. Труды X Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий, Протвино, 1977, т. 2, стр. 103-108.
11. В.В. Анашин, И.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич, Б.И. Гришанов, А.В. Евстигнеев, И.А. Кооп, В.И. Купчик, В.М. Меджидзаде, А.А. Михайличенко, Е.А. Переведенцев, В.М. Петров, И.К. Седляров, А.Н. Скринский, Э.М. Трахтенберг, Ю.М. Шатунов. Электрон-позитронный нако-

питель БЭП. Труды Девятого Всесоюзного сов. по ускор. зар. частиц. Дубна, 1985 г., т. II, стр. 239-245.

12. V.V. Danilov, I.N. Nesterenko, E.A. Perevedentsev. Measurement of betatron coherent tune shifts and collective damping rates in BEP storage ring with the optical technique. Опубликовано в Int.J.Mod.Phys.Proc.Suppl. A2A (1993) 230-233.

Conference: C92-07-20 Proceedings.

13. V.V. Danilov, I.A. Koop, I.N. Nesterenko, E.A. Perevedentsev, E.I. Zinin. Current dependence of bunch dimensions in BEP storage ring. 1992. Опубликовано в Int.J.Mod.Phys.Proc.Suppl. A2B (1993) 1115-1117. Conference: C92-07-20 Proceedings.

14. V. Danilov, I. Koop, A. Lysenko, B. Militsyn, I. Nesterenko, E. Perevedentsev, E. Pozdeev, V. Ptitsin, Yu. Shatunov, I. Vasserman. Experimental study of collective effects in BEP storage ring with high stored current. PAC 1993. Conf.Proc. C930517 (1993) 3711-3713. Prepared for Conference: C93-05-17 Proceedings.

15. И.Б. Вассерман. Изучение эффектов встречи и получение высокой светимости на накопителе ВЭПП-2М. Диссерт. на соиск. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1981 г.

16. И.Б. Вассерман, П.В. Воробьев, Е.С. Глушкин, П.М. Иванов, Г.Я.Кезерашвили, И.А. Кооп, А.П. Лысенко, А.А. Михайличенко, Е.А. Переведенцев, А.А. Полуниин, А.Н. Скринский, В.Ф. Туркин, Ю.М. Шатунов. Светимость встречных пучков на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М со сверхпроводящей магнитной «змейкой». Труды Десятого Всесоюзного сов. по ускор. зар. частиц. Дубна, 1987 г., т. 1, стр. 347-352.

17. А.Б. Валишев. Исследование когерентных эффектов встречных пучков и динамической апертуры на накопителе ВЭПП-2М. Дисс. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 2001 г.

18. Л.М. Курдадзе. Исследование  $\rho$ -,  $\omega$ -,  $\phi$ -резонансов и формфактора пиона и каонов на встречных  $e^+e^-$  пучках. Дисс. д. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1984 г.

19. L.M. Barkov, I.B.Vasserman at al. The charged kaon mass measurement. Nuclear Physics, B148 (1979), pp. 53-60.

20. И.Б. Вассерман, П.М. Иванов, Г.Я. Кезерашвили, И.А. Кооп, А.П. Лысенко, Ю.Н. Пестов, А.Н. Скринский, Г.В. Федотович, Ю.М.Шатунов. Измерение формфактора пиона вблизи порога реакции на времяпролетном детекторе. Препринт ИЯФ 80-169, Новосибирск, 1980 г.

21. Л.М. Барков, И.Б.Вассерман, В.Б. Голубев, В.Н. Иванченко, И.А. Кооп, М.Ю. Лельчук, В.Е. Панченко, Г.М. Тумайкин, В.А. Ушаков, Ю.М. Шатунов. Измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  при энергии  $2 \times 200$  МэВ. Препринт ИЯФ 79-117, Новосибирск, 1979 г.

22. Ежегодный отчет ИЯФ 1995 год, Новосибирск, 1996, стр. 148-150.

23. А.А. Краснов. Исследование и прогнозирование динамической плотности остаточных газов в вакуумных камерах современных ускорительно-накопительных комплексов. Диссертация к.ф.-м.н., Новосибирск 2012 г.

## КОМПЛЕКС ВЭПП-4

## ПРЕДЫСТОРИЯ

С чего начинались ВЭПП-3, ВЭПП-4?

Вспоминает А.Н. Скринский:

– Ситуация была такая – обсуждали, что делать после ВЭПП-2?

Основная мысль теоретиков – идти на большие энергии. Только что такое большие энергии? Теоретики настаивали, что это только когда электромагнитные взаимодействия электронов и позитронов сравняются со слабыми. А это при 30 ГэВ. Это было в 1964–1965 годах. 3 ГэВ считались бесполезными. Вопрос, где будет площадка будущих ВЭППов, еще не обсуждался. В 1963 г. планов еще не было. 13-е здание построили без конкретных планов, на остатки денег капитального строительства.

Эти рассуждения, как показала жизнь, были совершенно неправильные. SPEAR, который был построен в 1972 году на 3 ГэВ, показал с-кварк, тау-лептон, свежую и красивую физику. Если бы ВЭПП-3 был построен как специализированный коллайдер, мы могли бы успеть. Это заблуждение привело к тому, что ВЭПП-3 появился сложно. Решили, что вначале сделаем многоцелевую машину, которая будет первой жесткофокусирующей установкой. Рассматривались следующие возможности её использования:

а) инжектор для большой будущей машины,

б)  $e^+e^-$  встречные пучки,

в) постановка первых экспериментов с только что предложенным Будкером электронным охлаждением.

Следует отметить, что в то время Андрей Михайлович очень боялся жесткой фокусировки, в его кабинете шли длительные дискуссии при участии Игоря Протопопова, начальника конструкторского отдела А.А. Лившица и меня.

В качестве проекта большой машины было принят коллайдер со встречными протон-антипротонными пучками ВАПП с энергией до  $2 \times 25$  ГэВ. Предусматривалась возможность использования этой же установки для электрон-позитронных экспериментов с энергией до  $2 \times 6$  ГэВ, поэтому в её оптическую структуру было заложено затухание радиальных бетатронных колебаний. Это уже была схема ВЭПП-4.

В качестве инжектора ВАПП безжелезный протонный синхротрон на 500 МэВ, со следующим сценарием работы. Происходит накопление протонов в большом накопительном кольце. Протоны ускоряются и сбрасываются на мишень, родившиеся антипротоны инжектируются в малое накопительное кольцо с электронным охлаждением. За сутки до 1000 циклов инжекции антипротонов. После этого антипротоны переводятся в большое кольцо, где проводятся эксперименты.

**Рис. 1.** Начало. Первые планы по 13-му зданию. А.Н. Скринский, В.П. Приходько, И.Я. Протопопов

*Малое накопительное кольцо – это будущий ВЭПП-3. Однако через небольшое время было принято решение для охлаждения антипротонов использовать другую установку – НАП (накопитель антипротонов). Таким образом, для ВЭПП-3 остались две функции: коллайдер на энергию до  $2 \times 3,5$  ГэВ и бустерный накопитель для будущего ВЭПП-4.*

Для создания такого сложного комплекса необходимо было решить проблему кадров как физиков, так и инженеров. Попытаемся, прежде всего, назвать пионеров, физиков и инженеров, включившихся в создание этого крупнейшего по тем временам комплекса. На первом этапе принятия решений работа велась, при активном участии Андрея Михайловича, И.Я. Протопоповым и А.Н. Скринским, затем к проекту подключились Б.В. Левичев и конструктор Н.А. Кузнецов, участвовавшие ранее в создании магнитов ВЭПП-2. Проблемы геодезии и выставки было поручено решать Ю.А. Пупкову, также имевшему опыт работы на ВЭПП-2. И.Я. Протопоповым были написаны первые программы расчета жестко-фокусирующих структур и магнитных элементов. Нужно отметить, что обсуждение проекта велось в узком кругу, что, по-видимому, было связано с отсутствием специалистов, хорошо понимающих проблемы жесткой фокусировки. На подходе была группа воспитанников А.Н. Скринского, которым он в НГУ читал свой первый курс лекций по ускорителям. После окончания экспериментов на ВЭП-1 к проекту подключился Г.Н. Кулипанов и с ним чуть позднее несколько выпускников НГТУ (НЭТИ), где Кулипанов также стал читать лекции по ускорителям.

Разработку синхротрона-инжектора было поручено вести В.В. Петрову и Г.И. Яснову, имевшим опыт по созданию и запуску синхротрона Б-3М. Группа Г.И. Сильвестрова, завершившая к тому времени работы на ВЭПП-2, имела в своем составе квалифицированных физиков (Т.А. Все-



Коллайдеры и детекторы

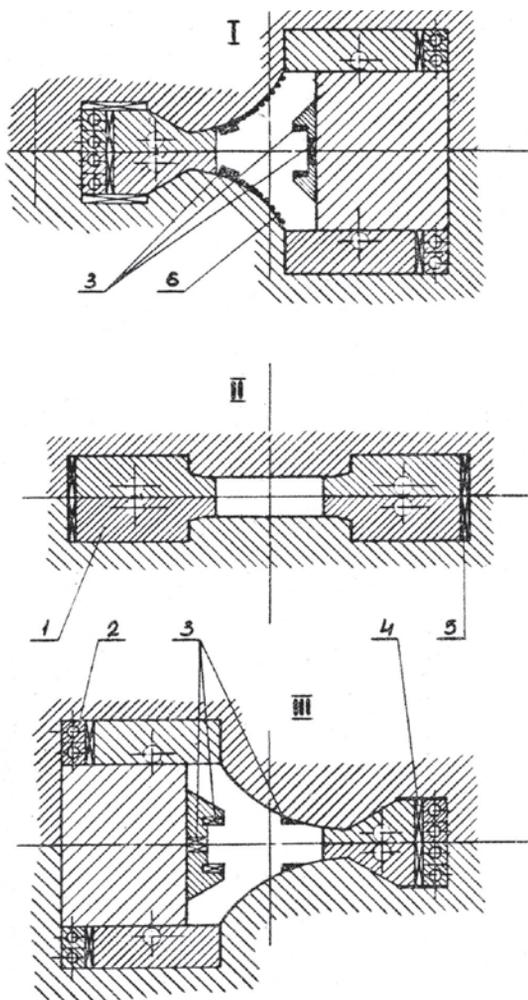
воложскую, В.Н. Пакина), инженеров (Л.Л. Данилова, Б.Ф. Баянова и др.) и лаборантов, готовых решать вопросы создания электронно-оптических каналов и конверсионных систем. За высоковольтную наносекундную технику для питания инфлекторов и дефлекторов взялся А.В. Киселев вместе со своим учеником Б.И. Гришановым. Создание электростатических систем для разведения пучков было поручено Ю.Г. Матвееву. С самого начала к проекту были подключены квалифицированные специалисты по мощным импульсным и высокочастотным системам, также работавшие на ВЭПП-2. Это Е.П. Мельников, Е.Н. Харитонов, В.Н. Ерохов и сотрудники радиотехнической лаборатории В. Петров, Э.И. Горникер, И.К. Седларов, Г.Н. Острейко, А.Ф. Серов и др. После отъезда в Москву В.С. Панасюка радиотехническую лабораторию возглавил М.М. Карлинер вместе с И.А. Шехтманом. У лаборатории сильно расширился круг задач, и её сотрудники активно и инициативно включились в разработку нового комплекса. Именно в это время начался переход к цифровой электронике, и здесь уже созрела быстро растущая команда во главе с В.И. Нифонтовым, А.С. Медведко, Э.А. Купером, получившими опыт при работе на ВЭПП-2. Начальником конструкторского отдела А.А. Лившицем была проведена большая работа по подготовке конструкторов, в частности, проведение специальных семинаров, где конструкторы получали представление о принципах работы ускорительных устройств и современных технологиях. Имеющая опыт по созданию ВЭПП-2 конструкторская команда ИЯФ обеспечила быструю и квалифицированную разработку сложнейшего оборудования. Проектирование обычно велось не по написанному заданию, выданному физиками, а по результатам совместных обсуждений, где много недоработанных вопросов приходилось решать конструкторам.

На В.П. Приходько была возложена функция главного инженера проекта: он взял на себя взаимодействие со строительными и монтажными организациями и организовал квалифицированную команду электропроектировщиков во главе с А.С. Шведовым. Интенсивно развивалась производственная база института, которая могла обеспечить изготовление широкого спектра установок комплекса. И в этом была заслуга главного инженера института А.А. Нежевенко. Таким образом, к моменту создания нового комплекса в ИЯФ уже имелся квалифицированный персонал, адекватный поставленным задачам. Однако условия этих задач непрерывно менялись, так как проекта всего комплекса в нынешнем понимании не было.

### **1. ВЭПП-3. ОТ КОЛЛАЙДЕРА ДО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

К 1967 году основные характеристики накопителя ВЭПП-3 были представлены научному сообществу [1,2]. Сильнофокусирующая магнитная система состоит из двух полуокружностей радиусом 8 м, разделенных прямолинейными промежутками длиной 12 м. Рабочая точка выбрана недалеко от центра области устойчивости, где размеры пучка минимальны. Набег фазы бетатронных колебаний на магнитную

**Рис. 2.** Поперечные сечения магнитного блока:  
 I – фокусирующий магнит,  
 II – заворачивающий магнит,  
 III – дефокусирующий магнит.  
 1 – основная обмотка на 25 кА,  
 2 – дополнительная обмотка на 2 кА,  
 3 – обмотка для создания нелинейного поля,  
 4 – обмотка коррекции градиента поля,  
 5 – обмотка коррекции по радиусу,  
 6 – обмотка коррекции по вертикали

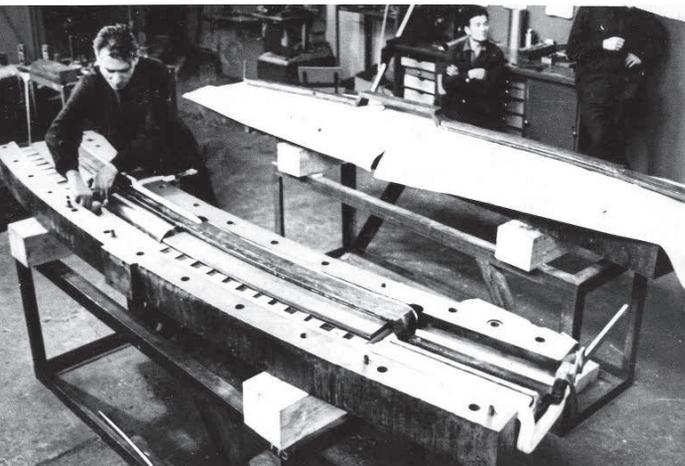


ячейку  $\sim \pi/3$ . Для получения максимального среднего поля, с целью удешевления и упрощения конструкции, магнитная ячейка выполнена единым блоком с короткими фокусирующим и дефокусирующим магнитами и двумя длинными магнитами с нулевым градиентом (рис. 2). В фокусирующем и дефокусирующем участках поля существенно различны и равны 0,46 и 0,78 от среднего. Это было необходимо для обеспечения радиационного затухания радиальных бетатронных колебаний.

Обмотки основного поля состоят из двух витков, выполненных в виде 4 профильных шин, проходящих через все магниты каждого полукольца. Шины изготавливались на фрезерном станке, для охлаждения в них были впаяны медные трубки. Обмотки соседних блоков соединяются между собой с помощью гибких соединений, изготовленных из жгута медных проволочек. Переходы между шинами плоской части и градиентным участком были соединены посредством пайки. Каждая ячейка имеет корректирующие витки – сильноточные (15% от основного тока) для подстройки частот бетатронных колебаний и слаботочные для коррекции поля, градиента, квадратичной и кубичной нелинейностей.

Магнитное ярмо ячейки изготовлено из двух деталей – верхней и нижней половинок. Для экономии трудоемкости боковые поверхности после газорезки не обрабатывались. В ярме крепились только две крупные отдельные детали – нейтральные полюса F и D участков. Все обмотки заливались в ярме эпоксидной смолой.

Полюса магнитов и линз обрабатывались на строгальном станке.



**Рис. 3.** Половина магнита (элемента периодичности) ВЭПП-3 в процессе сборки

Фокусирующие и дефокусирующие участки обрабатывались широкими профилированными резаками, изготовленными слесарями-умельцами. Контроль всех медианных плоскостей и гиперболических полюсов производился

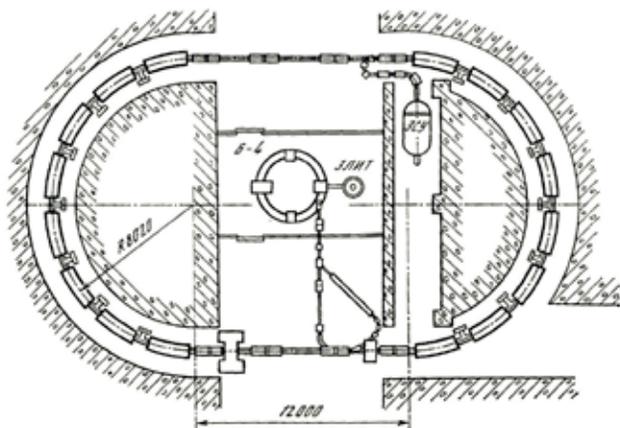
прецизионными шаблонами. Достигнутая точность обработки составила 0,03 мм. Главным конструктором магнитной системы был Н.А. Кузнецов.

Магниты полуколец подвешивались к потолку. Эта идея Андрея Михайловича позволила сэкономить на размере тоннеля и удешевить его строительство. Такое же решение впоследствии было выбрано для ВЭПП-4.

Каждый прямолинейный промежуток имел четыре пары квадрупольей и представлял собой единичную матрицу, вопрос о создании малой бета-функции в месте встречи тогда еще не обсуждался.

Для магнитных измерений была создана автоматизированная система [3,4] на основе только что появившихся датчиков Холла. Результаты измерений печатались на перфоленту, затем ленту несли в вычислительный центр и обрабатывали на ЭВМ Минск 22, которая имела только 8К оперативной памяти. Для каждого магнита вычислялись поправки к координатам геознаков для установки в проектное положение. Программы расчета элементов магнитной системы, обработки результатов магнитных и геодезических измерений писал И.Я. Протопопов [5]. Методика и вся процедура магнитных измерений, разработанные

для ВЭПП-3, используются до настоящего времени с новым приборным и программным обеспечением. Для расчета магнитных полей основных элементов, а также отдельно полей корректирующих витков использовался метод конформного отображения,



**Рис. 4.** Схема установки ВЭПП-3

программы MERMAID тогда ещё не было, она была написана А. Дубровиным много позднее после изготовления магнитной системы ВЭПП-4.

Первоначальный проект ВЭПП-3 представлен на рис. 4. Для ускорения наладки ВЭПП-3 до завершения монтажа синхротрона – инжектора Б-4 первая трассировка кольца была произведена протонами электростатического ускорителя Ван-де-Граафа (показан справа вверху). Ниже в таблице представлены первоначально запланированные параметры ВЭПП-3.

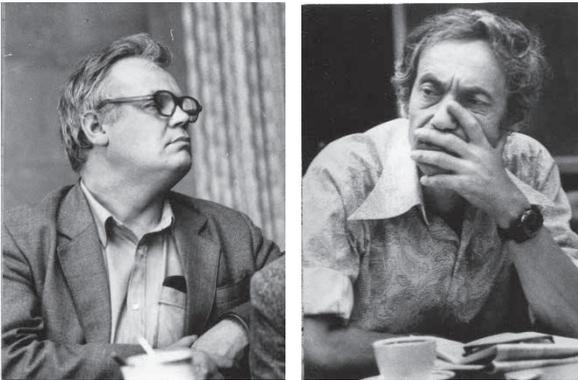
#### ПЛАНИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЭПП-3.

Максимальная энергия, ГэВ	3,5
Радиус полукольца, см	802,14
Прямолинейный промежуток, длина см	1200
Число бетатронных колебаний на обороте:	
по радиусу	5,268
вертикали	5,193
Магнитная структура	$\{(BDBFO)^8 \times I\}^2$
Структура элемента периодичности:	
Заворачивающий участок В	
длина, см	95
поле, кГс	18,9
Дефокусирующий участок D	
длина, см	52
поле, кГс	11,8
градиент кГс/см	-1,71
Заворачивающий участок В	
длина, см	105
поле, кГс	18,9
Фокусирующий участок F	
длина, см	48
поле, кГс	6,9
градиент кГс/см	1,97
Участок без поля O	длина см
	15
Квадруполь промежуток	
длина, см	61,2
градиент кГс/см	$\pm 2,995$
Коэффициент уплотнения орбиты	0,065
Потери энергии на обороте МэВ	2
Длина сгустка, см	~30
$\beta$ функция, см	
$\beta_{x-\min}$	138
$\beta_{x-\max}$	495
$\beta_{z-\min}$	143
$\beta_{z-\max}$	503
Внешний размер вакуумной камеры, см	8 x 2,9
Полезная апертура, см	5,5 x 2,7
Ток питания магнитов, кА	25
Мощность питания магнитов, МВт	1,7
Энергия инъекции ( МэВ)	
позитронов	250
электронов	350

Основное питание полуколец осуществлялось от генератора постоянного тока ГПН, система питания квадрупольных линз промежуточных и сильноточных Ф- и Д-коррекции магнитов полуколец, включенных последовательно, была построена на мотор-генераторах; переход на тиристорные источники питания был совершен позднее. Для питания индивидуальных корректоров градиентов и орбиты были созданы реверсивные источники питания на транзисторах с током до 4А. Для питания обмоток коррекции нелинейностей в магнитах полуколец и отдельных корректоров в промежутках использовались электромашинные усилители ЭМУ-50 с током до 17А. На ВЭПП-3 впервые в ИЯФ управление токами магнитных элементов было организовано с использованием ЭВМ [6].

В 1970 году в экспериментах на ВЭПП-2 и итальянской установке Adone было открыто множественное рождение адронов, после чего резко возрос интерес к области энергий  $2 \times 1$  ГэВ и выше. Стало ясно, что нужно срочно форсировать создание коллайдера ВЭПП-3.

К этому времени под руководством В.В. Петрова был построен синхротрон Б-4 [7], в качестве инжектора в который использовался импульсный ускоритель типа ЭЛИТ [8].

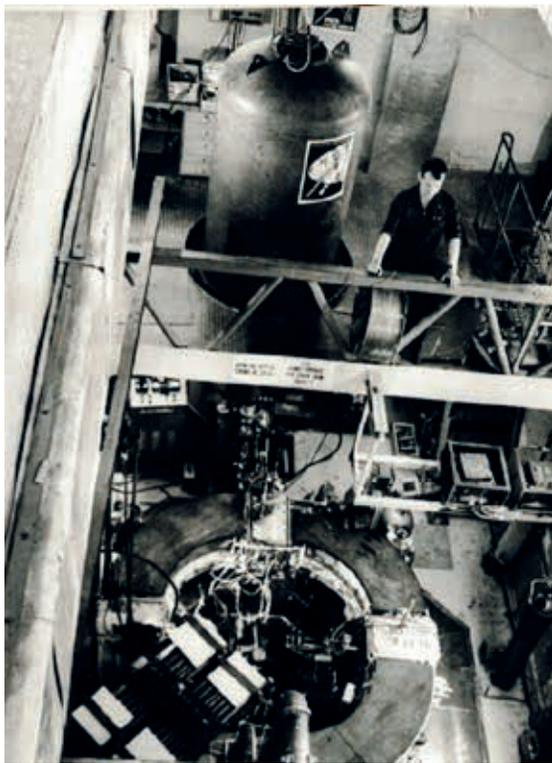


**Рис.5.** Г.И. Яснов и С.Б. Вассерман – разработчики инжектора, а в последующем установки «ПОЗИТРОН»

Разработка синхротрона началась в 1967 году, а в 1969 году он был запущен. Магнитное поле этого синхротрона, как и синхротрона Б-3М формировалось с помощью полюсов и токовых шин. Существенным отличием было размещение магнитов в вакуумном объёме. Это позволяло использовать всю вертикальную апертуру вплоть до полюсов, а радиальная апертура была существенно увеличена. Система инжекции была многооборотной с использованием бетатронного ускорения.

Одновременно велось сооружение каналов для инжекции электронов и позитронов [9]. Схема электронно-оптических каналов показана на рис. 8. В 1970 году был получен захват электронов в ВЭПП-3. Для получения позитронов [10] вначале была создана конверсионная система, основанная на короткофокусных поворотных магнитах с радиусом поворота 15 см для фокусировки электронов и 7.5 см для собирания позитронов (вариант 1). Суммарный угол поворота этих магнитов составлял 108

**Рис. 6.** Синхротрон Б-4 с инжектором ЭЛИТ-3

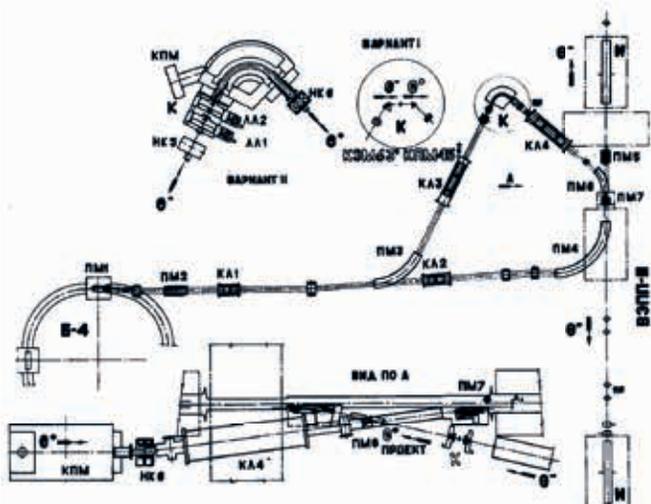


градусов. Планируемая величина магнитного поля в этих магнитах была свыше 100 кГс. Однако уже в начале запуска система с такими высокими полями оказалась ненадёжной, и от неё отказались. К этому времени Г.И. Сильвестровым была разработана литиевая линза, имеющая для выпущенного из Б-4 пучка фокусное расстояние 5 см. На основе этой линзы была создана другая конверсионная система (вариант II), в которой для собирания позитронов был использован магнит с меньшим полем (50 кГс) и углом поворота 108 градусов. С этой системой конверсии была достигнута скорость накопления позитронов в ВЭПП-3 около 45 мкА/мин. ( $1,2 \times 10^6$  e<sup>+</sup>/импульс). Все системы питания каналов были импульсными и построены на основе тиратронов или сильноточных коммутаторов собственной разработки.



**Рис. 7.** Г.И. Сильвестров.  
Руководитель работ по созданию электронно-оптических каналов

Высокочастотная система ВЭПП-3 [11] с двумя резонаторами, работавшими на первой и девятнадцатой гармониках частоты обращения, при включении только первой гармоники обеспечивала возможность накопления позитронов со сдвигом по фазе. Инжектируемый сгусток впускался со сдвигом по времени относительно затухающего, циркулирующего, а к следующему циклу инжекции из-за радиационного затухания это место освобождалось. Импульс инфлектора бил только по впускаемому пучку и не возбуждал колебаний у накопленного, что позволяло использовать весь поперечный



**Рис. 8.** Схема электрон-позитронного канала накопителя ВЭПП-3. Буквами обозначены: ПМ – поворотные магниты; КЛ – квадрупольные линзы; НК – нацеливающие катушки; пр – пробники; И – инфлекторы; К – блок конверсии; КЭМ – сильнополевой магнит для фокусировки электронов (вариант 1); КПМ – магнит для фокусировки позитронов (вариант I) и согласования дисперсионных функций (вариант II); ЛЛ1 и ЛЛ2 – фокусирующая и собирающая литиевые линзы (вариант II)

акцептанс накопителя. Пластины инфлекторов были размещены внутри линз, а наносекундные импульсы формировались разрядниками, подобными используемым на ВЭПП-2. В техническом промежутке был организован электростатический бамп для разведения орбит электронов и позитронов. После ускорения до 600 МэВ включалось напряжение на резонаторе 19-й гармоники, что обеспечивало дальнейшее ускорение до высокой энергии и получение более коротких сгустков.

Первые позитроны были получены в 1972 году, до двух пучков дело дошло только в 1974 году. К этому времени Н.А. Мезенцевым была реализована возможность перестройки оптики экспериментального промежутка с целью уменьшения бета-функции в месте встречи в режиме с циркулирующим пучком [12]. Это стало возможным благодаря созданию первых систем управления токами магнитных элементов от ЭВМ.

Однако попытки поставить эксперимент по изучению только что открытого американцами пси-мезона не увенчались успехом. Малый позитронный ток и, соответственно, малая светимость, плохая надежность, прежде всего конверсионной системы, не позволили это сделать. На установленном в экспериментальный промежуток детекторе В.Е. Балакина, построенном на основе искровых камер с оптической регистрацией, наблюдалось около десятка событий, интерпретированных как пси-мезон. В 1975 году эксперименты были остановлены.

В процессе подготовки ВЭПП-3 к эксперименту по наблюдению пси-мезона обсуждался вопрос о прецизионном измерении его массы. Была подготовлена аппаратура для измерения энергии методом резонансной деполяризации с использованием тушековского поляриметра и проведено наблюдение эффекта. Прецизионное измерение энергии предлагалось также проводить по характеру жесткой части синхротронного излучения, сравнивая интенсивности двух диапазонов волн, излучаемых с участка с хорошо известным магнитным полем. Действительно, в определенной области длин волн отношение интенсивностей

оказывается очень чувствительным к энергии пучка. Была создана соответствующая аппаратура и проведены тестовые эксперименты, показавшие возможность применения этого метода [13].

После прекращения экспериментов с двумя пучками команда Г.Н. Кулипанова, работавшая на ВЭПП-3, выполнила серию пионерских экспериментов по пучковой динамике [14-16] и развернула работы по использованию синхротронного излучения и созданию первого лазера на свободных электронах. На ВЭПП-3 впервые в мире была установлена сверхпроводящая змейка и получена рекордная по тем временам мощность направленного пучка СИ около 1 кВт [17].

Выпущенный из ВЭПП-3 пучок электронов с энергией 1,35 ГэВ был получен в 1972 году [18]. На нем Л.М. Барковым была предпринята попытка измерения магнитного момента  $\Sigma^+$  гиперона. Для наблюдения гиперонов использовалась фотоэмульсия, размещенная в мегагауссном магнитном поле, получаемом с использованием взрыва. В последующие годы ВЭПП-3 параллельно развивался и использовался как источник синхротронного излучения и для постановки ядерных экспериментов на сверхтонкой (в том числе поляризованной) мишени. Здесь были поставлены пионерские эксперименты по исследованию предложенного в ИЯФ оптического клистрона [19]. Таким образом, ВЭПП-3 с самого рождения был многофункциональной установкой. Но основной его функцией стала работа в качестве бустера для ВЭПП-4.



**Рис. 9.** С.И. Мишнев. Он 35 лет обеспечивает надежную работу ВЭПП-3 для решения разных задач

Для работы в качестве бустера с целью обеспечения впуска, ускорения и выпуска в одном направлении электронов и позитронов была реализована возможность переполюсовки всех элементов питания накопителя, систем инжекции и канала.

Подводя итоги работы первых лет установки ВЭПП-3, необходимо отметить, что запланированная программа создания коллайдера со встречными электрон-позитронными пучками не была реализована. Однако, полученный опыт работы с жесткой фокусировкой, создания новых магнитных систем и новой методики магнитных измерений по-

служил основой для реализации будущих установок. Важнейшие шаги были сделаны в области электроники (силовой, высокочастотной, измерительной), впервые было опробовано компьютерное управление. И самое главное, на ВЭПП-3 выросло молодое поколение физиков и инженеров, ставшее основой будущего развития ИЯФ. Это в первую очередь выпускники НГУ и НЭТИ (НГТУ) – В.В. Анашин, А.М. Батраков, В.Ф. Веремеенко, В.Г. Вещеревич, Н.А. Винокуров, П.Д. Воблый, О.П. Гордеев, Э.И. Горникер, В.А. Киселев, В.Н. Корчуганов, С.А. Крутихин, Г.Я. Куркин, В.Н. Литвиненко, Н.А. Мезенцев, А.Д. Орешков, Е.А. Переведенцев, С.П. Петров, В.Ф. Пиндюрин, Ю.И. Ощепков, А.В. Филипченко и др.

## 2. ВЭПП-4

### 2.1. ВВЕДЕНИЕ

Первоначально накопительное кольцо ВАПП (встречные антипротон-протонные пучки) представлялось в виде двух полуколец, образованных из целого кольца ФОДО-структуры и раздвинутых для создания прямолинейных промежутков. Прямолинейные промежутки предполагалось делать следующим этапом в зависимости от поставленной задачи. Считалось, что оптика промежутков будет представлять собой единичную матрицу по обоим направлениям, обеспечивающую согласование выхода одного полукольца с входом другого. Естественно, структура промежутков относительно их центра не могла быть симметричной. В инжекционном (техническом) промежутке было решено, как и на ВЭПП-3, использовать 4 дублета квадрупольных линз, расставленных на расстояниях, равных  $\frac{1}{4}$  длины промежутка. Оптика экспериментального промежутка ВАПП оставалась в стадии разработки.

К сожалению, ИЯФ не мог соревноваться с ЦЕРНом, где уже имелся интенсивный высокоэнергичный источник протонов. Поэтому, несмотря на развертывание работ по предложенному Г.И. Будкером электронному охлаждению, работы по ВАПП были остановлены. Оставалось далее одно – создать ВЭПП-4 (встречные электрон-позитронные пучки) и ставить на нем эксперименты. Но и у

ВЭПП-4 сразу появились конкуренты: DORIS (ДЕЗИ) в Германии и CESAR (Корнелл) в США. Поэтому на ВЭПП-4 решили заложить свою изюминку. Этой изюминкой



**Рис. 10.** Тоннель ВЭПП-4. Этап строительства

оказалась двухфотонная физика. Интерес к этой физике появился после первого наблюдения на ВЭПП-2 рождения электрон-позитронных пар в двухфотонном процессе. Для экспериментов по двухфотонной физике было предложено создать детектор с поперечным магнитным полем (МД-1), позволявший регистрировать электрон и позитрон, потерявшие энергию в процессе двухфотонного взаимодействия. После первых успешных экспериментов по изучению и применению радиационной поляризации на ВЭПП-2М для ВЭПП-4 появилась ещё одна задача. Это прецизионное измерение масс только что открытых пси-мезонов и чуть позднее ипси-лон-мезонов.

**Рис. 11.** Многие работы по строительству выполнялись руками физиков и инженеров. Слева направо: В.А. Киселев, В.В. Ненюков, Ю.А. Пупков, В.И. Купчик



Для установки детектора с поперечным полем в экспериментальный промежуток, который после этого перестает быть прямолинейным, потребовалось укоротить полукольца, сняв по одному элементу периодичности с каждой стороны.



О начале работ по проектированию магнитной структуры экспериментального промежутка вспоминает Александр Жолентц:

*– Когда пришёл на работу в ИЯФ, попал в лабораторию Игоря Яковлевича Протопопова. Первый день работы, обстановка незнакомая, новые люди. Игорь, видя и понимая мою растерянность, подошёл и дал мне задачу, проще которой он, по-видимому, не мог придумать. Это звучало примерно так. «Саша, мы собираемся поставить на ВЭПП-4 уникальный детектор с верти-*

*кальным магнитным полем. Для этого мы снимем с кольца по одному элементу периодичности с каждой стороны экспериментального промежутка, а детектор, который мы поставим примерно в середи-*

не этого промежутка, замкнёт орбиту. Длина детектора ~3,5 метра, посчитай, какое должно быть магнитное поле в детекторе». Я считал почти целую неделю. То есть, ответ я получил довольно быстро, а всё остальное время проверял себя. Дело в том, что поле, которое я насчитал, намного превышало максимальное поле, которое можно иметь в электромагните, из-за насыщения железа. Я был уверен, что я ошибся или чего-то не понимаю, и поэтому долго мучился, прежде чем решился показать результат Игорю. Мгновенно проверив меня, Игорь пошел к Сидорову. Вернулся он очень довольный, держа в руках препринт. В препринте была нарисована картинка: детектор МД-1, а по бокам ещё два магнита, и также объяснялось, почему такая конфигурация исключительно хороша для регистрации и измерения энергий рассеянных электронов в процессах двухфотонного взаимодействия в электрон-позитронных столкновениях. Эти два дополнительных магнита решили мою проблему... и предопределили будущую светимость ВЭПП-4. Дело в том, что длина детектора определяет расстояние, на котором могут быть поставлены ближайшие к детектору линзы. А эти линзы, в свою очередь, определяют, как плотно могут быть сфокусированы пучки в месте встречи, а значит, и светимость накопителя. В данном случае дополнительные магниты стали частью детектора, и линзы отодвинулись далеко от места встречи, соответственно, ослабив фокусировку пучков. Много позже, когда стало ясно, что без улучшения фокусировки хорошую светимость не получить, выход был найден в использовании так называемой «резиновой» оптики, то есть слабой фокусировки для инжекции пучков с последующей перестройкой к жёсткой фокусировке для производства светимости. При этом динамическая апертура накопителя уменьшалась, но это было уже не так важно, поскольку светимость росла без заметной потери времени жизни пучков...

Для расчета оптики ВЭПП-4 А.А. Жоленцем и И.Я. Протопоповым была подготовлена оптимизирующая программа «ОРТИ», впоследствии усовершенствованная и широко используемая для расчета ускорительных и накопительных колец и каналов [20].

Основные материалы, на базе которых создавался в ВЭПП-4, изложены в двух препринтах:

ВЭПП-4. Январь 1973 года. Рабочие материалы.

ВЭПП-4. Рабочие материалы. Выпуск 2, июль 1974 года.

Это фактически было физическое обоснование коллайдера, техническое задание в общем виде и планы. По сравнению с ВЭПП-3 это уже был большой прогресс. По этим материалам уже могли начинать работать подключавшиеся к ВЭПП-4 молодые физики, инженеры, конструкторы, электропроектировщики и др.

В перечисленных выше препринтах были представлены предварительные оценки светимости коллайдера. Предполагалось, что бета-функция в основном месте встречи будет 46 см. Согласно последнему препринту при энергии 7 ГэВ расчетная светимость составляла  $10^{30}$  см<sup>2</sup> сек<sup>-1</sup> при токах  $2 \times 10$  мА и  $4 \cdot 10^{31}$  см<sup>2</sup> сек<sup>-1</sup> при токах  $2 \times 250$  мА.

Достижение такой светимости зависело от успехов позитронной программы, о которой речь пойдет дальше, и возможности получения больших токов. Существенное отличие ВЭПП-4 от ВАПП – необходимость мощной ВЧ системы. К этому времени началась разработка Гирокона – ВЧ генератора непрерывной мощности с круговой развёрткой, идея которого была предложена А.М. Будкером и проверена в импульсном варианте. И ещё одна проблема – мощное синхротронное излучение. Это требовало создания приемников СИ и соответствующей откатки.

Историю создания и работы комплекса ВЭПП-4 можно разбить на 3 этапа.

**1-й этап:** от начала конструирования до лета 1977 года. В этот период были собраны магнитная и вакуумная системы и их питание, однорезонаторный вариант высокочастотной системы, канал от ВЭПП-3, системы впуска, системы диагностики пучка. В отсутствие источника позитронов целью 1-го этапа была проверка всех систем комплекса и получение циркулирующего электронного пучка с использованием старой инжекционной системы в синхротрон Б-4 и бустера ВЭПП-3.

Электронный пучок в кольце был получен 9 июня 1977 года. Были проведены первые эксперименты по изучению магнитной структуры, показавшие хорошее совпадение расчетных и полученных значений бета-тронных частот и оптических функций.



**Рис. 12.** В экспериментальной промежулке ВЭПП-4. На первом плане А.М. Будкер и президент АН СССР А.П. Александров (июнь 1977 г). А.П. Александрову было показано синхротронное излучение электронов

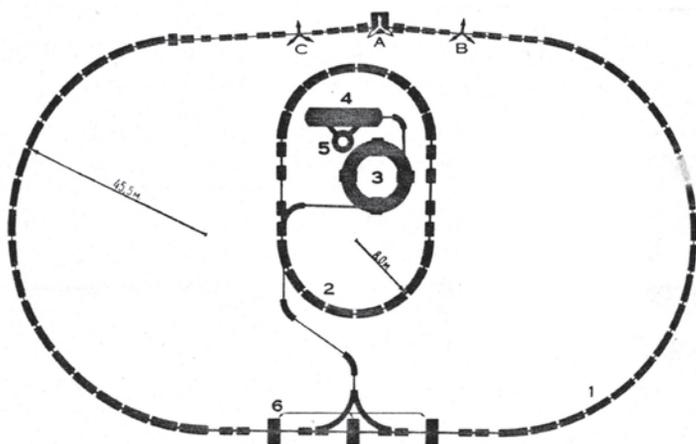
**2-й этап:** конец 1977 года до середины 1980 года. В течение этого времени был смонтирован и введен в строй источник электронов и позитронов (ПОЗИТРОН), обеспечивший работу ВЭПП-4 в качестве коллайдера. Сооружение и запуск принципиально новой и сложной установки удалось осуществить за два с небольшим года.

Сразу после получения двух пучков с использованием детектора ОЛЯ были поставлены первые эксперименты по прецизионному измерению масс пси-мезонов. На проведение этих уникальных экспериментов понадобилась всего пара месяцев.

**3-й этап:** середина 1980 – осень 1985 года. В это время в экспериментальный промежуток был установлен детектор МД-1, введена в строй мощная ВЧ система и проведен цикл экспериментов в области энергий до  $2 \times 5,5$  ГэВ.

## 2.2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА [20-24]

Магнитная система ВЭПП-4 состояла из двух полуколец и двух промежутков: экспериментального и технического (рис. 13).



**Рис. 13.** Схема комплекса ВЭПП-4.  
 1 – кольцо ВЭПП-4,  
 2 – кольцо бустерного накопителя ВЭПП-3,  
 3 – синхротрон Б-4,  
 4 – линейный ускоритель,  
 5 – импульсный СВЧ-генератор типа Гирокон,  
 6 – ускоряющие резонаторы ВЭПП-4.  
 А, В, С – места встречи пучков

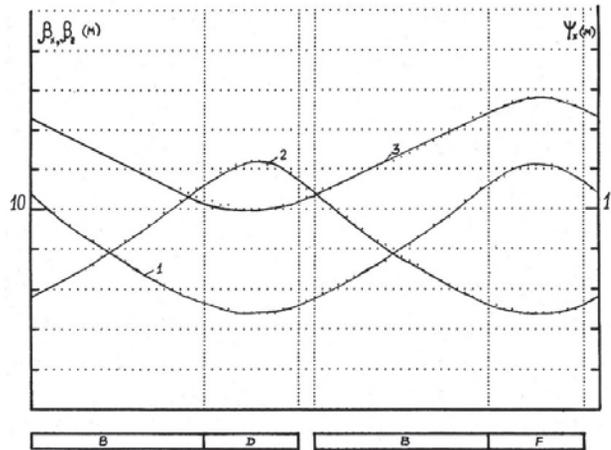
### 2.2.1. ПОЛУКОЛЬЦА. ЭЛЕМЕНТ ПЕРИОДИЧНОСТИ

В отличие от ВЭПП-3 элемент периодичности в полукольцах состоял из двух магнитных блоков с совмещенными функциями поворота и фокусировки: в одном блоке F-, в другом, D-участок (FODO структура). Фокусирующие и дефокусирующие участки выполнены прямолинейными, без кривизны, а плоские магниты имеют радиус поворота 35,67 м. Структура элемента периодичности приведена на рис. 14.

В формы профиля полюсов в F-, D-участках введены поправки, создающие квадратичную нелинейность. 7-процентные коррекции градиента, заложенные в градиентные участки, позволяли в широких пределах перестраивать частоты бетатронных колебаний. На рис. 15

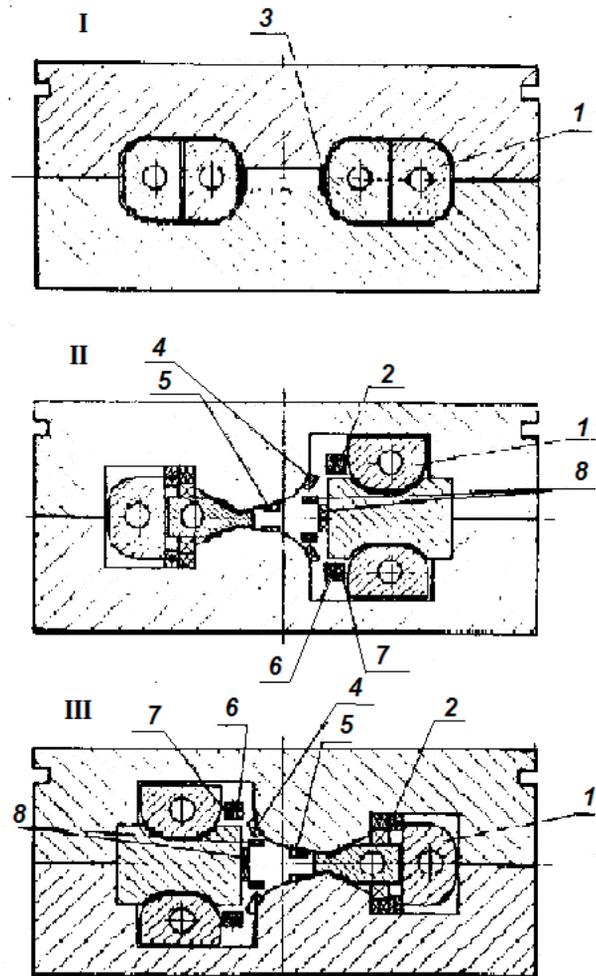
**Рис. 14.** Оптические функции элемента периодичности.

- 1 –  $\beta_x$ -функция,  
 2 –  $\beta_z$ -функция,  
 3 –  $\psi_x$ -функция



**Рис. 15.** Поперечное сечение элемента периодичности ВЭПП-4.

- I – секция В,  
 II – секция F,  
 III – секция D.  
 1 – основная обмотка,  
 2 – сильноточная коррекция градиента,  
 3 – обмотка коррекции  $B_z$ ,  
 4, 5 – обмотки коррекции  $B_x$  и  $dB_z/dz$ ,  
 6, 7 – слаботочные обмотки коррекции градиента,  
 8 – обмотки коррекции  $d^2B_z/dx^2$



приведены сечения магнитов и показаны обмотки коррекций.

Корректоры орбиты по радиусу (3), расположенные в плоской части F и D магнитов, соединены последовательно и запитаны отдельно для каждого элемента периодичности. Сильноточные обмотки коррекции градиента (2), расположенные в линзовой части, по всему кольцу соединены последовательно и подключены к двум источникам питания отдельно в F- и D-линзах. Кроме того, имеются слаботочные корректоры градиента (6, 7), запитанные от

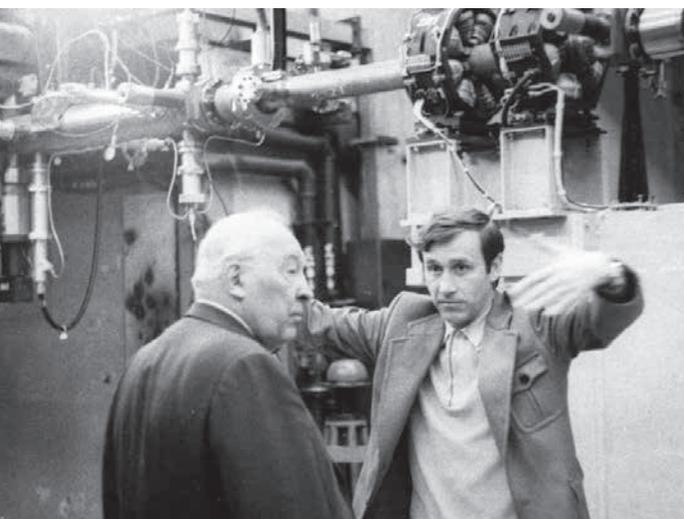
индивидуальных источников. Комбинацией соотношения токов в обмотках (4, 5) можно создавать радиальное магнитное поле для коррекции орбиты по вертикали и поле повернутого квадруполь (sqew-линза) для коррекции связи. В градиентных участках была заложена возможность создания кубичной нелинейности комбинацией токов в обмотках (8) и (5) в соотношении 12:1.

Элемент периодичности первоначально был ориентирован на протон-антипротонную программу ВАПП-4, поэтому магнитные поля в фокусирующих и дефокусирующих участках были одинаковы. Это не обеспечивало радиационного затухания радиальных бетатронных колебаний, поэтому в структуру кольца был включен специальный магнитный элемент – затухатель, который перераспределял радиационные декременты. Конструктивно «змейка-затухатель» выполнена в виде девяти секций с поочередной сменой знака поля и градиента. Длина семи центральных секций 32 см; длина крайних секций в два раза меньше, что обеспечивает нулевой интеграл поля и отсутствие искажений орбиты вне «змейки».

Производство магнитов полуколец было организовано в южной части 13-го здания. Здесь был установлен большой строгальный станок и другое оборудование, создан участок заливки шин в магниты и стенд магнитных измерений. Для магнитов кольца и детектора МД-1 на ленинградском заводе «Красный Выборжец» было заказано 200 тонн шин из меди М1 специального профиля с внутренним отверстием для охлаждающей воды. На сталь марки Армко тоже был специальный заказ.

В то время ИЯФ имел мощную поддержку руководства страны, и в обеспечении дефицитными материалами и компонентами большую роль играла материальная база Министерства среднего машиностроения, курирующего атомную программу страны. Это также относится и

к монтажно-строительным организациям (МСУ) этого министерства, высококвалифицированные специалисты которого выполнили большой объем проектных, монтажных и наладочных работ.



**Рис. 16.** Министр среднего машиностроения Е.П. Славский и директор ИЯФ А.Н. Скринский в тоннеле ВЭПП-4

## 2.2.2. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОМЕЖУТОК

Промежуток предназначен для размещения ускоряющих резонаторов, системы инжекции электронов и позитронов и другого оборудования. Фокусировка и согласование параметров пучка на промежутке с полукольцами осуществляется восемью квадрупольными линзами, объединенными в четыре дублета. Оптическая схема промежутка (расстановка линз и их сила) выбрана так, что преобразование траекторий отдельных частиц через промежуток, как и в ВЭПП-3, описывается единичной матрицей по обоим направлениям. Оптические функции промежутка не являются симметричными относительно центра промежутка, и это создает разные условия для впуска электронов и позитронов.

Основная часть свободных промежутков между дублетами была предназначена для размещения ускоряющих резонаторов. Апертура в линзах равна 8 см. Такой апертуры было достаточно, чтобы разместить в них инфлекторные пластины. Важной частью структуры технического промежутка является разработанная Ю.Г. Матвеевым система электростатики для локального разведения орбит электронов и позитронов в паразитном месте встречи. Пластины для разведения были размещены в оставшихся после установки инфлекторов четырёх линзах.

На концах промежутка, соответственно для электронов и позитронов, размещены системы оптического наблюдения за пучками по синхротронному излучению из плоской части поворотных магнитов полукольца.

## 2.2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРОМЕЖУТОК

Для постановки детектора с поперечным полем необходимо было уменьшить число элементов периодичности в каждом полукольце с 20 до 19, сняв по одному элементу периодичности на входе в экспериментальный промежуток. Для симметризации структуры промежутка в детекторе и прилегающих к нему участках на выходе южного полукольца были установлены 3 дополнительные линзы, при этом место встречи оказалось смещённым относительно центра промежутка в сторону северного полукольца, а противоположное место встречи совпало с центром промежутка между дублетами технического промежутка. В то время обсуждалась возможность постановки ещё одного детектора в технический промежуток.

С обеих сторон от детектора МД-1 были размещены дополнительные доворотные магниты, увеличивающие отклонение потерявших энергию частиц. Суммарный угол поворота детектора и доворотных магнитов –  $16^\circ$ . Остальные 2 градуса до 18 градусов поворота убранных элементов периодичности обеспечивал двухградусный магнит, расположенный на выходе из южного полукольца. Рядом с ним был установлен затухатель для перераспределения декрементов затухания. Вначале предполагалось иметь только одно место встречи в детекторе с поперечным полем. Впоследствии структура экспериментального промежутка была пересмотрена (см. рис. 17). Организовано три места встречи для экспериментов – одно центральное (А) и два дополнительных (В и С), в которых, естественно, не было поперечного магнитного поля. Дополнительные места встречи предполагалось использовать для

установки более простых детекторов на первом этапе работ до ввода в строй основного детектора МД-1 с поперечным магнитным полем. Для обеспечения необходимого угла поворота на месте детектора МД-1 была установлена тройка эквивалентных по углу поворота магнитов, причем небольшой магнит МД-0, находящийся в месте встречи, можно было выключать или менять его полярность, сохраняя угол поворота изменением поля соседних магнитов. Это было сделано для проведения эксперимента Ю.А. Тихонова по исследованию спектра однократного тормозного излучения на встречном пучке.

Ниже представлены первоначальные проектные параметры ВЭПП-4.

Максимальная энергия, ГэВ	7
Длина орбиты, м	366,2
Частоты бетатронных колебаний	9,1÷9,2
Радиальный фазовый объем, мрад*см	3,3*π
Вертикальный фазовый объем, мрад*см	0,8*π
Коэффициент уплотнения орбиты	0,022

#### Полукольца

Средний радиус, м	45,5
Число элементов периодичности	2x19
Число магнитов	76
Длина магнита, мм	3330
Расстояние между магнитами, мм	243
Апертура камеры, мм	27x60
$\beta_{z,r}$ – функция:	
максимум м	12,3
минимум м	5,8

Пси-функция:	
максимум м	1,48
минимум м	1,0

#### Экспериментальный промежуток

Длина промежутка, м	54,7
Число квадрупольных линз	15
Число возможных мест встречи	3
Набег фазы бетатронных колебаний $Q_{z,r}$	2,3

#### Параметры мест встречи (Оптика 2)

##### Центральное место встречи А

$\beta_z$ м	0,46
$\beta_r$ м	2,23
$\Psi$ м	1,0

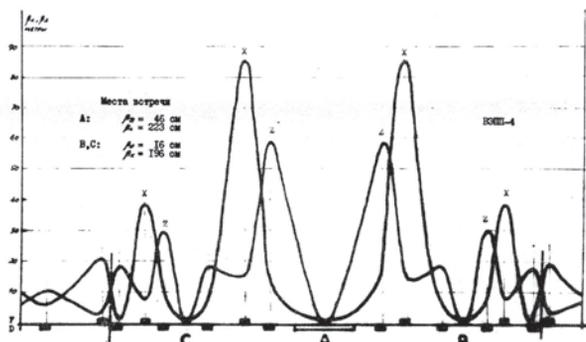
##### Боковые места встречи В, С

$\beta_z$ м	0,16
$\beta_r$ м	0,19
$\Psi$ м	0,15

#### Технический промежуток

Длина, м	40
Число квадрупольных линз	8
Длина дублета линз, мм	2950
Расстояние между дублетами, мм	7050

**Рис. 17.** Оптические функции экспериментального промежутка (Оптика 2)



В структуре экспериментального промежутка имелось 15 линз, из них 3 линзы, прилегающие к северному полукольцу, использовались, как упоминалось выше, для симметризации структуры, а по 6 линз с каждой стороны от основного места встречи А определяли параметры мест встречи. Подбирая градиенты в этих линзах, можно было в соответствии с поставленной задачей менять структуру экспериментального промежутка. Были подготовлены две структуры, названные «Оптика 2» и «Оптика 3». Первая использовалась на низкой энергии для проведения экспериментов в основном месте встречи «А» и боковых местах «В» и «С». «Оптика 3» обеспечивала постановку экспериментов только в месте встречи А с детектором МД-1. Приведенные выше параметры экспериментального промежутка соответствуют так называемой «Оптике 2». После установки детектора МД-1 оптика промежутка была оптимизирована в пользу повышения светимости в основном месте встречи. Гибкая перестройка оптики с накопленными пучками (резиновая оптика) позволила получить вертикальную бета-функцию 12 см вместо первоначально планируемых 46 см.



**Рис. 18.** Этап монтажа центральной части экспериментального промежутка и отдельно детектора МД-1

#### 2.2.4. ПИТАНИЕ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Система питания основного поля и катушек детектора была построена на машинных генераторах постоянного тока, соответственно ГПН-1650 с максимальным током 8 кА и ГПС-6300 с максимальным током 6 кА. Линзы промежутков и 7% – коррекции градиента в магнитах по-

луколец были запитаны от 100-киловаттных тиристорных преобразователей (ИСТРов), изготовленных в Таллине и существенно модернизированных специалистами ИЯФ. В указанных выше источниках питания применены разработанные в ИЯФ бесконтактные магнитомодуляционные датчики измерения тока, обеспечивающие точность измерения  $10^{-5}$ , долговременная стабильность тока была лучше  $10^{-4}$ . Для подавления пульсаций использовались пассивный фильтр на электролитических конденсаторах и активный фильтр с обратной связью, обеспечивающий подачу корректирующего напряжения последовательно с нагрузкой. Опорное напряжение, задающее ток электромагнита, вырабатывал цифроаналоговый преобразователь ЦАП-ШИМ, управляемый от ЭВМ.

Для питания обмоток коррекций нелинейностей в полукольцах, а также секступольных и *scw*-квадрупольных линз были разработаны менее мощные (5 кВт) реверсивные источники с широтно-импульсным преобразованием, а для коррекции орбиты – маломощные реверсивные источники питания на транзисторах с током до 10 ампер. Основными разработчиками систем питания магнитных элементов были Б.А. Бакланов, В.Ф. Веремеенко, А.С. Медведко, С.П. Петров, В.Г. Попов [25–26].

### 2.3. ГЕОДЕЗИЯ [27]



О создании геодезической группы и организации геодезических работ вспоминает Ю.А. Пупков, представляя круг проблем, мало известных другим специалистам: – 1963 год. Два студента физфака НГУ направлены на ВЭПП-2 к В.Л. Ауслендеру, который перемещается по всему институту чуть медленнее ускоренных пучков. Повстречались, определились в группу магнитных измерений Б.В. Левичева.

Позже Феликс Израйлев перешел к Б.В. Чирикову и стал специалистом по стохастике и хаосу. Я же с 1968 года специализировался на строго детерминированных предельно точных величинах – углах, длинах, высотах, допусках и посадках. И.Я. Протопопов, работавший ВЭПП-3 и ВАПП-4, предложил мне заняться проблемами точной выставки магнитных систем этих ускорителей. Так познакомился с новой для меня областью – инженерной геодезией.

Геодезия – слово греческого происхождения, «гео» – «земля» и «дайдо» – «разделяю», одна из наук о Земле. Но ускорители ИЯФ – ВЭПП-3 и ВАПП-4 – не стояли на полу, а висели на потолке, и геодезии пришлось оторваться от матушки Земли, устремиться вверх и начинать все работы в подвешенном состоянии, стоя на подставках, стремянках, стульях и прочих подсобных устройствах.

ВЭПП-3 – первый жесткофокусирующий ускоритель ИЯФ. Критерий точности, существовавший в это время, был следующий: задавалось среднеквадратическое искажение орбиты, равное  $\sim 1/10$  апертуры вакуумной камеры (55×27 мм) и определялись вызывающие это искажение случайные среднеквадратические отклонения от проект-

ного положения магнитов (линз). Было определено, что  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  должны быть 0,2 мм и 0,1 мм соответственно. Эти погрешности включали неточности изготовления магнитов, магнитных измерений, перенесение координат магнитных осей на внешние реперные точки магнитов, координирование геознаков и установку магнитов от них. Изготовление, магнитные измерения, привязка к реперным точкам имели погрешности ~0,02 мм. Поэтому координирование геознаков необходимо было выполнять с погрешностью ~0,1 мм, что при среднем радиусе орбиты 8,3 м требовало относительную точности  $\sim 10^{-5}$ . Для сопоставления – примерно таков относительный коэффициент теплового расширения железа.

Расчет геометрии орбиты, положения реперных точек на магнитах, проектного положения геознаков производились в КБ на электромеханических машинах «Курсксчетмаш», а тригонометрические величины извлекались из семизначных таблиц Семендяева. ЭВМ были еще недоступны. При тщательной прорисовке траектории конструктором Юрием Валяевым был обнаружен эффект, на который ранее не обратили внимания. Чтобы в прямолинейных промежутках орбита была параллельна линии, соединяющей центры полуколец, они должны быть развернуты на некоторый угол, названный потом валяевским. Причина – разные величины полей, которыми заканчивался один магнит (F-участок) и начинался следующий (B-участок).

Любые небольшие изменения, в том числе по результатам магнитных измерений, требовали повторения всех вычислений.

Так как ИЯФ всегда шел своим путем, для выставки магнитов ВЭПП-3 была выбрана схема вытянутой кольцевой трилатерации расположения геознаков. Трилатерация – измерение длин сторон примыкающих друг к другу треугольников.

Установка геознаков и магнитов в проектное положение предполагалась с помощью жестких шаблонов и средств измерения из машиностроения. Поэтому геознаки, крепившиеся на потолке и спускающиеся к магнитам, представляли тяжеловесную и сложную конструкцию со сменными точными частями. Шаблоны для сторон треугольников длиной 1,6 м и 1,4 м были изготовлены из сухого качественного дерева, приобретенного на фабрике пианино «Сибирь». Коэффициент расширения дерева вдоль волокон в несколько раз меньше, чем у стали, а теплопроводность мала, и шаблон не успевал нагреваться в руках за время работы.

Дальнейшее моделирование выставки показало, что от жестких шаблонов необходимо перейти к измерениям контролируемых размеров и применять приборы и средства инженерной геодезии – инварные проволочные меры длины, точные теодолиты и нивелиры. Трилатерация была заменена полигонометрией – измерением длин сторон и углов многоугольника. Навстречу геознакам-сталактитам с пола поднимались сложные высокие подставки – сталагмиты. На них крепились и центрировались теодолит, проволочные меры с десятикилограммовым грузом и т.п.

Все магнитные элементы ВЭПП-3 были выставлены в проектное положение с точностью  $\pm 0,05$  мм. Вспоминаю курьезный случай. В тоннель зашел очень уважаемый в ИЯФе механик. Посмотрел на магниты и произнес запомнившуюся фразу: «На глаз не видно, но перекос есть!».

В 1969 году по кольцу ВЭПП-3 был проведен протонный пучок из электростатического ускорителя Ван-де-Граафа, а в 1970 году были захвачены электроны.

На очереди был ВАПП, трансформировавшийся в ВЭПП-4.

Требования на точность выставки магнитов ВАПП-4 первоначально были также сформулированы в единицах среднеквадратических искажений орбиты в зависимости от среднеквадратических ошибок выставки магнитов. Ошибки выставки предполагались некоррелированными, и коэффициенты пропорциональности между ошибками и искажениями были равны 40-50, суммарная погрешность юстировки магнитов должна быть 0,1-0,2 мм. При среднем радиусе орбиты 45,5 м относительная погрешность  $(2-4) \cdot 10^{-6}$ . На такую величину меняется показатель преломления воздуха при изменении температуры на 2-4°C.

Для разработки проекта геодезического обеспечения был привлечен Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК), имевший опыт геодезического обеспечения для 7 ГэВ протонного синхротрона ИТЭФ и 70 ГэВ протонного синхротрона ИФВЭ (У70). МИИГАиКом с учетом потолочного крепления магнитов ВАПП-4 была предложена следующая схема геодезического обоснования. На отметке 1,5 м от пола на тумбах устанавливались 16 геознаков опорной сети. Опорная сеть – многоугольник с периметром ~360 м, в котором измерялись длины сторон, от 16 до 25 метров, и углы. В проектное положение знаки опорной сети выставлялись после измерений. На отметке орбиты, 2,3 м от пола, напротив каждого реперного знака полулинз магнитов располагались геознаки сети сгущения, 80 штук, через 3,62 м. Производилась передача координат 14 знаков опорной сети на верхний горизонт. Между двумя знаками опорной сети находилось 5-7 знаков сети сгущения. Координаты знаков сети сгущения определялись по измерению расстояний между ними и высот вытянутых треугольников, вершины которых образовывали три соседних знака. Шаблонами от этих знаков устанавливались магниты в тоннеле. В прямолинейных промежутках линзы предполагалось выставлять от временных переставных тумб с геознаками.

МИИГАиК произвел моделирование процесса измерений методом статистических испытаний (искажения модели). При этом датчиком случайных чисел были кубики, которые многократно бросались, сумма нормировалась на  $\sigma\alpha=1''$  и  $\sigma L=0,05$  мм. Погрешности определения радиального и азимутального положения геознаков получились  $\sigma R=0,1$  мм,  $\sigma S=0,06$  мм. Схема была принята для реализации.

Применяемые на У-70 методики, приборы были модифицированы и усовершенствованы.

Геознак, применяемый на У-70, был модифицирован Ю.Д. Валяевым, так что вес уменьшился примерно в пять раз. Для измерений длины применялся Высокоточный Уровенный Динамостат (ВУД) с проволочными мерами. Самый точный теодолит ОТ-02, применяемый в полевой геодезии, был доработан в мастерских МИИГАиК для принудительной центровки на наших геознаках с точностью  $\pm 0,03$  мм.

Измерение расстояний между геознаками производилось проволочными инварными мерами длины. Инвар – материал с малыми коэффициентами теплового расширения, но с одним отрицательным свойством – в течение нескольких лет при длине  $\sim 24$  м мера при эксплуатации может менять свой номинал до 0,1–0,2 мм.

Были изготовлены по два комплекта эталонных и рабочих мер. Точно определять длины эталонов можно было только на компараторе МИИГАиКа. Там имелся вторичный Государственный эталон длины 3 м, которым последовательными шагами, от одного отсчетного микроскопа к другому, определялась длина до 24 м, далее под микроскопы подводилась калибруемая проволочная мера. Для натяжения мер применялись грузы 10 кг со специальными блоками. Грузы, блоки, карабины при измерениях должны быть те же самые, что и при компарировании. Меры требовали деликатного обращения. Поэтому я и лаборант Ю.М. Зверев несколько раз ездили в Москву с большим тяжелым багажом, откупив купе в вагоне.

Для перенесения длины с эталонов на рабочие меры требовался свой компаратор длиной 25,5 м. Его и построили в вентиляционном канале между 13 зданием и энергоцентром. На нем можно было эталонировать любую рабочую меру длины.

Дальномеры, которые существовали в это время (МЕКОМЕТР, ДК-001), обеспечивали точность  $\sim 1$ –3 мм. Но стали появляться лазерные интерферометры (измерители перемещений) с необходимой точностью и диапазоном. Первые пробы на компараторе были проведены с ДИП-2, доплеровским измерителем перемещений Института автоматики. Но пока его доводили до кондиции, на рынке появился чешский интерферометр – измеритель перемещений LA-2000, который и приобрели. Наш компаратор стал первым интерференционным компаратором в стране. Появилась возможность изготавливать и компарировать свои меры любой длины, а также оказывать услуги сторонним организациям.

Сейчас компаратор оборудован лазерным интерферометром НР 6666.

Удалось отказаться и от проволок с фиксированными длинами и перейти на инварные рулетки с калиброванными отверстиями с шагом 80 мм.

Рядом с каждым плановым геознаком сети сгущения располагались высотные реперы. Были изготовлены специальные нивелирные рейки, выбрана схема и создана методика нивелирных измерений. В итоге положение высотных реперов определялось с  $\sigma_h = 0,05$  мм относительно средней отметки.

*К началу монтажа магнитов геосеть была создана, знаки выставлены в проектное положение. С помощью шаблона – имитатора магнита приваривались подвески к закладным балкам на потолке тоннеля. Прежде чем подвешивать магниты, все подвески, закладные балки и места сварки испытывались на удвоенную нагрузку – 5 тонн на одну подвеску. Все балки и подвески успешно прошли испытания. Несущие балки располагались с шагом ~1 м, что не было кратное длине магнита, и подвески вдоль каждого магнита располагались почти случайным образом. Это пришлось позже частично исправлять. Причина – магниты имели несимметричную конструкцию верхних. Толстые медные шины вклеены только в верхние половинки, и при нагреве получался изгиб магнита. В зависимости от мест крепления подвесок линзовые части разных магнитов смещались на разные величины.*

*К 1977 году монтаж и выставка всех магнитов и линз были завершены и в июне получен пучок электронов в ВЭПП-4.*

*В настоящее время для измерений и юстировки магнитов применяются лазерные трекары, кардинально изменившие методики и позволившие отказаться от многих геодезических приборов. Понимание динамики пучка позволило сформулировать менее жесткие требования на точность выставки всего кольца, а именно, достаточно обеспечить высокую точность на участках порядка длины волны бетатронных колебаний.*

К воспоминаниям Ю.А. Пупкова следует добавить, что на геодезистах также лежала задача выставки электронно-оптических каналов, где были свои проблемы.

## **2.4. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА**

При разработке накопителей как ВЭПП-3, так и ВЭПП-4, необходимо было решить проблему получения высокого вакуума в условиях мощного синхротронного излучения. С этой целью были разработаны распределённые магниторазрядные насосы, расположенные в магнитном поле поворотных магнитов. Насосы устанавливались непосредственно в вакуумной камере вблизи её внутренней стенки, а на наружном радиусе были расположены водоохлаждаемые приемники синхротронного излучения. Для уменьшения десорбции газа под действием излучения приёмники были покрыты золотом. Таких насосов, расположенных в плоской части магнитов, было 76, а приемники излучения, выполненные из медной сплюснутой трубки, проходили как через плоскую, так и градиентную часть магнитов. Кроме распределённых насосов, еще имелось 120 сосредоточенных магниторазрядных насосов, размещенных как между магнитами полуколец, так и в прямолинейных промежутках, а в области детектора МД-1 дополнительно были установлены сорбционные титановые насосы. В промежутках было поставлено несколько типов сосредоточенных приемников излучения. Всего в экспериментальном промежутке было установлено 38 приемников излучения, в техническом – 20. Все приемники излучения охлаждались водой. Акту-

альным был вопрос уменьшения влияния жесткого синхротронного излучения на фоновые условия в детекторе. Принятые решения позволили получить хороший вакуум (порядка  $10^{-9}$  Торр), приемлемые фоновые условия, и на высокой энергии 5,5 ГэВ иметь время жизни несколько часов при рабочих токах  $2 \times 10$  мА.

Производство вакуумных камер, как и магнитов, было также организовано в 13-м здании. Здесь же был участок испытаний и прогрева. Основная часть вакуумного оборудования (шиберы, сосредоточенные магниторазрядные насосы полуколец, аварийные клапаны и др.) также была изготовлена в ИЯФ. Разработку, монтаж и наладку вакуумных систем комплекса вели В.В. Анашин (руководитель лаборатории), Л.А. Мироненко и А.Н. Драничников с командой опытных лаборантов. Подробное описание вакуумной системы установок ВЭПП-3 и ВЭПП-4 можно найти в диссертации В.В.Анашина [28].



Рис. 20. В.В. Анашин

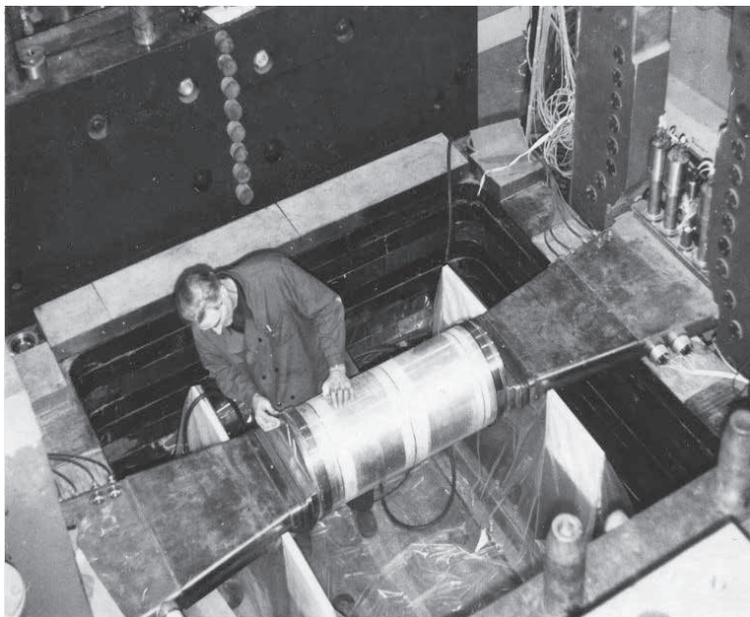
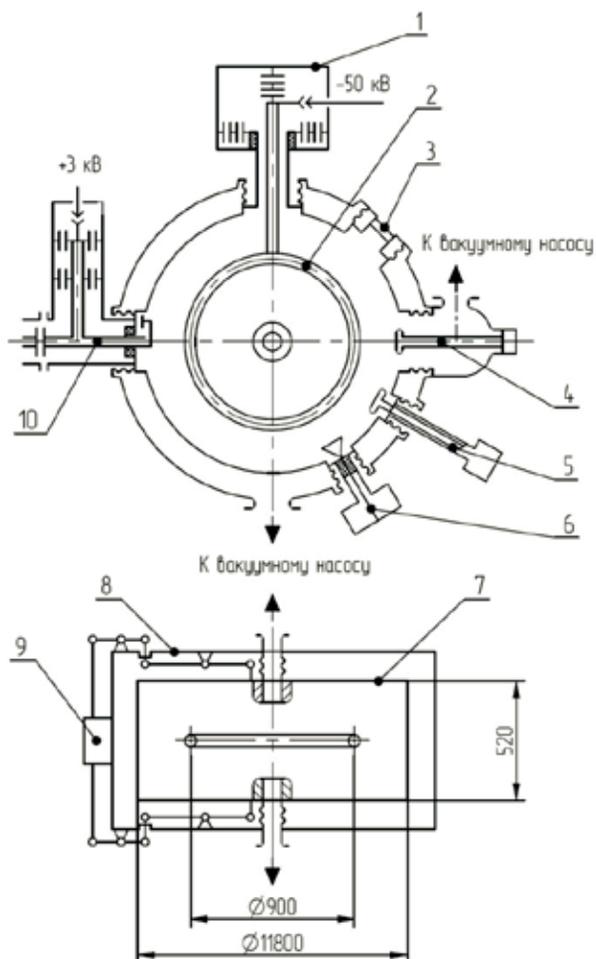


Рис. 21. Вакуумная камера МД-1. Л.А. Мироненко

## 2.5. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

При создании высокочастотной системы ВЭПП-4 по совокупности многих обстоятельств (большая мощность потерь на синхротронное излучение, требуемая длина сгустка, наличие необходимых ламп, возможности производства резонаторов и генераторов, стоимость и пр.) была выбрана рабочая частота 181 МГц, что соответствовало 221 гармонике частоты обращения. Была разработана конструкция тороидального резонатора, имеющего в середине ускоряющего промежутка кольцевой электрод для подавления мультипактора и специальные подвижные электроды для перестройки высших (паразитных) мод, предназначенные для борьбы с продольной неустойчивостью циркулирующих пучков (рис. 22).



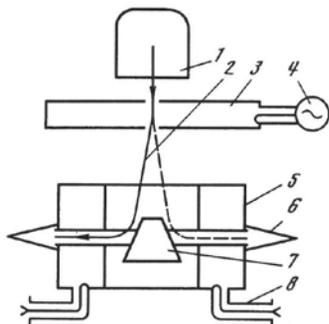
**Рис. 22.** Ускоряющий резонатор накопителя ВЭПП-4:  
 1 – узел подачи смещения,  
 2 – кольцо,  
 3 – окно,  
 4, 5 – перестройка высших мод,  
 6 – измерительная петля,  
 7 – внутренний корпус,  
 8 – внешний корпус,  
 9 – механизм подстройки частоты,  
 10 – ввод мощности

**Рис. 23.** ВЧ-резонаторы в техническом промежутке ВЭПП-4



**Рис. 24.** Схема гирокона.

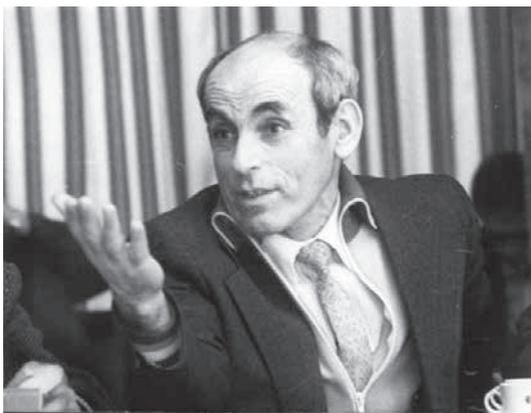
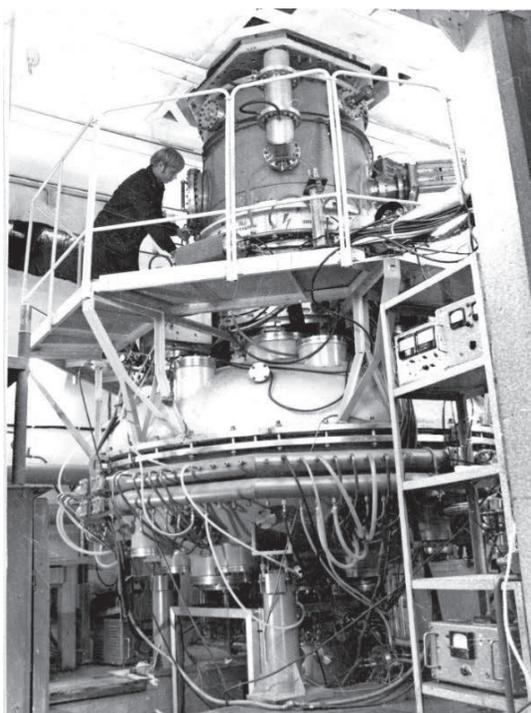
- 1 – ускоритель электронов,
- 2 – пучок электронов,
- 3 – резонатор развёртки и его питание,
- 4 – ввод мощности,
- 5 – выходной резонатор,
- 6 – коллектор электронного пучка,
- 7 – магнитоэлектрическая отклоняющая система,
- 8 – вывод мощности

**Рис. 25.** Гирокон

На первом этапе работы на низкой энергии при измерении масс пси-мезонов использовался один резонатор. Он был запитан от лампового генератора с выходным каскадом на четырех лампах ГИ-50А с мощностью в 130 кВт. Максимальное напряжение составляло 1,1 МВ, что было достаточно для получения энергии 3,8 ГэВ. Так как потери на синхротронное излучение растут пропорционально  $E^4$ , то для первоначально планируемой энергии 7 ГэВ требовалось свыше 11 МэВ на оборот. Для начала было решено поставить еще 5 резонаторов, чтобы обеспечить получение энергии 5,5 ГэВ. В качестве источника был разработан новый, предложенный А.М. Будкером усилитель высокочастотной мощности ГИРОКОН (рис. 24-25). Работа по созданию ГИРОКОНА велась под руководством И.А. Шехтмана, подготовившего из выпускников НЭТИ (НГТУ) команду специалистов по ВЧ системам.

Принцип гирокона основан на круговой развертке электронного пучка вращающимся магнитным полем (резонатор развертки) и ввода его в круговой замкнутый волновод (выходной резонатор), в котором пучок отдает свою энергию (рис. 24).

Мощность из выходного резонатора гирокона отбиралась по двум волноводным выводам

**Рис. 26.** И.А. Шехтман

и после суммирования по специальному волноводу подавалась в технический промежуток ВЭПП-4, где с помощью ответвителей распределялась между пятью резонаторами. Первоначальный проект гирокона был ориентирован на получение высокочастотной мощности несколько МВт при КПД около 80%. На первом этапе работы гирокона на 5 резонаторов при измерениях масс ипсилон-мезонов была получена мощность 220 кВт. Однако даже при такой мощности надежность этого сложного устройства оказалась невысокой и после очередной аварии с источником электронного пучка ИСУ-2 работа с гироконом были временно остановлена.

В 1983 году питание всех резонаторов было переведено на лампы ГИ-50А. Выходные каскады, построенные на этих лампах, были установлены непосредственно перед резонаторами. Мощность для возбуждения этих каскадов подавалась по волноводному тракту, использовавшемуся ранее для подачи мощности от гирокона. Суммарная мощность системы высокочастотного питания составляла около 200 кВт, что позволяло работать с током электронов и позитронов  $2 \times 10$  мА при энергии до 5,3 ГэВ. Считалось, что эта система питания являлась временной (резервной) на период, необходимый для повышения надёжности гирокона и получения необходимой мощности. Быстрое выполнение этой работы – заслуга группы В.М. Петрова.

Над созданием высокочастотных систем комплекса ВЭПП-4 работала большая команда из радиотехнической лаборатории, руководимой М.М. Карлинером и И.А. Шехтманом, основные материалы изложены в докладах на конференциях и диссертациях [29-33].



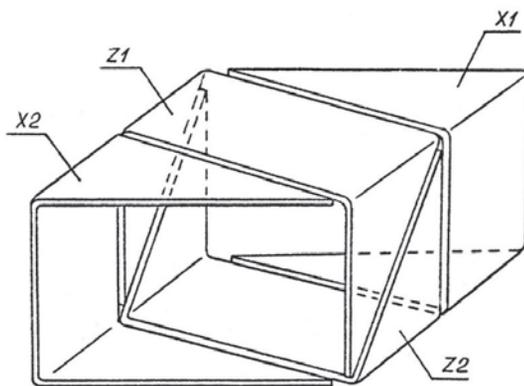
Рис. 27. В.М. Петров

## 2.6. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ

Измерение орбиты проводилось с помощью 52 пикап-станций, позволяющих измерять положение орбиты с точностью до 0,5 мм. Конструктивная схема пикапа приведена на рис. 28. Датчик имеет четыре электрода, каждый из которых для увеличения линейности имеет треугольную проекцию на ту плоскость, для измерения которой он предназначен. Координата пучка пропорциональна разности сигналов с соответствующих электродов.

У датчиков полуколец наружные вертикальные участки электродов практически отсутствуют. Это исключает засветку синхротронным излучением, от которого для защиты пикапов принимались и другие меры. Пикапы около линз с большой бета-функцией имеют увеличенную апертуру.

**Рис. 28.** Конструкция пикапа промежутка



Посредством коммутаторов четыре электрода поочередно подключались к измерительной аппаратуре. Набор из 52 пикап-станций был разбит на 8 групп, каждая из которых подключена к обрабатываемому блоку «АЦП-орбита», где производилась предварительная обработка сигналов. Ввиду малой величины сигналов с пикапов и большого уровня шумов приняты специальные меры для выделения сигнала: фильтры, проверка нулей, накопление информации и др. Предусмотрена калибровка пикапов посредством подачи имитационного сигнала через соответствующие ключи. Вся информация с «АЦП-орбита» представлялась в цифровом виде, и после обработки на ЭВМ положение равновесной орбиты можно было видеть на экране монитора. Работы по созданию системы измерения и коррекции орбиты велись под руководством А.С. Медведко [34-35]. Следует отметить, что подобная система вначале была создана для ВЭПП-3. В фундаментальной диссертации А.С. Калинина [36] кроме пикапов кольца описаны электромагнитные датчики для синхротрона и каналов.



**Рис. 29.** А.С. Медведко, зам. зав. лаб., создал широкий спектр источников питания и систем диагностики

Для измерения циркулирующего тока был создан феррозондовый датчик постоянного тока с разрешением 10 мкА [37].

На ВЭПП-4 получили дальнейшее развитие оптические методы измерения параметров пучков, основанные на использовании синхротронного излучения. На выходе с обеих сторон технического промежутка соответственно для позитронов и электронов были размещены оптические системы, созданные, в основном, на основе разработок, ранее используемых на ВЭПП-2М. Установленная аппаратура позволяла наблюдать интенсивность пучков, особенно в процессе инжекции, их размеры, распределение по сепаратрисам, когерентные колебания, измерять декременты затухания и др. Все оптические системы наблюдения создавались Э.И. Зининым [38].

### 3. ПОЗИТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ ВЭПП-4

#### 3.1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема получения достаточного количества позитронов возникла с самого начала создания электрон-позитронных встречных пучков в 13-м здании. Из-за дефицита позитронов ВЭПП-3 как коллайдер не состоялся, а для в ВЭПП-4 позитронов требовалось, по крайней мере, на порядок больше. Поиски решения позитронной проблемы продолжались не один год. Технические и финансовые возможности ИЯФ не позволяли использовать стандартные схемы, применяемые в западных центрах. К тому же идеология Андрея Михайловича была настроена на поиск своих оригинальных и более дешевых решений. Рассматривались несколько вариантов. Наиболее продвинутым (1973–1974 гг.) был вариант с так называемым «Напёнком», небольшим слабофокусирующим кольцом с краевой фокусировкой. Его структура напоминала структуру планируемого ранее накопителя антипротонов (НАП), отсюда и появилось это название. Это небольшое кольцо с краевой фокусировкой, имеющее большой энергетический акцептанс (10%), планировалось использовать для собирания и охлаждения позитронов, получаемых посредством конверсии ускоренных в синхротроне Б-4 электронов. После охлаждения за счет радиационного затухания эти позитроны должны были ускоряться в синхротроне и инжектироваться в ВЭПП-3. В оптимистическом варианте в этой схеме с учетом полученного в синхротроне Б-4 тока свыше 1 ампера можно было рассчитывать на скорость накопления до  $10^9$  позитронов в секунду.

Однако, как упоминалось выше, к этому времени были достигнуты успехи в создании предложенного Будкером нового типа мощного высокочастотного генератора с круговой разверткой, названного гироконом. Импульсный вариант гирокона мог обеспечить высокочастотное питание сильноточного линейного ускорителя, достаточного для получения необходимого количества позитронов. Поэтому программа получения позитронов пошла в другом направлении. Помимо решения важнейшей задачи получения позитронов для ВЭПП-4 это направление стимулировало развитие новых идей и технологий, связанных с разработкой линейных ускорителей. Именно с этого времени начались работы по созданию проекта линейного коллайдера ВЛЭПП.

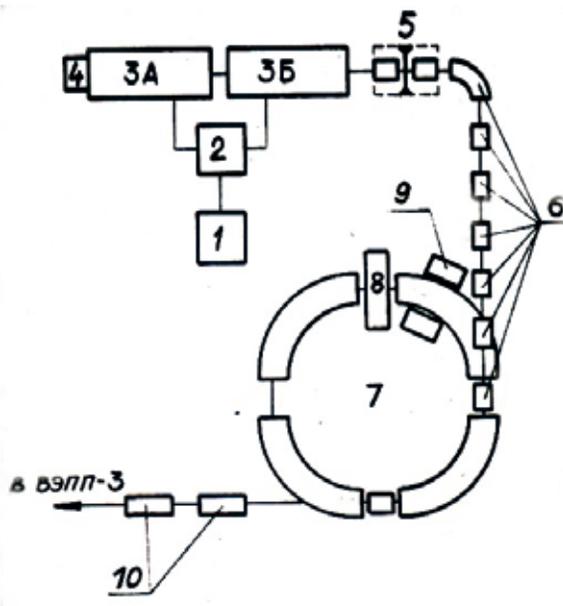
Ниже кратко описана схема инжекционной части комплекса ВЭПП-4. Эта схема включает в себя инжектор электронов и позитронов – установку ПОЗИТРОН, бустерный накопитель ВЭПП-3 и систему транспортировки и инжекции пучков в ВЭПП-4.

#### 3.2. УСТАНОВКА «ПОЗИТРОН» – ИНЖЕКТОР ПОЗИТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ [39, 40]

В 1979 г. был введен в строй кардинально обновленный инжекционный комплекс ВЭПП-4, обеспечивающий получение позитронов для коллайдера ВЭПП-4. Блок-схема всей установки, включая синхротрон Б-4,

линейный ускоритель (ЛУ), импульсный гирокон, ускоритель ЭЛИТ-3А и все остальные элементы, необходимые для получения и транспортировки пучков, приведена на рис. 30.

**Рис. 30.** Блок-схема установки «ПОЗИТРОН».  
1 – источник релятивистских электронов ЭЛИТ-3А,  
2 – импульсный гирокон,  
3А и 3Б – секции линейного ускорителя (ЛУ),  
4 – электронная пушка,  
5 – конверсионная система,  
6 – система транспортировки частиц ЛУ – Б-4,  
7 – синхротрон Б-4,  
8 – ускоряющий ВЧ-резонатор,  
9 – бетатронный сердечник,  
10 – элементы системы электронно-оптического канала Б4 – ВЭППЗ



Электроны с энергией 100 кэВ в течение 27 нс (1 оборот в синхротроне) инжектируются пушкой (4) и ускоряются в двух секциях ЛУ (3А, 3Б) до энергии 50 МэВ. В блоке конверсии (5) электроны фокусируются на вольфрамовый конвертор толщиной 3,5 мм, а полученные позитроны при энергии 7 МэВ (максимум спектра) направляются через систему транспортировки (6) в синхротрон Б-4 (7), где ускоряются до энергии 350 МэВ. Для улучшения синхротронного захвата применено доускорение частиц до энергии 13 МэВ с помощью бетатронного сердечника (9). При энергии 350 МэВ частицы через электронно-оптический канал (10) переводятся в накопитель ВЭПП-3, который является бустером накопителя ВЭПП-4.

Возбуждение ЛУ производится от импульсного гирокона (2), преобразующего энергию электронного пучка ускорителя ЭЛИТ-3А (1) в энергию электромагнитных колебаний. Используются два режима работы ЛУ. В первом режиме для получения позитронов сказано выше. Второй режим используется для получения электронов с такой же энергией 7 МэВ, как и позитронов на выходе конвертора. С этой целью перестраивается собственная частота второй секции ЛУ таким образом, чтобы ускоренный в первой секции пучок проходил вторую секцию в замедляющей фазе напряжения, имея на выходе суммарную энергию 7 МэВ. Конвертор при этом выводится из области прохождения пучка, а в системах транспортировки, инжекции и синхротроне изменяется направление магнитного поля.

Установка «ПОЗИТРОН» была смонтирована и запущена (выпуск позитронов из Б-4) менее чем за 2 года.

Максимальная интенсивность выпущенного из синхротрона пучка позитронов составляла  $2 \times 10^8 \text{ сек}^{-1}$ .

Подробное описание установки «Позитрон» с перечнем литературы имеется в препринте В.В. Нейфельда и В.В. Петрова «Инжектор ПОЗИТРОН для ВЭПП-4», ИЯФ 2015-15, Новосибирск, 2015 [39].



**Рис. 31.**  
Общий вид  
установки  
«Позитрон»

Ведущие разработчики установки: В.В. Петров, А.В. Филипченко, А.В. Кожемякин, Г.И. Яснов, И.И. Авербух, В.А. Таюрский (синхротрон, конверсионная система), С.Б. Вассерман, В.М. Радченко, И.И. Глазков (ЭЛИТ), М.М. Карлинер, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко, В.Г. Вещеревич, И.Г. Макаров, Е.В. Козырев, Г.В. Сердобинцев, Б.М. Фомель, И.А. Шехтман (ГИРОКОН, ЛУ), В.И. Нифонтов, А.С. Калинин, А.С. Медведко, А.М. Батраков, В.Р. Козак, В.В. Репков, Э.А. Купер, В.В. Каргальцев (диагностика пучков, системы автоматизированного измерения и управления), О.В. Анчугов, Б.И. Гришанов (система впуска/выпуска), Г.И. Кузнецов, Ю.А. Чибук (электронные пушки), Г.И. Сильвестров, В.А. Киселев, Л.Л. Данилов, В.Н. Пакин (электронно-оптические каналы), А.Ф. Серов, О.П. Гордеев, П.Т. Надточий, Е.Н. Харитонов (импульсное питание), Г.С. Крайнов, В.Г. Ческидов, Б.З. Персов, Ю.В. Манлаков, Г.А. Корнюхин, А.А. Лившиц, Э.М. Трахтенберг, Ю.А. Немков и др. (конструкторы), С.Д. Белов, Б.В. Левичев, Ю.И. Эйдельман и др. (программное управление). В запуске «ПОЗИТРОНА» и его развитии большую роль сыграли П.А. Дурнов, С.Е. Карнаев, В.В. Ненюков, В.С. Ворошилов, В.К. Сандырев, Ю.М. Глуховченко.

Установка «ПОЗИТРОН» под руководством В.В. Петрова надежно с небольшими модернизациями проработала свыше 35 лет.



**Рис 32.** Планерка в пультовой (1979 г.), обсуждаются вопросы по запуску «ПОЗИТРОНА». За круглым столом (слева по кругу): Е.П. Мельников, О.П. Гордеев, Е.Н. Харитонов, Э.А. Купер, А.Б. Темных, Ю.И. Эйдельман, Г.М. Тумайкин, Е.В. Козырев, О.А. Нежевенко, В.М. Радченко, Г.И. Яснов; 2-й ряд: Б.В. Левичев, И.Я. Протопопов, Е.Н. Зуев, С.И. Мишнев; 3-й ряд: А.П. Чабанов, А.Д. Орешков, П.Т. Надточий, В.А. Киселев, В.М. Шинелев

### 3.3. КАНАЛ ВЭПП-3 – ВЭПП-4. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

Максимальная энергия, при которой планировалось проводить перепуск пучков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4, составляла 2 ГэВ. Трасса канала довольно сложна и определяется пятнадцатью горизонтальными и вертикальными поворотными магнитами, часть из которых осуществляет поворот в двух плоскостях (рис. 33). Протяженность трассы около 65 м, перепад высот 4 м. Относительно небольшой акцептанс ВЭПП-4 требовал хорошего согласования оптических функций и высокой стабильности полей поворотных магнитов. Чтобы уменьшить требования к стабильности полей, участок параллельного переноса и участки поворота пучков электронов и позитронов выполнены ахроматическими. При последовательном питании магнитов этих участков от одного источника существенно удалось снизить требование к стабильности источника тока. Для организации ахроматического переноса использовались шесть квадрупольных линз, а для ахроматического поворота по 3 линзы на каждом повороте. Оригинальное решение было принято при разработке впускных септум-магнитов. Конструкция наиболее ответственной части септум-магнита (так называемого ножа) выполнена из биметал-

лического листа, полученного с помощью сварки взрывом бериллиевой бронзы со сталью. Это позволило обеспечить одновременно механическую прочность и уменьшить величину вываливающегося магнитного поля на равновесной орбите.

Питание магнитных элементов каналов импульсное, от конденсаторных батарей, в качестве коммутаторов используются тиристоры. При малой частоте повторения перепусков пучков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 это оправдано экономией электроэнергии и более простыми, не требующими охлаждения, обмотками магнитных элементов. Корректирующие элементы также имеют импульсное питание. В каждом цикле работы элементов канала проводится измерение величины магнитного поля. Для измерений берется напряжение с витка, расположенного на полюсе. Далее сигнал интегрируется и измеряется с помощью разработанной В.В. Каргальцевым электроники. Точность измерения  $10^{-4}$ . Перед перепуском пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 делается несколько пробных «выстрелов». В случае отклонения поля от заданной величины напряжение на конденсаторной батарее через управляющие программы подстраивается так, чтобы вернуть величину магнитного поля к соответствующему значению.

Для наблюдения за координатами и размерами пучков на первом этапе использовались подвижные люминофоры в комплекте с телевизионной системой, затем были разработаны сеточные датчики с вто-

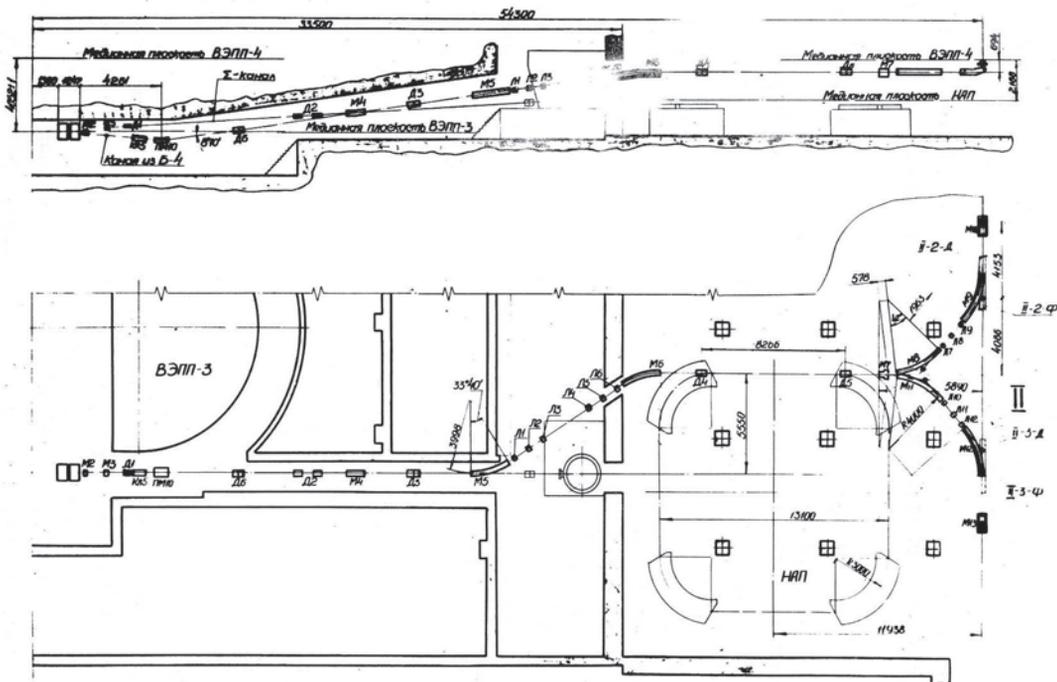


Рис. 33. Схема электронно-оптических каналов

ричной эмиссией. Однако рассеяние на сеточных датчиках приводило к заметному увеличению эмиттанса. В последующие годы сеточные датчики были заменены на разработанные В.П. Черепановым датчики тока, работа которых основывается на измерении тока изображения, наводимого пучком в полосковых линиях, установленных внутри вакуумной камеры. Суммарный сигнал со всех проводников дает величину тока, а распределение сигнала по отдельным проводникам позволяет определить смещение центра тяжести и соотношение среднеквадратичных размеров пучков [41].

При создании систем импульсного питания всего комплекса ВЭПП-4 произошел переход к разработанным в ИЯФ стандартным модульным генераторам – ГИМНам (генератор импульсного напряжения). В первые годы в ИЯФ источники импульсного питания размещались в высоковольтных блоках. Это требовало большей площади, увеличивало трудозатраты, в частности, при выполнении монтажных работ, усложняло обслуживание. Перевод импульсных систем на ГИМНы позволил перенести их изготовление в экспериментальное производство, что удешевило их стоимость и дало возможность обеспечить стандартизацию. Было разработано несколько типов ГИМНов большой мощности для магнитов и линз и малой мощности для корректирующих элементов. В последующие годы эта идеология распространилась на другие установки ИЯФ и контрактные заказы. Разработка источников велась под руководством А.Ф. Серова.



**Рис. 34.** В.А. Киселев, М.Ю. Фомин и О.П. Гордеев проверяют работу ГИМНов

При проектировании системы впуска в ВЭПП-4 планировался режим с накоплением. Для этого за четверть волны вертикального движения перед впускным магнитом установлены пластины, обеспечивающие предудар по накопленному пучку, который гасился бы ударом инфлектора, что должно было обеспечить эффективный режим накопления. К сожалению, эта схема не прошла из-за малого акцептанса ВЭПП-4, большого эмиттанса пучка в ВЭПП-3 и дополнительного рассеяния на разделительных фольгах. Поэтому пришлось работать в режиме однократного впуска, когда при инжекции накопленный пучок полностью выбивается. Импульсы инфлекторов ВЭПП-4 и дефлектора ВЭПП-3 формировались с использованием в качестве коммутаторов импульсных

тиратронов. Пластины дефлектора ВЭПП-3 и инфлекторов ВЭПП-4 короткозамкнутые, т.е. на пучок действует только магнитное поле. Из-за отсутствия согласованных нагрузок на пластины инфлектора приходят отраженные от генератора импульсы, поэтому длины трасс подобраны так, чтобы отраженные импульсы не совпадали с циркулирующими пучками. С помощью системы электростатики электронный и позитронный пучки в области впуска во время эксперимента разведены, т.е. их орбиты не лежат в плоскости накопителя, поэтому при впуске проводилась локальная коррекция орбиты магнитными корректорами так, чтобы равновесная для впускаемого пучка не имела бампа в месте впуска. Основные разработчики: В.А. Киселев, Г.И. Сильвестров, Б.И. Гришанов, В.М. Барбашин, Г.А. Корнюхин, Э.М. Трахтенберг, О.В. Анчугов, Ю.Г. Матвеев, М.Н. Ульянов и др. Подробное описание канала и обсуждение широкого спектра проблем, связанных с ним и системой инжекции, изложено в диссертации В.А. Киселёва [42].

#### 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА [43-45]

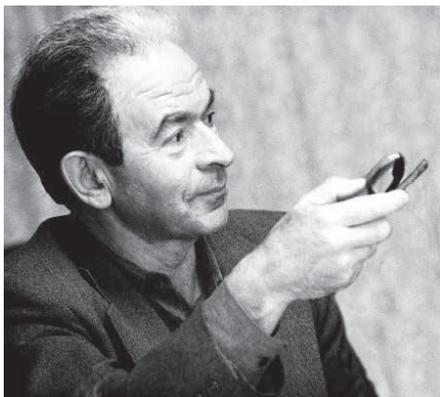


О начале развития систем автоматического управления вспоминает один из родоначальников автоматизации Э.А. Купер:

*– Первые эксперименты в Институте по применению ЭВМ для целей управления ускорителями начались в начале 70-х годов прошлого столетия.*

*Счастливые обстоятельства способствовали успешному старту и бурному развитию этого научного направления в течение нескольких десятилетий:*

*– появилась интересная, важная и трудная для того времени задача – научиться взаимосогласованно с основным полем с высокой точностью (0,02%) перестраивать токи в линзах вновь сооружаемого накопителя ВЭПП-3, т.е. реализовать, так называемую «резиновую» оптику;*  
*– в 13 (радиоэлектронной) лаборатории Института была молодая команда – группа Нифонтова, которая считала, что любые задачи ей по плечу. И был у этой группы мудрый наставник, заведующий лабораторией М.М. Карлинер, которому удалось направить бурную энергию молодых оптимальным образом. (Пятидесяти лет мудрому наставнику тогда не было);*



**Рис. 35.** Марлен Моисеевич Карлинер, руководитель лаборатории, специалист в области электроники, высокочастотных систем, динамики пучков и др.

– в стране появились первые цифровые микросхемы. Пусть они были простейшие, гибридные, с незатейливыми возможностями. Но это уже была революция в электронике, открывались совершенно новые возможности;

– и, наконец, в подвале 1-го здания уже несколько лет успешно работала для сбора и обработки информации с детекторов ВЭПП-2 универсальная ЭВМ «МИНСК-22» с неплохими для того времени параметрами (50 000 операций в секунду и память 8К!).

Естественно, эти вычислительные ресурсы были применены и для создания первой системы автоматизированного управления. Для этого от вычислительной машины к пульта управления ВЭПП-3 был протянут 50-парный телефонный кабель длиной около 500 метров.

Пять адресных разрядов, 16 разрядов числа, бит знака и бит четности поступали на блок связи, который управлял как записью информации в регистры цифроаналоговых преобразователей, так и производил чтение этих регистров в ЭВМ. Значения кодов, записанные в цифроаналоговый преобразователь, индцировались на блоках индикации. Кроме того, управление от ЭВМ было полностью продублировано ручным – в то время трудно было даже представить другой вариант.

Следует отметить, что параметры впервые разработанных в Институте ЦАПов и сегодня выглядят прилично (16 разрядов + знак, погрешность – 0,005%).

Полностью система питания основного магнита и линз накопителя ВЭПП-3, управляемая от ЭВМ, заработала в 3-м квартале 1971 года. Результаты испытаний показали, что нестабильность тока основного магнита менее 0,01% за 8 часов, нестабильность тока квадрупольных линз менее 0,03%.

Одновременно выявились и многочисленные недостатки. Все блоки системы были связаны 50-парными параллельными линиями. Возможности расширения системы были явно проблематичными, поиск неисправностей весьма трудоемкий, да и помехоустойчивость оказалась неудовлетворительной. К тому же стало понятно, что делить единственную ЭВМ на столь разные задачи невозможно.

Полученный опыт позволил перейти к следующему этапу эволюции систем автоматического управления в ИЯФ – разработке системы последовательной связи с соответствующим набором связанного оборудования, когда к объекту (или группе объектов) для управления или измерения прокладывается не 50-парный кабель, а пара коаксиальных.

Стоимость системы, надежность и помехоустойчивость, возможности расширения и реконфигурации драматически изменились.

Кроме того, стало понятно, что крайне полезно, а часто и необходимо, контролировать с помощью ЭВМ не только устройства питания магнитных элементов ускорителя, но все остальное: форму быстрых импульсных сигналов, параметры пучка, уровень вакуума, температуру в напряженных местах, временные интервалы, уровни радиации и т.д.

*Поэтому было принято решение разработать функционально полный набор измерительных и управляющих устройств для автоматизации ускорительных и других физических установок Института.*



**Рис. 36.** Идеологи компьютерной автоматизации. На переднем плане слева направо: И.Я. Протопопов, В.И. Нифонтов, В.А. Сидоров в пультовой ВЭПП-4

При разработке системы управления ВЭПП-4, имеющей около двух тысяч каналов измерения и управления, были приняты следующие общие принципы:

1. Аппаратура должна обеспечивать управление и контроль за работой физических установок

только через ЭВМ. Дублирующее ручное управление значительно усложняет аппаратуру, резко падает надежность и помехоустойчивость. Да и зачастую оно бессмысленно – оператор не в состоянии проследить за десятками и сотнями быстро изменяющихся параметров.

2. Измерительные и управляющие системы должны иметь автономный рабочий цикл, т.е. иметь собственные устройства хранения информации, взаимодействуя с ЭВМ только при изменении управляющей информации или при необходимости использовать результаты измерений.

3. Имея конкретное назначение, зависящее от задачи, аппаратура должна иметь одинаковую (универсальную) схему хранения информации и взаимодействия с ЭВМ.

4. При большом периметре кольца ВЭПП-4 аппаратура управления и контроля должна разделяться на несколько независимых узлов, размещаемых в непосредственной близости от обслуживаемых устройств.

Благодаря фантастической энергии Э.И. Елинера была организована покупка машин серии ODRA, что позволило осуществить управление основными установками комплекса. На базе этого типа машин был создан вычислительный центр, в становление которого наиболее весомый вклад внесли Э.И. Елинер, Б.В. Левичев, И.Я. Протопопов, А.Д. Орешков, В.И. Кокоулин, С.Д. Белов. Вначале к новому ВЦ были подключены установки ВЭПП-3 и ГИРОКОН, а впоследствии по мере развития комплекса и другие установки: «Позитрон», ВЭПП-4, канал ВЭПП-3 – ВЭПП-4.

Оперативная память ЭВМ ODRA 1325, использовавшихся персонально для каждой из установок, составляла 16-32К 24-разрядных слов, внешняя память 256К слов, среднее быстродействие  $10^5$  оп/сек. В качестве центрального процессора использовалась ЭВМ ODRA 1305. И.Я. Протопоповым, Б.В. Левичевым и С.Д. Беловым для ЭВМ ODRA были



**Рис. 37.** Зал ЭВМ ODRA и создатель программного обеспечения для них Б.В. Левичев

разработаны многозадачная операционная система VGJP и средства для создания программного обеспечения для управления: язык программирования TRAN и система компиляции. Для подсоединения электроники к ЭВМ В.И. Нифонтовым и его командой была разработана последовательная многоуровневая система связи с коммутирующими магистральными станциями, позволившая разместить аналоговую и цифровую электронику в непосредственной близости от управляемых устройств. В короткое время был создан широкий спектр периферийных устройств: прецизионные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи с погрешностью до 0,001% (Э.А. Купер, А.В. Леденев, Ю.И. Голубенко, А.В. Смирнов, Ю.В. Заруднев, В.К. Овчар), семейство цифровых регистраторов формы импульсных сигналов, в том числе и в наносекундном диапазоне (А.М. Батраков, В.Р. Козак, А.В. Нифонтов, А.А. Шейнгезихт), преобразователи код-временной интервал, коммутирующие регистры, датчики состояний, буферные запоминающие устройства и многое другое, причем в соответствии с задачами управления и контроля этот набор непрерывно пополнялся.

Интенсивное развитие технических и программных средств, используемых для управления физической установкой, определило и новый качественный уровень в разработке устройств взаимодействия оператора с оборудованием установки. Пультовая ВЭПП-4 была освобождена от большого числа измерительных и регистрирующих приборов. Вся необходимая информация в удобном для восприятия виде была выведена на буквенно-цифровые и цветные графические дисплеи (В.В. Репков, Г.С. Пискунов).

Все это позволяло осуществлять контроль и управление постоянными и импульсными магнитными элементами, высокочастотной системой, контролировать температуру в разных системах, вакуум, измерять ток пучка и его положение, обеспечивать синхронизацию работы элементов и т.д.

На начальном этапе вся электроника была разработана в стандарте «ВИШНЯ». В конце 70-х годов в системах управления начал внедряться магистрально-модульный стандарт КАМАК, позволяющий интегрировать в одном крейте блоки различного назначения, появилась возможность формировать локальные многофункциональные управляющие и измерительные системы. Это, в свою очередь, потребовало создания интеллектуального крейт-контроллера. После ряда итераций в качестве такого контроллера было решено разработать миникомпьютер с системой команд машин ODRA-1300.

В 1982–1983 гг. такая ЭВМ, получившая название «Одренок», была создана. Его создатели Г.С. Пискунов и С.В. Тарарышкин работали в тесном контакте с С.Д. Беловым и А.Н. Алешаевым, обеспечившими программную поддержку и разработку операционной системы ОДОС, которая обеспечивала как универсальные, так и специфичные для управления функции (ряд механизмов межпроцессного взаимодействия, спецрежимы для программ, синхронизация процессов с работой подсистем комплекса и т.п.).

«Одренок» имел следующие параметры: 24-разрядное слово, универсальная система команд, 32-256 килослов оперативной памяти, производительность примерно эквивалентна IBM PC-286. (В дальнейших модификациях производительность «Одренка» достигла производительности БЭСМ-6).

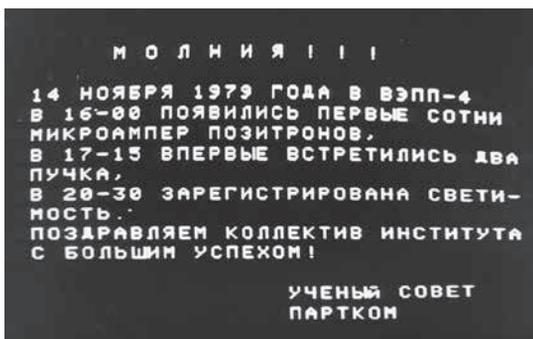
Достаточно высокая надежность и сравнительная простота эксплуатации «Одренка» с ОДОС, включение в нее поддержки работы с жесткими дисками, а также создание удобных средств для разработки программ привели, в конечном счете, на установках комплекса ВЭПП-4 к полной замене машин ODRA-1300 «Одрятами».

Все программное обеспечение для управления было создано силами сотрудников, работавших на комплексе: физиками и инженерами. Люди, ставившие перед собой задачи управления и понимавшие суть работы всех видов устройств и электроники, в те годы сумели заложить принципы, которые до сих пор используются в современных системах, например, разделение управляющих программ на серверные и клиентские. Следование этим принципам позволило построить эффективную гибкую систему, которая в дальнейшем рекордно долгий срок (почти 40 лет!), претерпевая постепенную эволюцию, обеспечивала и обеспечивает бесперебойную работу ускорителей комплекса ВЭПП-4. На начальном этапе решающий вклад в развитие идей построения программного обеспечения и их реализацию внесли И.Я. Протопопов, Ю.И. Эйдельман, Н.А. Мезенцев, А.А. Жоленец, С.И. Мишнев и другие физики-ускорительщики.

## 5. ЗАПУСК КОМПЛЕКСА. СВЕТИМОСТЬ

Первый позитронный пучок в ВЭПП-4 был получен в июле 1979 года, эксперименты с двумя пучками были начаты в ноябре того же года.

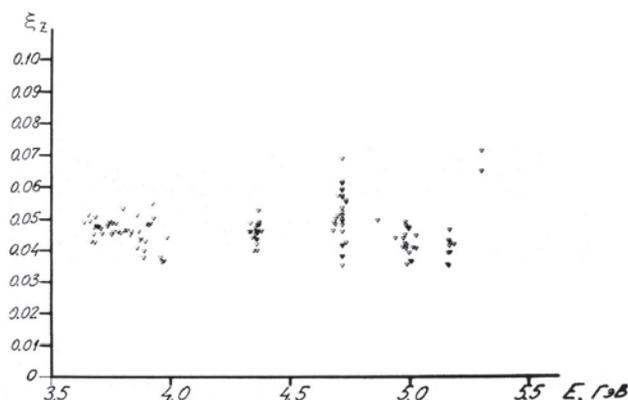
В процессе исследования магнитной структуры кольца ВЭПП-4 выявились сильные нелинейные эффекты: нелинейный хроматизм частот бетатронных колебаний и дисперсионной функции, нелинейная зависи-



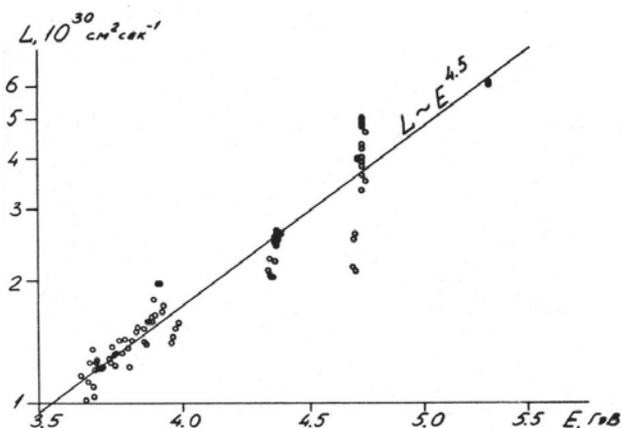
**Рис. 38.** Поздравление от руководства института

мость декрементов затухания от частоты обращения. Для изучения этого явления были проведены соответствующие исследования и найдены способы уменьшения этих нежелательных эффектов [46]. Для этого были приняты меры по уменьшению биений  $\beta$ -функции и подбору силы секступольных линз с целью подавления резонансных гармоник. Были проведены эксперименты по компенсации линейной связи бетатронных колебаний и подавлению вертикальной энергетической дисперсии. Важную роль сыграл ранее полученный опыт на установке ВЭПП-2М по правильному выбору бетатронных частот в режиме встречи пучков. В отличие от ВЭПП-2М на ВЭПП-4 было только одно место встречи, поэтому бетатронные частоты были выбраны чуть выше полуцелых значений. Уточнение оптимального значения частот проводилось посредством сканирования рабочей области. При токах, близких к предельным в определённой области частот, наблюдался так называемый floor-floer эффект, математическую интерпретацию дал А.Б. Темных [47].

Изучение эффектов встречи и основная работа по увеличению светимости проводилась в диапазоне энергий 3,5–5,3 ГэВ при работе в основном месте встречи с детектором МД-1, когда велись эксперименты с  $Y$ ,  $Y'$ ,  $Y''$ -мезонами. Исследовалось влияние различных факторов (бетатронные частоты, связь, кубичная нелинейность, малое разведение орбит в месте встречи и др.), влияющих на светимость и время жизни пучков. Как упоминалось выше, основное увеличение светимости было получено за счет уменьшения вертикальной  $\beta$ -функции до 12 см при гибкой перестройке оптики экспериментального промежутка после накопления и ускорения до задан-



**Рис. 39.** Зависимость параметра пространственного заряда  $\xi_z$  от энергии



**Рис. 40.** Светимость в зависимости от энергии

ной энергии. Естественно, орбиты пучков в месте встречи в процессе ускорения и перестройки разведены. Ограничение светимости определялось вертикальным параметром пространственного заряда  $\xi_z$ , величина которого оказалась рекордной по сравнению с другими установками и достигала 0,06 (рис. 39).

Зависимость светимости от энергии приведена на рис. 40. Эксперименты по изучению эффектов встречи описаны в диссертации А.Б. Тёмных [47].

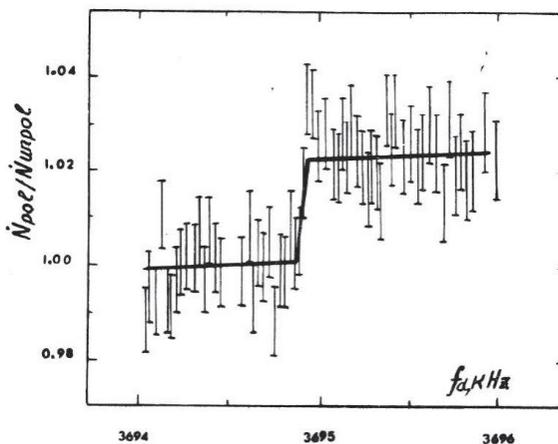
## 6. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### 6.1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ ОЛЯ

В связи с задержкой в подготовке детектора МД-1 первые эксперименты были выполнены с детектором ОЛЯ, завершившим свою работу на установке ВЭПП-2М. Детектор ОЛЯ состоял из четырех одинаковых квадрантов, охватывающих место встречи пучков. В квадрантах были поставлены сцинтилляционные счетчики и проволочные координатные камеры. Управление режимом работы детектора, сбор, контроль и первичную обработку информации проводил мини-компьютер М-6000, связанный с ЭВМ «Минск -32».

Детектор был установлен в боковое место встречи С, где была меньшая по сравнению с центральным местом А вертикальная бета-функция (Оптика 2, см. рис. 15). В марте–апреле 1980 года с детектором ОЛЯ были проведены прецизионные измерения масс  $J/\psi$ - и  $\psi'$ -мезонов [48]. Для этих измерений энергии был использован разработанный в ИЯФ метод резонансной деполяризации. Поляризованные пучки создавались в бустерном кольце ВЭПП-3 за счет эффекта радиационной поляризации. Время поляризации составляло 1–3 часа, после чего пучок переводился в кольцо ВЭПП-4. Для измерения поляризации использовался эффект внутреннего рассеяния, сечение которого зависит от поляризации пучка. Для регистрации выпадающих попарно из процесса ускорения частиц в камере на внутреннем и наружном радиусе были установлены сцинтилляционные счетчики, включенные на совпадения. Изменение скорости счета рассеянных при деполяризации электронов не превышало двух процентов. С этим относительно небольшим изменением непросто было работать на фоне нестабильностей, связанных прежде всего с размерами пучка и положением равновесной орбиты, влияющих на

скорость счета. С целью устранения этой проблемы было предложено работать с двумя сгустками, поляризованным и неполяризованным. При нормировке скорости счета от поляризованного пучка на скорость счета от неполяризованного при равном числе частиц удавалось избежать указанных выше нестабильностей. Типичная картинка изменения нормированной скорости счета при сканировании частотой деполяризатора приведена на рис. 41.



**Рис. 41.** Зависимость отношения скоростей счета электронов, выходящих из-за эффекта ЭВР из поляризованного и неполяризованного сгустков, от частоты деполяризатора. Частота, соответствующая середине «ступеньки», равна частоте прецессии спина электронов

Положение скачка скорости счета позволяет определить частоту прецессии спина и, соответственно, энергию частиц.

В режиме набора статистики при измерении масс пси-мезонов светимость составляла  $(2-4) \times 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Эксперименты были проведены в течение марта–апреля 1980 года. В результате удалось более чем на порядок улучшить точность определения масс пси-мезонов по сравнению с табличными данными. Полученные значения позволили также уточнить путем пересчета значения масс  $D^+$ ,  $D^-$  и  $D^0$  – мезонов.

После окончания измерений с детектором ОЛЯ был проведен эксперимент по изучению спектра и сечения однократного тормозного излучения на встречном пучке. Было обнаружено примерно 20-процентное уменьшение сечения, связанное с ограничением прицельных параметров поперечным размером сгустка [49]. За эту работу Ю.А. Тихонову была присуждена золотая медаль АН СССР для молодых учёных (1984 г.).

## 6.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ МД-1

*(Подробное описание детектора и поставленных на нем экспериментов, изложенное В.И. Тельновым, приведено ниже в главе «Детектор МД-1»).*

Магнитная система детектора весом около 500 тонн была изготовлена в Новосибирске: магнитопровод на заводе им. Кузьмина, катушки на опытном заводе СО АН СССР. Детектор был смонтирован и налажен вне экспериментального промежутка за временной защитной стеной, и в августе 1980 г. по специальным рельсам его вкатили в промежуток. Однако первые эксперименты были поставлены только через два года.

Эта задержка была связана с рядом крупных аварий. Катушки детектора МД-1, изготовленные на опытном заводе СО РАН, оказались ненадежными, и потребовалось значительное время для их ремонта и устранения дефектов. Произошла крупная авария с ГИРОКОНОМ, точнее с его источником питания ИСУ. На недостаточном уровне оказалась надежность и ряда других установок и систем комплекса ВЭПП-4. Кроме того, быстрое и успешное проведение первых экспериментов по измерению масс пси-мезонов несколько расслабило участников проекта. Дела пошли не так быстро, как планировалось. Прошел год, наступило лето 1981 г., а эксперименты так и не начались. Ситуация требовала принятия чрезвычайных мер. Именно тогда по инициативе ответственного за детектор МД-1 А.П. Онучина был подготовлен и подписан директором ИЯФ А.Н. Скринским приказ № 393 «О состоянии дел и организационных мероприятиях на комплексе ВЭПП-4» от 30 сентября 1981 г. Вот некоторые фрагменты из этого приказа.

*«...Запланированные параметры ВЭПП-4 пока не достигнуты... Низка надежность и стабильность работы... Ввод комплекса на систематическую работу недопустимо затянулся... Причины неудовлетворительного состояния дел на ВЭПП-4 носят как технический, так и организационный характер. Многие системы и устройства комплекса являются уникальными разработками, выполненными на пределе современных технологий... Одновременное функционирование всех установок комплекса без поломок и сбоев требует высокой надежности, значительно выше ранее достигнутой в институте. ...При производстве катушек МД-1 на опытном заводе СО РАН из-за недостаточного контроля со стороны КО и лаб. № 3 был допущен брак. ...Из-за необеспеченности контроля на установке гироконов произошла авария, что задержало начало работ на высокой энергии. ...Руководителями лаб. 1-3, 1-4, 6, гр.1-13 и ОГЭ не была организована четкая структура ответственности и т. д. Главной задачей на 1981-1982 гг. является получение светимости  $10^{30} \text{ см}^2 \text{ сек}^{-1}$  при энергии  $2 \times 5 \text{ ГэВ}$  и доведении времени работы до 3000 часов в год... Приказываю: ...Организационно разбить комплекс на 5 установок с назначением ответственных за установки:*

<i>Позитронный инжектор</i>	<i>Петров В.В.</i>
<i>ВЭПП-3</i>	<i>Мишнев С.И.</i>
<i>ВЭПП-4</i>	<i>Протопопов И.Я.</i>
	<i>Жоленц А.А.</i>
<i>Гироконов</i>	<i>Шехтман И.А.</i>
<i>МД-1</i>	<i>Онучин А.П.</i>

*Руководителям лаб. 1-3, 1-4, 6, гр. 1-13, ВЦ и ОГЭ установить персональную ответственность за работу каждого устройства, комплекса и т.д. ...Общее руководство комплексом осуществляет Г.М. Тумайкин...».*

На комплексе это называли, по аналогии с событиями после революции 1917 года, «введением режима военного коммунизма». Но на самом деле, ситуация резко изменилась, руководителями всех подразделений

сразу были приняты соответствующие меры, что в последующем существенно отразилось на работе установок. Приказ действительно помог сконцентрировать усилия коллектива всех подразделений, участвовавших в создании комплекса, повысить ответственность разработчиков и ускорить начало экспериментов. **Надёжность работы комплекса постепенно росла, и, к примеру, во втором квартале 1984 года комплекс проработал на эксперименты 1940 часов из календарных 2184 часов, а время простоев составило 17 часов!!!**

Задачей первых экспериментов на высокой энергии было прецизионное измерение массы  $\Upsilon$ -мезонов.

**Рис. 42.** Совещание ответственных за установки. Слева направо: Г.М. Тумайкин, В.В. Петров, И.Я. Протопопов, А.А. Жоленц, А.П. Онучин, Ю.И. Эйдельман (отв. за автоматизацию). Нет на фото С.И. Мишнева (фотографирует) и И.А. Шехтмана



### 6.2.1. ПОЛЯРИМЕТРЫ. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Для прецизионного измерения энергии в области  $\Upsilon$ -мезонов также использовался метод резонансной деполяризации. Измерение поляризации с использованием эффекта внутреннего рассеяния из-за малого сечения здесь не проходило, поэтому был использован другой метод, основанный на асимметрии обратного комптоновского рассеяния фотонов на встречном поляризованном пучке. Первоначально эта идея была высказана В.Н. Байером [50]. Суть этой идеи заключается в том, что циркулярно-поляризованные фотоны при рассеянии назад на поперечно-поляризованных электронах (позитронах) дают в угловом распределении верх-низ асимметрию, изменяющую знак в зависимости от направления поляризации. В качестве источника циркулярно-поляризованных предлагалось использовать лазер.

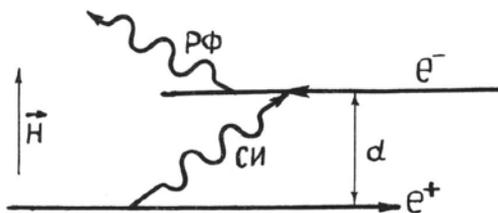
В мае 1982 г. были введены в действие поляриметры для измерения поляризации на высокой энергии ВЭПП-4. Было разработано 2 поляриметра. В первом в качестве источника фотонов использовался импульсный твердотельный YAG лазер ЛТИ-502 с удвоением частоты излучения в монокристалле йодата лития. Это устройство генерировало на длине

волны 5300 ангстрем (2,26 эВ) мощность 3,5 Вт с частотой повторения до 20 кГц и длительностью 200 нсек. Лазерный свет фокусировался в область места встречи с электронным пучком. Обратные рассеянные гамма-кванты регистрировались с помощью конвертора и индукционной пропорциональной камеры с разрешением 200 мкм. Измеряемым параметром поляризации являлась величина асимметрии вертикального распределения комптоновских фотонов относительно плоскости орбиты. Так как знак асимметрии зависит от направления круговой поляризации, то в эксперименте для наблюдения поляризации пучка использовалось попеременное переключение круговой поляризации лазерного пучка посредством ячейки Погкельса. Это позволяло избежать нестабильностей, связанных с дрейфом орбиты и, соответственно, положением комптоновских фотонов на детекторе, так как наблюдалась разница в вертикальном положении центра отраженных гамма-квантов при изменении знака круговой поляризации падающего пучка. Величина асимметрии при наблюдаемой поляризации пучка (>60%) была около 1,3%. Установка с лёгкой руки своего создателя Г.Я. Кезерашвили получила название РОКК (рассеянные обратно комптоновские кванты) и была размещена в радиационно-защищённом блоке на выходе из южного полукольца в экспериментальный проем [51].

Создание лазерной системы для измерения поляризации послужило базой для постановки в последующем экспериментов по ядерной физике с использованием квазимонохроматических комптоновских фотонов [52 и др.].

Во втором поляриметре [53], предложенном Ю.А. Тихоновым, источником циркулярно-поляризованных фотонов было синхротронное излучение от встречного пучка. Как известно, синхротронное излучение поляризовано, и его поляризация зависит от направления излучения фотонов: в плоскости движения электронов они линейно поляризованы, а вне плоскости орбиты имеют циркулярную поляризацию с разными знаками над и под орбитой. Для измерения поляризации пучки электронов и позитронов в детекторе МД-1 были разведены по вертикали электростатическим бампом на величину в несколько вертикальных размеров пучков, что обеспечивало использование циркулярной поляризации пучка фотонов с энергией около 25 эВ при взаимодействии со встречным пучком (рис. 43).

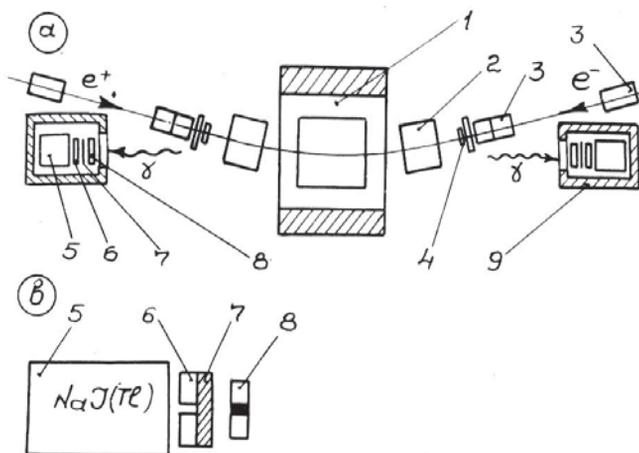
Большая по сравнению с лазером энергия фотонов в 2–3 раза увеличивала величину асимметрии. Однако здесь не было возможности,



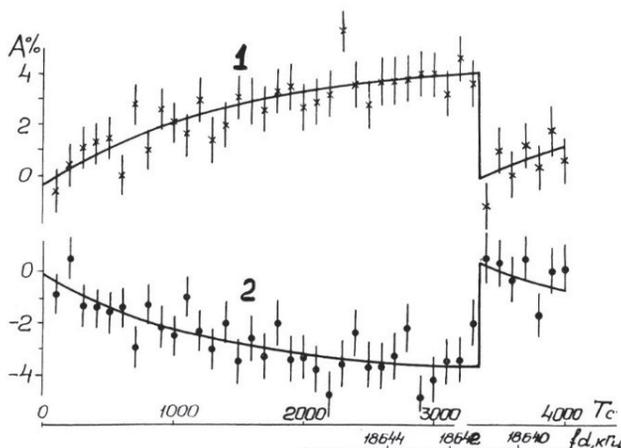
**Рис. 43.** Расположение пучков частиц и фотонов: СИ – фотоны синхротронного излучения; РФ – рассеянные фотоны;  $d$  – величина разведения пучков в вертикальной плоскости. Вектор магнитного поля лежит в плоскости рисунка

как в лазерном поляриметре, менять направление циркулярной поляризации и таким образом компенсировать асимметрию, связанную с уходом орбиты. Поэтому, чтобы исключить влияние уходов орбиты и, соответственно, появление «ложной» асимметрии рассеянных гамма-квантов, была организована система стабилизации положения орбиты в области взаимодействия пучков с помощью системы обратной связи. Для этого перед детектором комптоновских гамма-квантов был установлен монитор из двоянных ионизационных камер, «прозрачный» для комптоновских фотонов и регистрирующий положение центра пучка синхротронного излучения, излучаемого из области взаимодействия. Система обратной связи с помощью нескольких корректоров поддерживала неизменным положение центра тяжести пучка СИ, в то время как центр тяжести пучка обратно-рассеянных комптоновских квантов в зависимости от поляризации сдвигался по вертикали. Схема поляриметра и его размещения приведена на рис. 44. Поляриметр позволял одновременно наблюдать поляризацию электронов и позитронов (рис. 45).

**Рис. 44.** Аппаратура для измерения поляризации пучков (а – вид сверху, б – сечение вертикальной плоскостью):  
 1 – центральная часть детектора МД-1,  
 2 – доворотные магниты,  
 3 – линзы,  
 4 – счетчики измерения светимости по рассеянию на малые углы,  
 5 – счетчики для измерения энергии рассеянных фотонов,  
 6 – счетчики для измерения асимметрии «верх-низ»,  
 7 – конвертор,  
 8 – двоянные ионизационные камеры,  
 9 – свинцовая защита



**Рис. 45.** Результат измерения поляризации пучков:  
 1 – рассеяние СИ на пучке электронов,  
 2 – рассеяние СИ на пучке позитронов; нижняя шкала – частота деполаризации  $f_d$ .  
 Токи пучков:  $I^- = 2,4$  мА,  
 $I^+ = 2,3$  мА



Поляриметр, основанный на использовании СИ от встречного пучка и измеряющий поляризацию электронов и позитронов, оказался более удобным для прецизионной калибровки энергии при измерении масс ипсилон-мезонов, о чем будет сказано ниже. Лазерный поляриметр после измерения массы первого  $\Upsilon'$ -мезона в последующем был использован для изучения поляризации и, в первую очередь, спиновых резонансов.

### 6.2.2. ИЗМЕРЕНИЕ МАСС ИПСИЛОН-МЕЗОНОВ

Весной 1982 года началась работа по подготовке измерения массы ипсилон-мезона детектором МД-1. Как и в измерениях масс  $\varphi$ -,  $\psi$ - и  $\psi'$ -мезонов, абсолютная калибровка энергии производилась методом резонансной деполяризации пучка. В начале работы равновесная степень радиационной поляризации пучков в кольце ВЭПП-4 была невысока – не более 30%. Численный анализ возможных деполяризующих факторов в магнитной системе накопителе, проведенный С.А. Никитиным [54] показал, что применяемая система компенсации разностного резонанса связи бетатронных колебаний, состоящая из нескольких сосредоточенных skew-линз, вносит заметное возмущение в спиновое движение, которое в сочетании с имеющимися вертикальными искажениями орбиты приводит к значительному снижению степени поляризации. Было предложено заменить данную систему коррекции связи более слабой по влиянию на спин системой, состоящей из обмоток в элементах периодичности полуколец с одинаковым заданием во всех элементах периодичности радиального градиента радиального магнитного поля на уровне  $\sim 1$  Гс/см. Как показал эксперимент, такая система полностью компенсировала резонанс связи. Это позволило сделать вывод, что коррекция выполнена практически по месту положения источников соответствующих возмущений, в качестве которых можно предложить токовые шины, соединяющие магниты полуколец и проходящие близко к вакуумной камере. Через 15 лет похожий способ компенсации связи был успешно применен при настройке режимов коллайдера ВЭПП-4М, что говорит в пользу данного объяснения, поскольку модернизированные полукольца состоят из ячеек периодичности ускорителя предыдущей версии.

В результате перехода на альтернативную коррекцию связи колебаний наблюдаемая равновесная степень радиационной поляризации выросла до значений 70% и более, что повысило надежность абсолютных калибровок энергии, точность которых достигла 0,1 МэВ. Это дало возможность начать измерения массы  $\Upsilon'$ -мезона. Эксперимент вызвал большой интерес мировой общественности, о чём говорит приведенная ниже заметка из CERN COURIER.

Точность определения массы частицы была улучшена на порядок (1982 г.). В последующих экспериментах, выполненных в 1983 и 1984 годах, было достигнуто ещё 5-кратное улучшение точности.

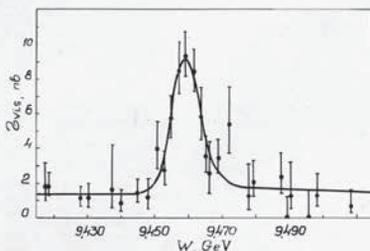
В течение 1982-1985 гг. было выполнено несколько циклов сканирования  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$ ,  $\Upsilon''$  – мезонов. Измерения в области  $\Upsilon'$  и  $\Upsilon''$  – мезонов проводились следующим образом. После подъёма энергии до нужного

## NOVOSIBIRSK Upsilon measurements

A systematic study has been started at the VEPP-4 electron-positron storage ring (see October 1980 issue, page 297) within the energy range of the Upsilon resonances, using the MD-1 detector with a magnetic field perpendicular to the orbit plane. The precise measurement of particle masses was the first in this new range of energies. Just as in the previous measurements of the masses of the phi, psi and psi prime mesons, the absolute calibration of the energy of the storage ring was carried out by the method of resonance beam depolarization.

The polarization level was measured with a laser polarimeter and by the new method which uses, instead of laser photons, more energetic photons of synchrotron radiation from the opposite beam. During the initial studies, the level of equilibrium polarization of particles in the storage ring was no more than 30 per cent. After the compensation of the weak skew-quadrupole field in the storage ring cell, it was increased to 80 per cent. This enabled the beam depolarization to be observed reli-

325



ably and the absolute energy of the beam to be measured with an accuracy of 0.1 MeV.

After scanning the Upsilon region with accurate measurement of the energy of the beams at every point, the meson mass was obtained as  $9459.7 \pm 0.6$  MeV, and the precision of this mass measurement was thus improved by one order of magnitude.

The studies were performed with

the optical scheme of the experimental straight section with a vertical beta-function of 45 cm at the collision point. In this case, the peak luminosity was  $0.8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  with 6 mA currents in each beam.

Upon completion of the experiment, the smooth variation of the experimental straight section optics with the coasting beams in the storage ring enabled the beta-function at the collision point to be decreased

The scan of the Upsilon energy region with the VEPP-4 electron-positron ring at Novosibirsk, using the resonance beam depolarization method. This gives a firm value for the ground state Upsilon meson mass and makes the whole of Upsilon spectroscopy more explicit.

down to 20 cm. With the same beam currents, this made it possible to increase the peak luminosity to  $1.5 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . A further increase of luminosity awaits higher beam currents. A similar method for accurate determination of energies has been developed at PETRA, and will be described in a forthcoming article.

значения в течение (0,5 – 1) часа происходила радиационная поляризация электронов и позитронов, затем проводилась калибровка энергии и начинался набор статистики. В следующем цикле калибровка энергии проводилась после набора статистики. Так же периодически менялось направление сканирования частотой деполяризатора. Все это позволяло уменьшить величину систематических ошибок. Калибровка энергии, как правило, проводилась при степени поляризации 0,2–0,5.

В области энергии  $\Upsilon$ -мезона степень поляризации из-за близости к деполяризующему резонансу была мала. Это исключало возможность калибровки энергии в точках измерения. Поэтому калибровка проводилась в точках, лежащих выше и ниже резонанса, где степень поляризации достаточна для калибровки, а энергия в точке набора статистики находилась экстраполяцией по величине магнитного поля.

Использовалась следующая схема постановки эксперимента. После инжекции энергия поднималась до калибровочной точки, где производилась калибровка, затем энергия поднималась до точки измерения, где шел набор статистики. Дальше энергия ещё раз увеличивалась до фиксированной точки, расположенной далеко от резонанса, и после калибровки опускалась до уровня инжекции. В таком режиме была набрана половина статистики. Вторая половина статистики была набрана в других условиях работы накопителя. В этом случае после инжекции энергия сначала поднималась до максимальной фиксированной точки, затем опускалась в точку измерения, набиралась статистика, после чего энергия опускалась примерно на 60 МэВ в точку калибровки и проводилась калибровка энергии. Естественно, что калибровочная кривая зависимости энергии от магнитного поля, измеренная в этом режиме накопителя, отличалась от первой калибровочной кривой. Во всех случаях привязка энергии к магнитному полю осуществлялась с использованием датчиков ЯМР. Разность полученных результатов, связанных с изменением условий эксперимента, не превышала 0,2 МэВ.

При обработке результатов измерения масс  $\Upsilon$ -мезонов был проведен анализ систематических ошибок, связанных с детектором и коллайдером, и были внесены соответствующие поправки, связанные с хроматизмом бета-функции и энергетическим разбросом. В итоге точность измерения массы  $\Upsilon$ -мезона улучшена почти на 2 порядка, а  $\Upsilon'$ - и  $\Upsilon''$ -мезонов в 20 раз [55].



**Рис. 46.** 30 апреля 1982 г. Празднование первого наблюдения  $\Upsilon$ -мезона. **Первый ряд:** В.А. Ведерников, А.Б. Тёмных, О.П. Гордеев, М.Ю. Фомин, А.И. Шушаро, С.А. Никитин, Ю.А. Тихонов, А.А. Жолец, В.И. Тельнов, А.П. Онучин, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский, В.А. Сидоров, А.И. Воробьев, Ю.И. Эйдельман, Б.И. Гришанов. **Второй ряд:** С.Д. Белов, Ю.Г. Матвеев, А.Е. Блинов, Г.А. Савинов, С.В. Филимонов, А.П. Харченков. **Третий ряд:** А.А. Казаков, А.Н. Алешаев, А.С. Артамонов, М.В. Юрков

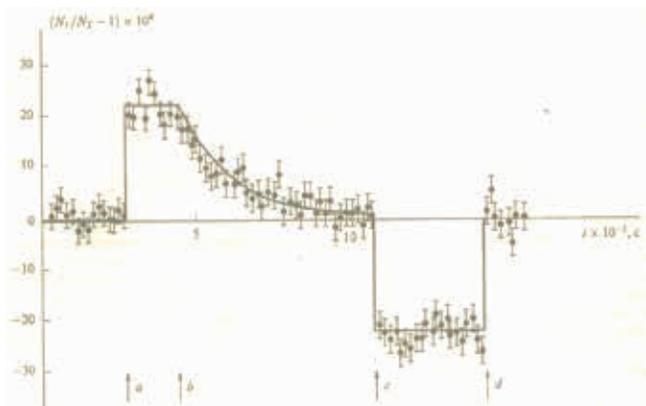
## 7. «СПИНОВЫЙ» СВЕТ НА ВЭПП-4

Здесь мы остановимся на интересном явлении, связанном с синхротронным излучением поляризованного пучка и пригодным для измерения поляризации. Наличие у классической заряженной частицы, движущейся по искривленной траектории, собственного магнитного момента дает дополнительное излучение. Его интерференция с обычным синхротронным излучением ускоренного заряда приводит в выражении для интенсивности к линейно зависящей от спина добавке, которая в статье в УФН за 1995 г. В.А. Бордовицина, И.М. Тернова и В.Г. Багрова была красиво названа «спиновым светом». Поляризованный естественным образом (за счет радиационного механизма Соколова-Тернова) пучок электронов (позитронов) в накопителе будет излучать больше, чем неполяризованный пучок. Впервые эта добавка была рассчитана в работе И.М. Тернова, В.Г. Багрова и Р.А. Рзаева (1964 г.)

для случая однородного магнитного поля. Дальнейшее изучение этого явления было проведено теоретиками В.Н. Байером, В.М. Катковым, В.М. Страховенко (1971 г.) и несколько позднее (1973 г.) Я.С. Дербеневым и А.М. Кондратенко. Трудность наблюдения этого эффекта была связана с его малой величиной, величина добавки в интенсивности СИ составляла для энергии ВЭПП-4 ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$ ). Конкретная схема эксперимента была предложена А.Е. Бондарем и Е.Л. Салдыным [56].

Для этого на ВЭПП-4 была установлена специальная трехполюсная магнитная змейка с полем 2,1 Тл в центральном магните и относительно слабым полем в крайних магнитах при нулевом интеграле поля. Энергия регистрируемых фотонов СИ из змейки составляла порядка 250 кэВ, что в 7–8 раз превышало характерную энергию в спектре излучения из поворотных магнитов кольца при энергии пучка 4,9 ГэВ, выбранной для постановки эксперимента. Детектором служил сцинтилляционный счетчик, просматриваемый спектрометрическим ФЭУ. В силу малой величины эффекта его измерение проводилось по оригинальной компенсационной методике. Сравнивались скорости регистрации фотонов СИ от двух позитронных сгустков равной интенсивности до деполяризации и после деполяризации одного из них. Для увеличения чувствительности к малой разнице в числе фотонов сигналы ФЭУ с узким амплитудным спектром (ширина спектра определяется числом фотонов) подавались на пороговый дискриминатор. Вероятность срабатывания дискриминатора наиболее сильно зависит от амплитуды сигнала с ФЭУ при значении этой вероятности 1/2. Оптимальной настройкой порога дискриминатора достигался максимальный (на уровне 70) коэффициент усиления, связывающий относительные приращения амплитуды и частоты срабатывания. Для деполяризации использовался селективный деполяризатор с поперечным переменным электромагнитным полем, частота которого настраивалась на частоту спинового резонанса. Вначале до появления поляризации токи сгустков выравнивались по относительной скорости счёта фотонов СИ из змейки N1/N2-1 с точностью лучше  $10^{-4}$ . По завершении процесса радиационной поляризации один из сгустков подвергался резонансной деполяризации, что дает скачок в относительной скорости счета. В эксперименте, отраженном на рис. 47, показано изменение относительной скорости счета при последовательных манипуляциях с включением селективного деполяризатора. Величина деполяризационных скачков на порядок превышала статистическую ошибку. Величина скачков согласовывалась с расчетной при полученной из этих измерений степени поляризации порядка 70%. Тем самым дан положительный ответ на считавшийся ранее дискуссионным вопрос, освещенный в статье Паули 1930 года, о самой возможности постановки опытов по изучению спиновых свойств свободных (не связанных в атоме) электронов, в частности, при их движении в макроскопическом магнитном поле. Именно так оценили результаты эксперимента на ВЭПП-4 И.М. Тернов и В.В. Михайлин в своей книге «Синхротронное излучение. Теория и эксперимент», а также авторы упомянутой выше статьи в УФН. На ВЭПП-4 экспериментально было показано, что наблюдение спиновой

зависимости интенсивности СИ является эффективным способом измерения степени поляризации в электрон-позитронных накопителях. Описанный выше пионерский эксперимент [57] войдет (вошел) в классику фундаментальной физики.



**Рис. 47.** Результат наблюдения спиновой зависимости СИ на ВЭПП-4 ( $E=4.9$  ГэВ). К моменту а оба сгустка поляризованы. Интервал а-в – включена деполяризация 2-го сгустка, в-с – деполяризатор выключен и идет поляризация 2-го сгустка, с-д – включена деполяризация 1-го сгустка, д – включена деполяризация 2-го сгустка

С использованием нового метода поставлен эксперимент по изучению резонансной спиновой диффузии, в котором впервые был измерен сильно меняющийся с азимутом в накопителе с жесткой фокусировкой фактор спинового отклика, известный до этого только в теории [54]. Этот фактор характеризует усиление/ослабление/ деполяризующего влияния локального поперечного возмущения ведущего поля за счет вызываемых им вертикальных искажений траектории частиц по всему кольцу накопителя и может изменяться от азимута к азимуту более чем на порядок. Знание фактора спинового отклика важно, например, для точного применения метода резонансной деполяризации. Полученный опыт оказался ценным для будущих прецизионных измерений масс на ВЭПП-4М с детектором КЕДР с повышенными требованиями к надежности абсолютной калибровки энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка ВЭПП-4 потребовала решения широкого круга научных и технических проблем, которые способствовали значительному подъёму научно-технического потенциала ИЯФ и развитию его возможностей ставить эксперименты мирового уровня.

Кратко перечислим круг задач, которые были решены при сооружении комплекса ВЭПП-3 – ВЭПП-4.

1. Разработка и расчет оптических схем с жесткой фокусировкой.
2. Расчет, разработка и изготовление нового поколения магнитных элементов.
3. Создание новой методики магнитных измерений основанной на датчиках Холла.
4. Получение высокого вакуума в условиях мощного синхротронного излучения.

5. Разработка новой аналого-цифровой электроники и построение систем автоматизации, базирующихся на использовании только что появившихся ЭВМ.

6. Разработка широкого спектра систем постоянного и импульсного питания и стабилизации поля магнитных элементов.

7. Разработка программного обеспечения для управления работой комплекса.

8. Разработка мощных ВЧ систем: генераторов и резонаторов. Именно тогда Будкером был предложен новый тип генератора – гирокон, импульсный вариант которого в течение многих лет обеспечивал получение позитронов.

8. Геодезия. Большие размеры кольца и высокие требования на точность установки элементов накопительного кольца потребовали разработки новых методик и создания и приобретения соответствующей техники.

9. Разработка современных систем наблюдения и измерения параметров пучков и характеристик ускорителей, накопителей, каналов.

На ВЭПП-4 и ВЭПП-3 выполнена большая программа по ускорительной физике:

- Изучение эффектов встречи и нелинейных резонансов.
- Поляризационные эксперименты: разработка методов измерения поляризации, изучение и подавление спиновых резонансов, прецизионная калибровка энергии, единственное в мире наблюдение спинового света.

Параллельные работы:

- Ядерная физика на гамма-квантах обратного комптоновского рассеяния.
- Использование синхротронного излучения (ВЭПП-3, ВЭПП-4).
- Оптический клистрон (ВЭПП-3).
- Эксперименты с использованием внутренней мишени (установка ВЭПП-3).

С самого начала работы ВЭПП-4 экспериментаторы задумывались о возможностях дальнейшего развития комплекса. В первую очередь это касалось увеличения светимости, а также возможностей постановки оригинальных экспериментов. Ниже приводится список обсуждаемых идей, направленных на развитие экспериментальных возможностей.

1. Различные варианты многосгусткового режима с электростатическим разведением орбит в паразитных местах встречи. Малый акцептанс ВЭПП-4 и другие причины не позволили реализовать такую программу.

2. Малая альфа-функция. В полукольцах предлагалось сделать вставки с отрицательной пси-функцией, чтобы получить малый коэффициент пространственного уплотнения орбит и, соответственно, укоротить сгусток. Это давало возможность уменьшения бета-функции и повышения светимости [58].

3. Продольная поляризация на 2 и 5 ГэВ. Подготовлены физические проекты [59].

4. Монохроматизация энергии взаимодействия. Подготовлен физический проект с проработкой отдельных элементов [60].

Однако пожар 16 августа 1985 года не позволил реализовать ни одно из этих предложений.



**Рис. 48.** Пульта ВЭПП-4 после пожара

По итогам создания комплекса ВЭПП-4 и проведения на нём экспериментов около 30 сотрудников радиофизической и ускорительных лабораторий и 15 сотрудников физических лабораторий защитили кандидатские диссертации, 7 сотрудников радиофизической и ускорительных лабораторий и 5 физиков стали докторами наук (рис. 49). Эксперименты по прецизионному измерению масс элементарных частиц, выполненные на коллайдерах ВЭПП-2М и ВЭПП-4 были отмечены Государственной премией СССР за 1989 год. Награждено 12 человек (рис. 50).

Ускорительники + радисты		ВЭПП-4 - 20 ЛЕТ		Физики	
Кандидаты наук	Докторы наук	Гос. пр. СССР	Кандидаты наук	Докторы наук	
1. Алмазов	1. Курев	1. Куроптев	1. Тихонов	1. Бару	
2. Ананшин	2. Кудряшвили	2. Митин	2. Тихонов	2. Ауреманко	
3. Киселев	3. Зайцев	3. Митин	3. Волков	3. Букис	
4. Козарашвили	4. Шатунов	4. Пятков	4. Кудряшов	4. Тихонов	
5. Лунин	5. Неженко	5. Протопопов	5. Громов	5. Тихонов	
6. Левицкий	6. Митин	6. Садовничий	6. Тихонов		
7. Горюнов	7. Васерлиц	7. Садовничий	7. Давыдов		
8. Холкин		8. Тихонов	8. Анисин		
9. Голубев		9. Тихонов	9. Иванов		
10. Купер		10. Митин	10. Пашин		
11. Митин					
12. Садочников					
13. Тараторкин					
14. Зайцев					
15. Козак					
16. Бабрашов					
17. Куркин					
18. Пятков С.					
19. Бакарев					
20. Виноградов					
21. Голубев					
22. Шатунов С.					
23. Зайцев					
24. Никитин					
25. Козак					
26. Макаров					
27. Рабин					
28. Тихонов					

**Рис. 49.** Список (неполный) сотрудников, защитивших диссертации, и лауреатов Госпремии по экспериментам на ВЭПП-4 (фото с заседания Ускорительного Совета, июнь 1997 г.)



**Рис. 50.** Лауреаты Государственной премии СССР за 1989 год за прецизионное измерение масс элементарных частиц на установках ВЭПП-2М и ВЭПП-4. Слева направо: Г.М. Тумайкин, Ю.А. Тихонов, Л.М. Курдадзе, В.А. Сидоров, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский, Л.М. Барков, А.П. Онучин, В.В. Петров, С.И. Мишнев, Ю.М. Шатунов, В.П. Смахтин

## ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г.И., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Новосибирское электрон-позитронное кольцо на энергию 3,5 ГэВ. Труды VI Международной конференции по ускорителям. Кембридж, 1967 г.

2. Будкер Г.И., Кузнецов Н.А., Левичев Б.В., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Магнитная система накопителя ВЭПП-3. Труды Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, стр. 270-273, Москва, 1970.

3. Баклаков Б.А., Карлинер М.М., Левичев Б.В., Медведко А.С., Протопопов И.Я. Устройство для прецизионных измерений магнитного поля в электромагните накопителей. Труды Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, стр. 674-677, Москва, 1970.

4. Левичев Б.В., Медведко А.С., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Магнитные измерения на накопителе ВЭПП-3. Там же, стр. 648-650.

5. Протопопов И.Я. Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-3. Дисс. к.ф.-м. н., Новосибирск, 1970 г.

6. Баклаков Б.А., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М., Купер Э.А., Нифонтов В.И., Орешков А.Л., Ощепков Ю.И., Петров С.П., Протопопов И.Я. Система питания электромагнита и линз накопителя ВЭПП-3, управляемая с помощью ЭВМ. Труды 3 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 2, стр. 39-45. Изд. Наука, Москва, 1973.

7. Лившиц А.А. Электронный синхротрон на энергию 500 МэВ, дисс. к.т.н., ИЯФ, Новосибирск, 1970.

8. Яснов Г.И. Высоковольтные инжекторы сильноточных синхротронов. Диссертация на соиск. к.ф.-м. н., Новосибирск, 1973.

9. Всеволожская Т.А., Сильвестров Г.И., Скринский А.Н. Электронно-оптический канал накопителя ВЭПП-3. Труды Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц., т. 1, стр. 495-499. Москва, 1970 г.

10. Всеволожская Т.А. и др. Инжекция позитронов в накопитель ВЭПП-3. Препринт ИЯФ 76-94, Новосибирск, 1976.

11. Вещеревич В.Г., Горникер Э.И., Иощенко Н.Н., Карлинер М.М., Петров В.М., Петухов В.В., Седяров И.К., Таршиш М.Н., Шехтман И.А. Высокочастотная система электрон-позитронного накопительного кольца ВЭПП-3. Труды Второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 164-166. Изд. Наука, Москва, 1972.

12. Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Переведенцев Е.А., Перельройзен М.П., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Управление размером пучка в накопителе перестройкой фокусирующей системы. Труды Третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, стр. 324-327, Изд. Наука, Москва, 1973.

13. Корчуганов В.Н., Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Пиндюрин В.Ф., Скринский А.Н., Шеромов М.А., Хлестов В.Б. Метод оперативного измерения абсолютной энергии частиц в накопителе с использованием спектральных особенностей СИ. Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, стр. 266-269. Изд. Наука, Москва, 1977.

14. Винокуров Н.А., Корчуганов В.Н., Кулипанов Г.Н., Переведенцев Е.А., Салдин Е.Л., Скринский А.Н. Экспериментальное исследование динамики пучка при накоплении большого тока в накопителе ВЭПП-3. Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 2, стр. 16-23. Изд. Наука, Москва, 1977.

15. Винокуров Н.А., Корчуганов В.Н., Кулипанов Г.Н., Литвиненко В.Н., Переведенцев Е.А., Скринский А.Н. Синхробетатронные резонансы при нулевом хроматизме. Препринт ИЯФ 77-80, Новосибирск, 1977.

16. Вещеревич В.Г., Карлинер М.М., Кулипанов Г.Н., Седяров И.К., Петров В.М., Скринский А.Н., Шеромов М.А. Продольные эффекты при накоплении электронов в ВЭПП-3. Труды 3 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, стр. 397-402. Изд. Наука, Москва, 1973.

17. Барков Л.М., Барышев В.Б., Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Пиндюрин В.Ф., Скринский А.Н., Хорев В.М., Шеромов М.А. Сверхпроводящая «змейка» для накопителя ВЭПП-3 и ее влияние на движение частиц. Труды 6 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978, с. 267-271.

18. Барков Л.М., Золотарев М.С., Киселев В.А. Пакин, В.Н., Переведенцев Е.А., Скринский А.Н., Смахтин В.П., Хлестов В.Б., Шепеленко А.А. Выпуск и транспортировка электронов с энергией 1,3 ГэВ из накопителя ВЭПП-3. Труды 3 Всесоюзного совещания по ускорителям. т. 2, стр. 126-129. Изд. Наука, Москва, 1973.

19. Винокуров А.Н. и др. Генерация видимого и ультрафиолетового излучения в оптическом клистроне, установленном на накопителе ВЭПП-3. Препринт ИЯФ 89-118, Новосибирск, 1989 г.

20. Жоленц А.А., Протопопов И.Я. ОПТИ-оптимизирующая программа расчета каналов транспортировки и согласованных прямолинейных промежутков ускорителей заряженных частиц. Препринт ИЯФ 80-212.

21. Жоленц А.А., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Организация мест встречи пучков с малой  $\beta$ -функцией на накопителе ВЭПП-4. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Наука, 1977, т. 1, с. 270-272.

22. Протопопов И.Я. Состояние работ на установке ВЭПП-4. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Протвино, 1977, т. 1, с. 421-429.

23. Жоленц А.А. Организация мест встречи пучков и получение светимости на накопителе ВЭПП-Дисс. к.ф.-м.н. Новосибирск, 1983.

24. Воблый П.Д., Левичев Б.В., Протопопов И.Я. Магнитные измерения на накопителе ВАПП. Труды 3 Всесоюзного совещания по ускорителям. т. 2, стр. 87-90. Изд. Наука, Москва, 1973.

25. Баклаков Б.А., Веремченко В.Ф., Карлинер М.М., Любецкий С.З., Петров С.П., Попов В.Г., Рефес А.Е. Силовое питание элементов магнитной системы ВЭПП-4. Труды шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т. 1, стр. 185-190.

26. Петров С.П. Разработка тиристорных источников стабилизированного тока для питания магнитных элементов накопителей заряженных частиц. Дисс. к.т.н., Новосибирск, 1987 г.

27. Пупков Ю.А. Система прецизионной установки и контроля геометрических параметров ускорительных комплексов Института. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н., Новосибирск, 1983 г.

28. Анашин В.В. Разработка и запуск вакуумных систем ускорительно-накопительных комплексов ВЭПП-3, ВЭПП-4 и НАП-М ИЯФ. Дисс. к.т.н., Новосибирск, 1997.

29. Высокочастотная система электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4 на основе гирокона – мощного УКВ генератора с несгруппированным релятивистским пучком (Будкер Г.И., Гапонов В.А., Горникер Э.И., Карлинер М.М., Кузнецов Н.А., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Нехаев В.Е., Николаев В.С., Острейко Г.Н., Резаков А.М., Салимов Р.А., Сердобинцев Г.В., Серов А.Ф., Шехтман И.А., Эстрин Б.С.). Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, стр.284-287. Изд. Наука, Москва, 1977.

30. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-4 на энергию 5.3 ГэВ и ток  $2 \times 10$  мА. Арбузов В.С., Беломестных С.А., Вещеревич В.Г., Волков В.Н., Горникер Э.И., Карлинер М.М., Крутихин С.А., Куркин Г.Я., Лебедев Н.Н., Меджидзаде В.М., Невзоров Ю.С., Петров В.М., Пилан А.М., Седляров И.К., Харитонов Е.Н., Шехтман И.А. Труды 9 Всесоюзного совещания по ускорителям. Изд. Наука, Москва, 1985, т. 1. стр. 115-116.

31. Вещеревич В.Г. Многорезонаторные ускоряющие структуры электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск, 1978.

32. Горникер Э.И. Источники высокочастотного питания электрон-позитронных накопителей. Дисс. на соискание уч. ст. к.т.н., Новосибирск, 1984 г.

33. Шехтман И.А. Мощные высокочастотные системы электрон-позитронных накопителей. Дисс. на соискание уч. ст. д.т.н., Новосибирск.

34. Медведко А.С. Разработка и исследование автоматизированных систем измерения и коррекции равновесной орбиты пучка в накопителях заряженных частиц. Диссертация на соискание уч. ст. к. т. н. Новосибирск, 1978 г.

35. Дементьев Е.М., Зиневич Н.И., Калинин А.С., Купер Э.А., Медведко А.С. Измерение равновесной орбиты в электрон-позитронном накопителе ВЭПП-4. Труды 6 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, стр. 322-325. Дубна, 1979.

36. Калинин А.С. Диагностика пучков частиц с помощью электромагнитных датчиков в ускорительно-накопительных установках и электронно-оптических каналах. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. Новосибирск, 1985 г.

37. Баклаков Б.А., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М., Литвинов А.А., Петров С.П. Магнитомодуляционный измеритель тока пучка заряженных частиц. Препринт ИЯФ СО АН СССР 74-70, Новосибирск, 1974.

38. Зинин Э.И. Методы измерения параметров пучков в накопителях с использованием синхротронного излучения. Дисс. к.т.н., Новосибирск, 1984 г.

39. Нейфельд В.В., Петров В.В. Инжектор ПОЗИТРОН для ВЭПП-4, препринт ИЯФ ИЯФ, 2015-15, Новосибирск, 2015.

40. Вассерман С.Б., Вещеревич В.Г., Гришанов Б.И., Карлинер М.М., Клюев В.Ф., Кожемякин А.В., Козырев В.Е., Макаров И.Г., Нежевенко О.А., Немков Ю.А., Острейко Г.И., Персов Б.З., Петров В.В., Радченко В.М., Сердобинцев Г.В., Сербин В.И., Серов А.Ф., Трахтенберг Э.М., Филиппченко А.В., Харитонов Е.И., Яснов Г.И. Запуск электрон-позитронного источника для ВЭПП-4. Труды 6 Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, стр.128-131. Дубна, 1979.

41. Черепанов В.П. Управление параметрами пучков в ионных синхротронах и каналах транспортировки. Диссертация к. ф.-м.н., г. Новосибирск, 2001 г.

42. Киселев В.А. Разработка и создание систем транспортировки пучков ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М. Диссертация к.т.н., Новосибирск, 1997 г.

43. Белов С.Д., Гудков Б.А., Елинер, Э.И., Жоленц А.А., Калинин А.С., Карлинер М.М., Кокоулин В.И., Купер Э.А., Левичев Б.В., Медведко А.С. Мезенцев Н.А., Нифонтов В.И., Орешков А.Д., Ощепков, Ю.И., Пискунов Г.С., Проскурин А.В., Протопопов И.Я., Сазанский В.Я., Серов А.Ф., Шабанов В.С., Эйдельман Ю.И. Структура системы автоматизированного управления и контроля накопителя ВЭПП-4. Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 291-294. Дубна, 1976 г.

44. Купер Э.А. Структура и аппаратные средства системы управления ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-4. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Новосибирск, 1978.

45. Нифонтов В.И. Автоматизированные системы контроля и управления экспериментальными физическими установками Института. 01.04.20-физика пучков заряж. частиц и ускорит. Дисс. д.т.н. Новосибирск, 1984.

46. Жоленц А.А., Иноземцев Н.И., Темных А.Б. Хроматические эффекты на ВЭПП-4. Препринт ИЯФ 83-44. 1983 г.

47. Темных А.Б. Эффекты электромагнитного взаимодействия встречных пучков в электрон-позитронном накопителе (ВЭПП-4: теория и эксперименты). Диссертация к.ф.-м.н., Новосибирск, 1987 г.

48. Жоленц А.А., Курдадзе Л.М., Лельчук М.Ю., Мишнев С.И., Никитин С.А., Пахтусова Е.В., Петров В.В., Протопопов И.Я., Салдин Е.Л., Сидоров В.А., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Чилингаров А.Г., Шатунов Ю.М., Шварц Б.А., Эйдельман С.И., Эйдельман Ю.И. Абсолютная калибровка энергии ВЭПП-4 и прецизионное измерение масс  $\psi$  и  $\psi'$  – мезонов. Ядерная физика, 1981, т. 34, в. 6(41) с. 1471-1481.

49. Тихонов Ю.А. Эффект ограничения прицельных параметров в тормозном излучении на встречных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. 1982 г., Новосибирск.

50. Байер В.Н., Хозе В.А. Об определении поперечной поляризации электронов большой энергии. ЯФ, 1969, т. 9, стр. 409-411.

51. Воробьев П.В., Казаков А.А., Кезерашвили Г.Я., Курдадзе Л.М., Петров В.В., Никитин С.А., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Шатунов Ю.М. Измерение поляризации электронов на накопителе ВЭПП-4 лазерным поляриметром. Труды 8 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 272-275. Дубна, 1983 г.

52. Казаков А.А., Кезерашвили Г.Я., Лазарева Л.Е. и др. Деление ядер  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$  гамма-квантами промежуточных энергий// Письма в ЖТФ. 1984, т. 40, №10, с. 445.

53. Блинов А.Е., Бондарь А.Е., Воробьев А.И., Грошев В.Р., Жоленц А.А., Клименко С.Г., Мишнев С.И., Никитин С.А., Онучин А.П., Панин В.С., Протопопов И.Я., Таюрский В.А., Тельнов В.И., Тихонов Ю.А., Тумайкин Г.М., Шамов А.Г., Эйдельман Ю.И. Измерение поляризации в накопителях методом рассеяния синхротронного излучения на встречном пучке. Труды 8 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 268-271. Дубна, 1983 г.

54. Никитин С.А. Исследование спиновых деполяризующих факторов и схем получения продольной поляризации в электрон-позитронном накопителе. Диссерт. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск, 1996.

55. A.S. Artamonov, S.E. Baru, A.E. Blinov, A.E. Bondar, A.D. Bukin, V.R. Groshev, Yu.I. Eidelman, N.I. Inozemtzev, V.A. Kiselev, S.G. Klimenko, E.A. Kuper, S.I. Mishnev, S.A. Nikitin, A.P. Onuchin, V.S. Panin, V.V. Petrov, I.Ya. Protopopov, A.G. Shamov, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, V.A. Tayursky, V.A. Telnov, A.B. Temnykh, Yu.A. Tikhonov, G.M. Tumaikin, A.E. Undrus, A.I. Vorobiov, M.V. Yurkov, A.A. Zholents. A high precision measurement of the  $\gamma$ ,  $\gamma'$  and  $\gamma''$  – meson masses. Physics Letters, v.137B, numb. 3, 4, 1984, pp. 272-276.

56. Бондарь А.Е., Салдин Е.Л. О возможности использования синхротронного излучения для измерения поляризации в накопителях, Новосибирск, 1981, Препринт ИЯФ, 1981-041.

57. S.A. Belomestnykh, A.E. Bondar, M.N. Yegorychev, V.N. Zhilinch, G.A. Kornychin, S.A. Nikitin, E.L. Saldin, A.N. Skrinsky and G.M. Tumaikin. An observation of the spin dependence of SR intensity. Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. 227 (1984) p. 173-181.

58. Дубровин А.Н., Жоленц А.А. Накопитель с укороченным сгустком для получения высокой светимости. Препринт ИЯФ 85-113. Новосибирск, 1985 г.

59. Никитин С.А., Салдин Е.Л., Юрков М.В. Анализ вариантов получения продольно-поляризованных пучков на накопителе ВЭПП-4. Труды 8 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 228-232. Дубна, 1983 г.

60. Авдиенко А.А., Жоленц А.А., Корнюхин Г.А., Протопопов И.Я., Скринский А.Н., Темных А.Б., Тумайкин Г.М. Проект монохроматизации накопителя ВЭПП-4 для проведения монохроматических экспериментов. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982, т. 2, с. 220-227.

## ГЛАВА 5

Д.Б. Шварц, Ю.М. Шатунов, Е.А. Переведенцев

## КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000

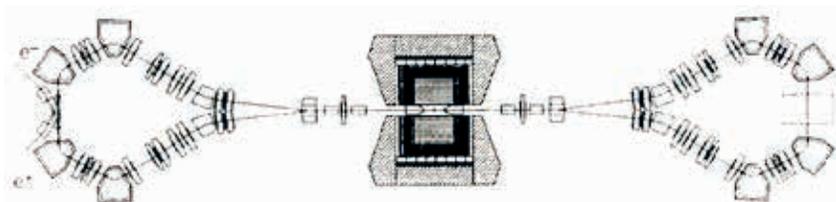
## 1. ПРЕДЫСТОРИЯ

К концу 1990-х коллайдер ВЭПП-2М выполнил свою физическую программу. Во всём диапазоне энергий от 180 до 700 МэВ в пучке несколькими поколениями детекторов был набран суммарный интеграл светимости около  $100 \text{ пбн}^{-1}$ . Машина была исключительно успешной, отработала с 1974 года 25 лет, но для получения новых по-настоящему интересных результатов необходимо было совершить качественный рывок по светимости либо найти новые физические задачи.

В это время в Италии запускалась  $\phi$ -фабрика DAΦNE, использующая все современные подходы к созданию высокопроизводительных коллайдеров (два кольца, пересечение под углом, многосгустковый режим) с проектной светимостью свыше  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . А в США и Японии завершалось строительство В-фабрик, в совсем другом диапазоне энергий, но на сверхвысокую светимость. На этом фоне продолжать эксплуатировать устаревший во всех отношениях ВЭПП-2М становилось бессмысленно.

В то же время стало понятно, что финансово-экономическая модель в стране изменилась навсегда, и рассчитывать на реализацию амбициозных проектов ИЯФ в обозримом будущем не приходится. Один из достаточно детально проработанных проектов,  $\phi$ -фабрика, развивался в ИЯФ с конца 1980-х [1]. Это был очень смелый проект, использующий целую россыпь необычных решений: «кольцо» в форме восьмёрки с одним местом встречи («сибирская бабочка»); сильные сверхпроводящие диполи для увеличения радиационного затухания; финальная фокусировка соленоидами. Краеугольным камнем было использование круглых встречных пучков.

**Рис. 1.** Проект  $\phi$ -фабрики, 1991-й год



Как известно, в электронном синхротроне сгусток формируется под действием синхротронного излучения, и в обычном плоском кольце сгусток – плоский в сечении, его размеры имеют иерархию  $\sigma_z \ll \sigma_x \ll \sigma_s$ . При этом светимость коллайдера оказывается ограничена эффектами встречи – взаимодействием частиц с коллективным электромагнитным полем встречного сгустка. Это поле, будучи сильно нелинейным, созда-

ёт как густую двумерную сетку нелинейных резонансов, так и разброс бетатронных частот в пучке, накрывающий сетку. Движение частицы в присутствии такого поля становится стохастичным. Предельную интенсивность встречного сгустка удобно выражать через параметр встречи или параметр пространственного заряда

$$\xi_{x,z} = \frac{Nr_e \beta_{x,z}^*}{2\pi\gamma\sigma_{x,z}(\sigma_x + \sigma_z)}$$

тогда ограничение становится универсальным для различных машин. Здесь  $N$  – интенсивность встречного сгустка,  $r_e$  – классический радиус электрона,  $\beta_{x,z}^*$  – значения бета-функций в месте встречи,  $\gamma$  – релятивистский фактор. Типичное достижимое значение параметра встречи составляет 0,05, и очень слабо растёт с энергией вследствие усиления затухания, достигая 0,083 для LEP на энергии около 100 ГэВ [2].

Возможность повышения предельного значения  $\xi$  стала особенно привлекательна для повышения светимости, когда казалось, что все другие подходы исчерпаны: уменьшение бета-функций в месте встречи требовало сокращения длины сгустка, что упёрлось в серьёзные проблемы с коллективными эффектами. Впервые использование круглого пучка для подавления эффектов встречи было рассмотрено в 1979-1980 годах в ИЯФ [3,4]. В численном моделировании было показано, что при работе на резонансе связи, где пучок округляется вследствие перераспределения горизонтального эмиттанса на обе степени свободы, пороговое значение  $\xi_{th}$  достигает 0.2, и плавно спадает с увеличением отстройки рабочей точки от диагонали. Интерпретация этих результатов, впрочем, отличается от современной: авторы связывали повышение предела с подавлением в пучке модуляции поперечного движения синхротронными колебаниями.

В 1989 году использование круглых пучков в будущих фабриках ( $B$ - и  $ст$ -) обсуждалось уже во многих лабораториях, со вполне современной трактовкой об одномеризации нелинейной динамики [5].

## 2. КОНЦЕПЦИЯ КРУГЛЫХ ПУЧКОВ

Ключевая идея круглых встречных пучков [6] – использование дополнительного интеграла движения, сохраняющейся продольной компоненты углового момента частицы, для повышения порога стохастичности и преодоления ограничения, налагаемого некогерентными эффектами встречи на интенсивность и плотность встречающихся сгустков.

Сохранение углового момента предполагает круглую форму пучков в месте их встречи и диктует ограничения на линейное преобразование, осуществляемое магнитной структурой коллайдера между местами встречи. Установлено [7], что единственно возможное преобразование – это (коммутативная) комбинация поворота и осесимметричной фокусировки. Отсюда следуют требования к магнитной системе коллайдера с круглыми пучками [6,8]:

- а) равные поперечные эмиттансы пучков;
- б) равенство  $\beta$ -функций в месте встречи  $\beta_z^* = \beta_x^*$ ;

в) одинаковые дробные части вертикальной и горизонтальной бетатронных частот.

В результате поперечное движение становится эффективно одномерным, динамическая диффузия ограничивается инвариантными торами, нелинейные бетатронные резонансы связи устраняются, поперечно-продольная (синхробетатронная) связь подавлена, поскольку поперечная сила от встречного сгустка перестаёт зависеть от продольной координаты частицы при осесимметричной фокусировке.

Итак, в проект ф-фабрики было заложено использование круглого пучка, причём равные поперечные эмиттансы формировались не за счёт близости к резонансу связи, а благодаря использованию вращения плоскости бетатронных колебаний соленоидами финального фокуса. К началу 1990-х гг. был полностью развит и освоен матаппарат, позволяющий делать все необходимые расчёты в оптике с такого рода сильной бетатронной связью [8], под него была заточена программа численного расчёта RING [10]. Последняя попытка воплотить в жизнь фабрику была сделана в 1998 г., «бабочка» стала 4-крылой, чтобы развести  $11 \times 11$  сгустков и поднять проектную светимость до  $2,5 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Надо отметить, что к этому моменту помимо многообещающего компьютерного моделирования эффектов встречи с круглыми пучками были проведены и первые эксперименты [11]. На коллайдере CESR (США) в тестовом режиме работы вблизи резонанса связи были достигнуты рекордные значения параметра встречи свыше 0,09, но режим не был пригоден для работы на светимость. Эксперименты же с модернизацией машины под т.н. «мёбиусный» ускоритель были неудачными из-за проблем с недостаточной динамической апертурой, и не дали внятного ответа.

Поскольку внешнего финансирования новосибирская ф-фабрика так и не дождалась, рассматривался минималистичный вариант реализации коллайдера с круглыми пучками – модернизация ВЭПП-2М с заменой квадруполь финального фокуса на сверхпроводящие соленоиды с полем 8,5 Т, была даже начата намотка катушек [12]. Однако в проект вмешались «клиенты», физики-детекторщики: для них было очень соблазнительно расширить диапазон энергии до 1 ГэВ или даже выше. Это позволяло набрать данные об адронной аннигиляции и адронных формфакторах в области, где до этого работали только совсем старые машины ADONE и DCI, с очень скромной по современным понятиям светимостью  $\sim 3 \times 10^{29} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и набранным интегралом около 6 пбн<sup>-1</sup>. Также открывалась возможность рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар, а диапазон покрываемых энергий коллайдера сомкнулся бы с данными ВЭПП-4М.

В итоге было принято решение полностью разобрать накопитель ВЭПП-2М, и на его месте построить новый, с максимальным использованием инфраструктуры старого комплекса [13]. Название ВЭПП-2000, согласно Ю.М. Шатунову, имело разнообразную интерпретацию: 1) начало проекта – 2000 год; 2) энергия – 2000 МэВ в системе центра масс, или 3) просто преемственность от ВЭПП-2/2М через цифру «2». В конце 2000 года ВЭПП-2М был остановлен.

Команда, включившаяся в создание ВЭПП-2000: Ю.М. Шатунов, И.А. Кооп, Е.А. Переведенцев, А.П. Лысенко, И.Н. Нестеренко, А.А. Ва-

лишев, А.В. Отбоев, А.Н. Кирпотин. Студенты: Д.Е. Беркаев, П.Ю. Шатунов, Д.Б. Шварц, И.М. Землянский. Инженеры и лаборанты: В.П. Просветов, О.А. Проскурина, М.И. Непомнящих, В.С. Селезнёв, В.В. Голынский. Позже к работе присоединились молодые кадры: Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, А.И. Сенченко, И.А. Останин, А.С. Касаев, Ю.М. Жаринов. Конструировали установку: А.В. Евстигнеев, Л.М. Щёголев, Н.И. Зубков, Л.Г. Исаева, В.С. Кузьминых, И.Е. Корнев. Над созданием различных систем (криогеника, вакуумная система, источники питания, ВЧ-система, диагностика) трудились ещё многие десятки сотрудников из различных подразделений (лаб. 8-2, 1-4, 6-0, 6-2, НКО, ЭП). Так, наибольших усилий потребовала разработка и изготовление сверхпроводящих соленоидов с полем 130 кГс. Здесь решающий вклад был сделан лабораторией 8-2 (Н.А. Мезенцев, В.А. Шкаруба, С.В. Хрущёв) и лабораторией 1-4 (В.В. Анашин, А.Н. Драничников). Отдельно следует сказать о разработке в лаборатории 6-1 (В.Р. Козак) нового поколения электронных блоков в стандарте «CAN-bus» для автоматизированного управления рядом источников питания (К.М. Горчаков, О.В. Беликов, В.Ф. Веремеенко).



**Рис. 2.** Команда ВЭПП-2000 на этапе сборки кольца (2004 год).  
 Верхний ряд: С.А. Постников, А.В. Пятков, В.И. Краснослободцев, А.П. Лысенко, В.П. Просветов. Второй ряд: А. Байкалов, С. Русских, Е.В. Евстратов, А. Борисов, Е.А. Переведенцев, В.Н. Чуприков, В.Е. Карпов. Третий ряд: М.И. Непомнящих, Н.Н. Коршунова, П.П. Липатова, О.А. Проскурина, О.М. Непомнящих, Д.Е. Беркаев, И.М. Землянский. Четвёртый ряд, сидят: А.А. Полунин, А.А. Валишев, И.Н. Нестеренко, П.Ю. Шатунов, В.В. Голынский, Н.И. Чуприков, И.А. Кооп, Ю.А. Роговский, Д.Б. Шварц

Поскольку планировалось использовать уже имеющийся бустер БЭП для инъекции в ВЭПП-2000, то пространство для строительства нового кольца на месте предыдущего оставалось весьма стеснённым, учитывая, что требовалось поднять энергию почти в полтора раза. Именно теснота оказалась главной головной болью при проектировании, а в дальнейшем и при эксплуатации машины.



**Рис. 3.** Слева: завершается разборка основания ВЭПП-2М, залиты первые две колонны под магниты ВЭПП-2000, 14.05.2001. Справа: монтаж опор для детекторов и фальшпола, 17.07.2001

Для максимального увеличения периметра машины из зала были убраны все конструкции и антресоли. Лежащая в основании защищённого зала монолитная железобетонная плита 600 мм была нарощена на 1 метр почти до самой стены. И в результате, удалось установить магниты 4-го квадранта, которые, правда, не обслуживаются краном, так что их сборка производится навесной ручной талью.



**Рис. 4.** М.И. Непомнящих в зале ВЭПП-2000, завершены основные строительные работы, 04.11.2002

### 3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная структура кольца [14] в целом сильно напоминает ВЭПП-2М: 4 квадранта, 2 экспериментальных промежутка и два технических. Однако повороты сделаны ахроматическими, чтобы не выпускать дисперсионную функцию в промежутки встречи и резонатор, и главная «фишка» – финальная фокусировка соленоидами. Периметр кольца составляет 24,39 м.

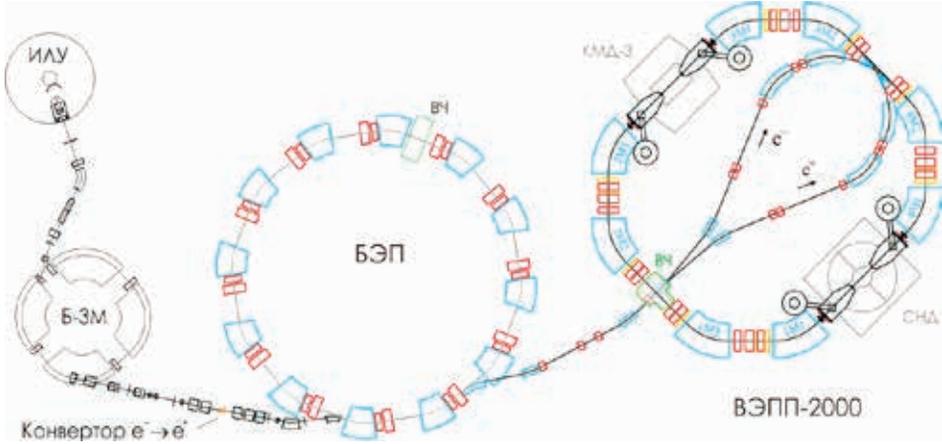
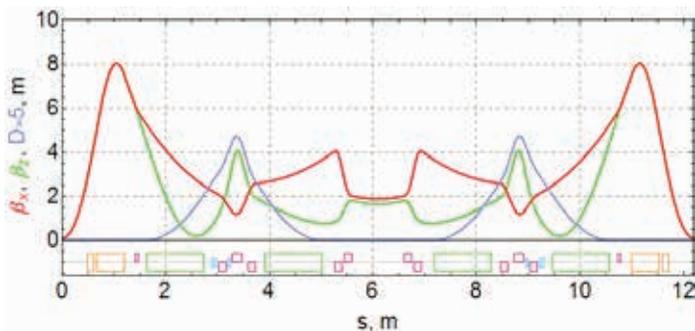


Рис. 5. Схема ускорительного комплекса ВЭПП-2000 со старым инжектором

Табл. 1. Проектные параметры ВЭПП-2000 на энергии 500 и 1000 МэВ.

		500 МэВ	1000 МэВ
Периметр	$\Pi$	24,39 м	
Частота ВЧ		172 МГц	
Номер гармоники ВЧ	$q$	14	
Напряжение ВЧ	$U$	100 кВ	
Частота обращения	$f_0$	12,2915 МГц	
Период обращения	$T_0$	81,35 нс	
Рабочий вакуум		$10^{-7}$ Па	
Бета-функции в местах встречи	$\beta_{x,z}^*$	5 см	10 см
Бетатронные частоты	$\nu_{x,z}$	4,1, 2,1	
Эмиттансы	$\mathcal{E}_{x,z}$	$6,8 \times 10^{-6}$ см·рад	$1,4 \times 10^{-5}$ см·рад
Поперечный размер пучка в IP	$\sigma_{x,z}^*$	0,058 мм	0,12 мм
Коэффициент уплотнения орбит	$\alpha$	0,036	
Синхротронная частота	$\nu_s$	0,0040	0,0024
Разброс энергий в пучке	$\sigma_{\Delta E/E}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$
Длина сгустка	$\sigma_l$	1,2 см	3,5 см
Потери энергии за оборот	$W$	4 КэВ	63 КэВ
Времена радиационного затухания	$\tau_{x,z}$	21,8 мс	2,7 мс
	$\tau_s$	9,8 мс	1,2 мс
Ток пучка	$I^{+,-}$	50 мА	200 мА
Число частиц в пучке	$N^{+,-}$	$2,5 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{11}$
Параметр встречи	$\xi_{x,z}$	0,085	
Светимость	$L$	$1,8 \times 10^{31}$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$1 \times 10^{32}$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>

**Рис. 6.** Структурные функции половины кольца ВЭПП-2000 в номинальном режиме



Поворотные магниты выполнены по образцу диполей БЭП [14]. Секторные, Ш-образные, с выводом коммутации обмоток сквозь магнитопровод. Радиус кривизны 140 см, зазор 40 мм, магнитное поле до 24 кГс. Питание последовательное для всех 8 диполей от мощного 10 кА источника, но в каждый магнит заложена корректирующая слаботочная обмотка. Особое внимание при разработке было уделено подбору профиля концентратора полюса и торцевых фасок, учёту разнообразных эффектов, связанных с сильным насыщением железа, например, зависимости эффективной длины от тока питания. Расчёты производились разработанной А. Дубровиным программой MERMAID [16], подробные карты поля снимались кареткой из 11 датчиков Холла. Для магнитных измерений был сооружён стенд в зале БЭП, где имелся единственный в Институте источник питания с током до 10 кА.



**Рис. 7.** П.Ю. Шатунов проводит магнитные измерения диполя ВЭПП-2000. 2002 год

Квадрупольные линзы триплетов и дублетов имеют вписанный диаметр 40 мм, градиент до 5,2 кГс/см, профиль полюса гиперболический. Заложено питание каждой линзы индивидуальным 300 А источником ВЧ-300. Ввиду тесноты необходимые для правки равновесной орбиты дипольные коррекции внедрены в квадруполь в виде дополнительных обмоток на ярме магнитопровода. Такое решение, к сожалению, страда-



**Рис. 8.** Слева: установка трансформатора источника питания поля ВЭПП, 26.11.2002 года. Справа: сборка магнитной системы кольца, позируют Н.И. Чуприков, В.П. Просветов, П.П. Липатова, О.А. Проскурина, 18.03.2003

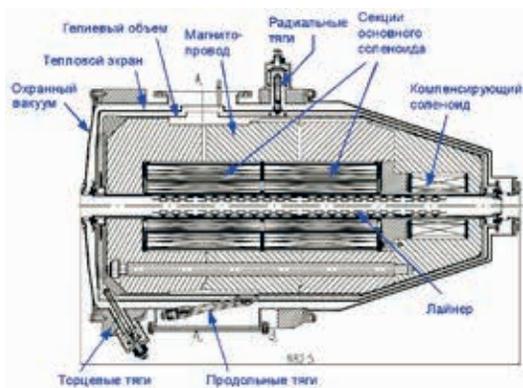
ет плохим качеством поля коррекций, их использование в режиме работы на светимость необходимо минимизировать.

Для коррекции хроматизма в триплетах установлено два семейства секступольных линз со слаботочным питанием. В них же заложены небольшие катушки для системы скью-квадрупольных коррекций. Стоит отметить, что использование в магнитной системе сильных соленоидов с индивидуальным питанием не отменяет необходимость использования скью-квадруполей [17]: во-первых, все соленоиды финального фокуса расположены практически в одной бетатронной фазе, представляя собой вырожденную систему; во-вторых, не влияют на коррекцию вертикальной дисперсии, будучи вне ахроматов.



**Рис. 9.** Первая примерка магнитных элементов на месте, 01.03.2002. Вверху: М.И. Непомнящих, О.М. Непомнящих; ниже: Л.М. Щёголев, Д. Буренков, В.П. Просветов, А.В. Евстигнеев, И.А. Кооп, В.Н. Чуприков, Н.И. Чуприков, Д.Б. Шварц, А.В. Отбоев, Э.Э. Мархель, В.В. Голынский, Н.Н. Коршунова, А.П. Лысенко, О.А. Проскурина

Как уже говорилось, самый сложный элемент магнитной системы – сверхпроводящий соленоид финального фокуса. Каждый соленоид представляет собой блок из 5 катушек, заключённых в общий обратный магнитопровод. Получение необходимого для работы на 1 ГэВ поля 13 Т потребовало использование внутренних катушек из ниобий-оловянного провода.



**Рис. 10.** Слева: схема сечения соленоида финальной фокусировки. Справа: Н.А. Пимонов за сборкой азотного экрана, 18.11.2005 г.

Для того чтобы развязать фокусирующие свойства соленоида (пропорциональные интегралу квадрата поля) и создаваемое им вращение плоскости колебаний (пропорциональное интегралу поля), блок соленоидов помимо основных (внутренней и внешних) катушек имеет относительно слабые т.н. «компенсирующие» катушки. Они также необходимы для компенсации продольного поля детектора КМД-3.

Одной из серьёзных проблем стало одновременное обеспечение в блоке соленоидов малого теплопритока, и механической устойчивости: блок собственным весом около 1 т испытывает втягивающее усилие свыше 6 т со стороны детектора КМД-3. Для удержания блока внутри криостата с минимальными зазорами (которые необходимы для компактности соленоида, «отбирающего» телесный угол детектора) создана система растяжек, использующая кевларовые пряди.

Гелиевый объём соленоида защищён от СИ медным лайнером с частыми вертикальными насечками в медианной плоскости охлаждаемым азотом.

## 6. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная камера соленоидов охлаждается жидким гелием и является мощным крионасосом, производящим откачку экспериментальных промежутков сквозь перфорированный лайнер.

В технических промежутках и в дипольных магнитах вакуумная камера выполнена из нержавеющей стали, оснащена водоохлаждаемыми приёмниками СИ [18]. Все сварные фланцы и сильфоны прикрыты изнутри ВЧ-контактами для обеспечения «гладкости» во избежание коллективных неустойчивостей. Откачка производится 16 ионно-getterными насосами ПВИГ-100, расположенными на краях диполей, где также установлены титановые испарители.

Первичный прогрев вакуумной камеры до 400°C осуществлялся в экспериментальном производстве. На рабочем месте прогрев до 150°C проводился со снятием верхних половинок магнитов. После окончательной сборки осуществляется «тренировка» камер обезгаживанием СИ в специальном техническом режиме накопителя на энергии 500 МэВ (без соленоидов). После набора интеграла тока 30-40 ампер-часов достигался вакуум порядка  $10^{-10}$  Торр. В результате, в рабочем режиме со встречными пучками 100×100 мА вакуумные условия позволяли детекторам работать с достаточно низким фоном от рассеяния на остаточном газе. Время жизни пучка при этом определялось внутрипучковым рассеянием и светимостью – однократное тормозное излучение на встречном пучке.



**Рис. 11.** Слева: В.П. Просветов и Н.А. Пимонов inspectируют вакуумную камеру диполя, 08.01.2004 г.

Снизу: Стыковка фрагментов вакуумной камеры диполя и триплета квадрупольных линз



## 5. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

Каналы транспортировки пучков из бустера БЭП имеют ряд нетривиальных решений [19]. Канал ниже медианной плоскости ВЭПП заходит внутрь кольца, разветвляется и поднимается в плоскость накопителя системой магнитов, состоящей, в основном, из магнитов постоянного питания, включенных последовательно с магнитными элементами БЭП. Такое решение о последовательном питании магнитных элементов канала и накопителя БЭП потребовало больших усилий в выравнивании кривых насыщения при работе с полем 24 кГс. Особенно эта проблема усложнилась при модернизации комплекса в 2014–2016 гг., когда максимальная энергия БЭП и канала была поднята до 1 ГэВ (см. далее). Окончательный поворот к дальнейшему техническому промежутку совершается компактными импульсными магнитами; более сильный доворачивающий с полем свыше 30 кГс и совсем малоапертурный септум-магнит с зазором для пучка 5,4 мм и полем свыше 20 кГс.



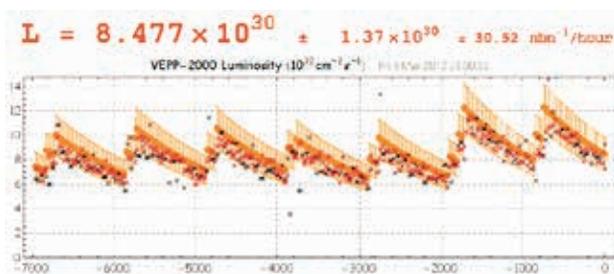
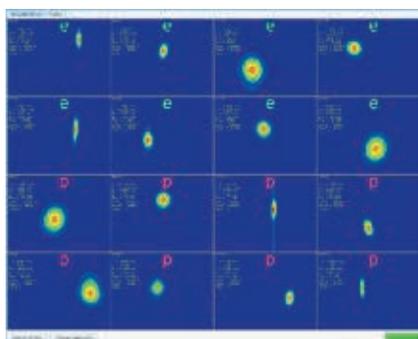
**Рис. 12.** Участок инжекции в 3D-модели (слева) и в реальности (справа)

Инжекция электронов и позитронов в кольцо ВЭПП-2000 происходит по однооборотной схеме с помощью радиальных пластин инфлекторов, расположенных на 16 мм от внутренней стенки вакуумной камеры в ближайших к промежутку инжекции магнитах. Для инжекции с накоплением пучка, например, позитронов, пластина электронного инфлектора используется для предудара накопленного пучка позитронов, а позитронный инфлектор ударяет по обеим, впущенной и накопленной порциям, так чтобы остаточные колебания происходили в пределах апертуры. Всего было создано 4 импульсных генератора на 70 кВ с длительностью «полочки» 20 нс, с механической коммутацией между пластинами (А.С. Касаев, Ф. Подгорный, А.И. Бутаков) [36].

Вся система перепуска и инжекции требует постоянного внимания для поддержания устойчивого перепуска пучков, что связано с необходимой стабильностью тока импульсных элементов на уровне  $\sim 10^{-4}$  (В.Д. Юдин), и перемагничиванием импульсных трансформаторов при переходе с инжекции электронов на позитроны и обратно.

## 6. СИСТЕМА ПУЧКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Основу пучковой диагностики, разработанной в 11-й лаборатории (И.Н. Нестеренко, А.Н. Кирпотин, Ю.А. Роговский, А.Л. Романов) составляют 16 ПЗС-камер (494×659 пикселей) на выводах видимой части СИ с каждого края поворотного магнита [20]. Это решение необычно для накопителя и продиктовано отсутствием места для размещения достаточного числа пикапов. Излучение от обоих пучков отражается одним двугранным медным водоохлаждаемым зеркалом и выводится сквозь ярмо магнитопровода наружу кольца, и далее одним объективом фокусируется на 2 ПЗС-камеры. Полученные изображения пучков позволяют не только определять положение их орбиты с точностью 10 мкм, но и измерять поперечные размеры и форму распределения. Столь большое количество профилометров позволяет восстанавливать размер пучка в месте встречи, с учётом динамических эффектов, а значит – онлайн определять светимость.



**Рис. 13.** Слева: изображения пучка на 16 ПЗС-камерах. Справа: измерение светимости по размерам пучка (оранжевые) и показания детекторов (чёрные и красные)

Между линз триплетов также удалось расположить электростатические пикапы (Е.А. Бехтенёв, Ю.А. Роговский), позволяющие наблюдать колебания центра тяжести пучка в пооборотном режиме, прецизионно и просто измерять бетатронные частоты [21]. Пикапы незаменимы для настройки инжекции и накопления, правки орбиты, изучения когерентных колебаний и т.п.

Для измерения токов пучков используются ФЭУ и феррозонд (ДССТ).

Длина сгустков определяется двумя диссекторами (Э.И. Зинин, Ю.А. Роговский, Ю.М. Жаринов) [22].

## 7. ВЧ-СИСТЕМА

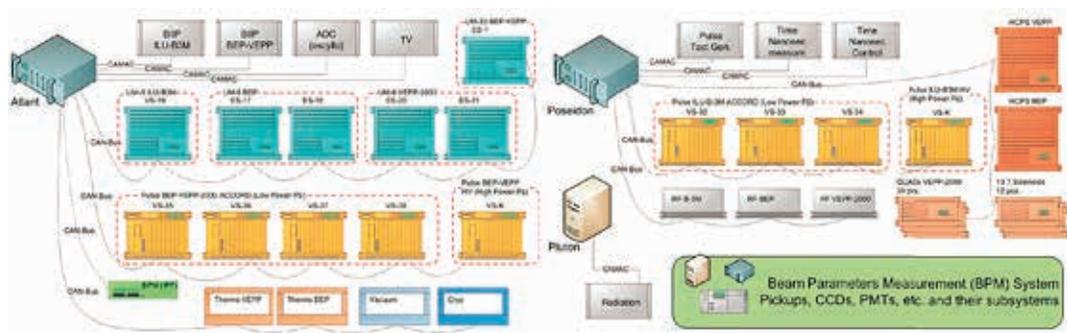
На кольце ВЭПП-2000 установлен разработанный в лаб. 6-2 (В.Н. Волков, И.К. Седяров, Е.К. Кенжебулатов) одномодовый резонатор 14-й гармоники частоты обращения (172.081 МГц) с напряжением 120 кВ с подавлением высших мод в нагрузке из слабопроводящей керамики КТ-30 [23]. Источником мощности является ламповый усилитель на основе лампы ГУ-101А.



**Рис. 14.** Слева: слой керамических элементов коаксиальной нагрузки для поглощения высших мод. Справа: резонатор на измерительном стенде

## 8. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Несмотря на сохранение значительной части инфраструктуры комплекса ВЭПП-2М, его инжекционной части, одним из ключевых этапов модернизации стала полная замена системы управления [24]. Основой системы управления стали несколько ПК, объединённых в изолированную сеть, работающих под ОС Linux. Для работы на низком уровне в лаборатории 6-1 был разработан полный набор управляющих блоков (ЦАП, АЦП, ГВИ) использующих сетевой интерфейс CAN-bus. Отдельная электроника была создана для пикапов. Часть устройств осталась с управлением в стандарте CAMAC.



**Рис. 15.** Система управления ВЭПП-2000

Созданием программного обеспечения, как низкоуровневых серверов, так и пользовательских приложений занимались в основном физики, молодые сотрудники лаб. 11 (Д.Е. Беркаев, П.Ю. Шатунов, Ю.А. Роговский, И. Останин, А.И. Сенченко, А.Н. Кирпотин, А.П. Лысенко).

Главная пультовая комплекса была отремонтирована и переоборудована.



**Рис. 16.** Пультавая ВЭПП-2000, апрель 2012. За пультом Ю.М. Шатунов, И.А. Кооп, А.И. Сенченко

## 9. ЗАПУСК ВЭПП-2000

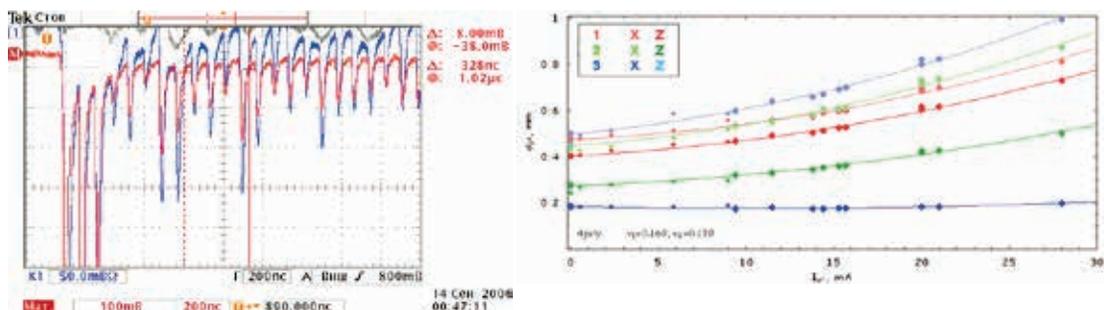
В то время как вовсю продолжалась сборка кольца ВЭПП-2000 и каналов перепуска, началось «оживление» комплекса, включение всех систем и по вечерам работа с пучком. В октябре 2005 года был получен пучок электронов в ИЛУ и Б-ЗМ, в феврале 2006 г. он был захвачен в БЭП. К летним отпускам, в июне 2006 года, пучок был выпущен из БЭП в канал, который ещё не был собран.



**Рис. 17.** Установка первого соленоида на кольцо, в промежутке СНД. М.И. Непомнящих, Е.М. Овчаров, А.А. Борисов, Н.А. Пимонов, А.В. Евстигнеев, А.А. Краснов, Ю.М. Шатунов, И.А. Кооп. 13.01.2006 г.

В конце августа 2006 года в штатных криостатах были испытаны два соленоида в промежутке СНД, и показали слишком большой расход жидкого гелия, свыше 5 л/час. Для уменьшения теплопритока требовалась переделка.

Первые обороты в кольце ВЭПП-2000 электронный пучок сделал в сентябре, на энергии 140 МэВ, но полноценный захват в специальном «тёплом» режиме, без использования соленоидов финального фокуса произошёл 14 октября 2006 года во время национальной ускорительной конференции RuPAC-2006, которая проводилась в ИЯФ.



**Рис. 18.** Слева: сигнал с ФЭУ, демонстрирующий первые устойчивые обороты пучка электронов. Справа: рост измеренных на трёх ПЗС-камерах поперечных размеров «слабого» пучка позитронов с током встречного пучка электронов. Размер, соответствующий нижней синей кривой, должен вести себя аналогично размеру пучка в месте встречи, и не зависеть в первом приближении от встречного тока. 506 МэВ, июль 2007 г.

Весь сезон 2006–2007 гг. был потрачен на изучение машины, отладку всех систем, переход на привычную энергию 500 МэВ, обезгаживание вакуумной камеры пучком СИ в обоих направлениях (с переполюсовкой кольца), запуск конверсионной системы. В конце мая захлажены соленоиды, получен номинальный режим. В июне 2007 года пучок позитронов впервые захвачен в ВЭПП-2000, и тут же до окончания сезона проведены первые тесты эффектов встречи. Светимость была зарегистрирована в конце 2007 года с помощью калориметра детектора СНД [25]. Уже первые измерения светимости в «сильно-слабом» режиме продемонстрировали слабую зависимость поперечных размеров круглого пучка от величины встречного тока, отсутствие порогового взрывообразного роста эмиттанса, обычного для плоских пучков ВЭПП-2М.

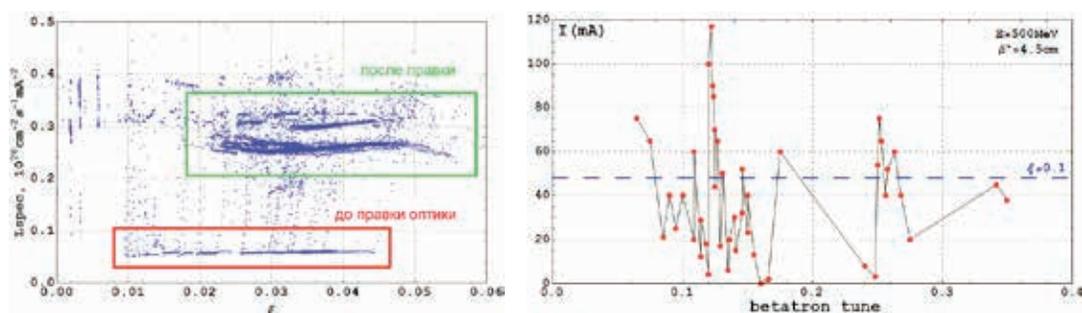
К сожалению, уже в начале 2008 года произошёл пережог сверхпроводящего токовода; затем меняли впускные магниты ВЭПП, первоначально выполненные с ошибочным радиусом кривизны; далее была переделка соленоидов, позволившая сократить расход гелия и заправлять их раз в сутки, и ремонт зеркал вывода СИ, отвалившихся под пучковой нагрузкой.

В 2009 году к финальной стадии сборки подошёл детектор КМД и была произведена его врезка в кольцо. В итоге ряда неудач и успехов, регулярная результативная работа по набору светимости началась с 2010 года.

## 10. НАСТРОЙКА И ПОЛУЧЕНИЕ СВЕТИМОСТИ

Для выхода коллайдера на высокую светимость всегда требуется продолжительная рутинная настройка. На ВЭПП-2000 впервые в ИЯФ для измерения и правки равновесной орбиты и оптических функций был применён анализ матрицы откликов с SVD-разложением [26]. В 2011 году эта работа была отмечена медалью РАН для молодых учёных (А. Романов, Д. Шварц).

Отклик – вектор измеренных набором датчиков положения пучка значений искажения равновесной орбиты в ответ на вариацию поля дипольного корректора – содержит в себе информацию о фокусирующей структуре кольца. Перебирая по очереди все имеющиеся корректоры, мы можем составить матрицу из таких откликов, в которой заключён огромный массив информации, позволяющий восстановить оптическую модель с большим числом параметров. Этот хорошо известный подход получил широкое применение к настройке оптики накопителей к концу 1990-х [27]. Ключевыми факторами для успешного применения метода являются а) высокая точность измерения орбиты и б) вычислительные возможности, необходимые для сингулярного разложения матрицы. Обе составляющие стали доступны на рубеже веков.

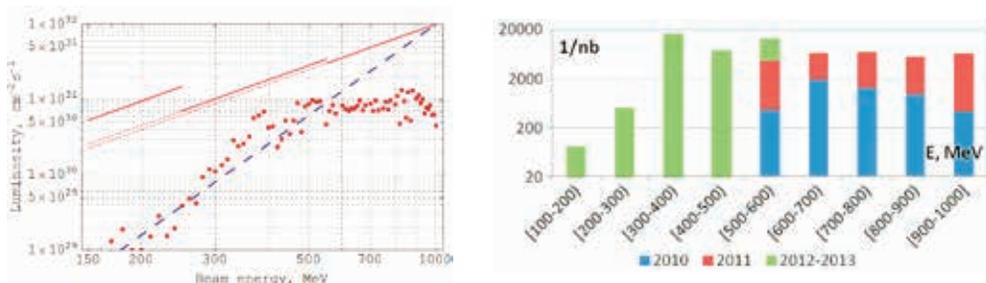


**Рис. 19.** Слева: удельная светимость падает в разы, если не следить за линейной оптикой. Справа: зависимость предельного встречного тока от рабочей точки (в «сильно-слабом» режиме)

Изучались и оптимизировались также рабочая точка, хроматизм, бетатронная связь, и т.п. с точки зрения эффектов встречи. Проводился тест с включением соленоидов в полярности, вращающей плоскость бетатронных колебаний (т.н. «мёбиусный» режим), однако такая оптика, к сожалению, имеет существенно меньшую динамическую апертуру. Несмотря на то, что на стадии обсуждения концепции круглых встречных пучков было много спекуляций, что выравнивание эмиттансов лишь за счёт работы на резонансе связи не даст подавления эффектов встречи (см., например, [28]), именно в таком режиме, в конце концов, успешно работает ВЭПП-2000.

В 2010–2013 годах ВЭПП-2000 работал с набором данных во всём диапазоне энергий от 160 до 1000 МэВ в пучке [29]. В области высоких энергий (выше 500 МэВ) светимость была ограничена недостатком по-

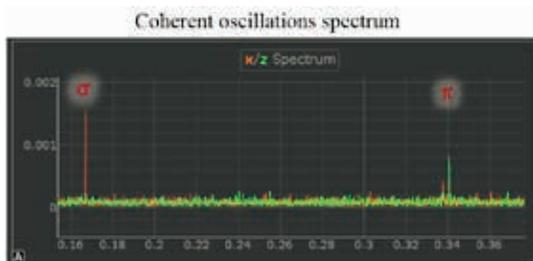
зитронов. На средних энергиях ограничение накладывается лишь эффектами встречи. При низкой энергии вследствие слабого затухания обостряются проблемы с динамической апертурой и временем жизни.



**Рис. 20.** Слева: точки – светимость, достигнутая на ВЭПП-2000 в 2010-2013 гг. Справа: набранный интеграл светимости

Рекордные значения параметра встречи,  $\xi \sim 0,12$  на одно место встречи, были достигнуты в режиме удлинения сгустка за счёт коллективных эффектов, при сниженном напряжении ВЧ [22, 30].

**Рис. 21.** Спектр когерентных колебаний встречных пучков с малыми амплитудами. По горизонтали отложена дробная часть бетатронной частоты. Сдвиг частоты от  $\sigma$  – до  $\pi$ -мод составляет рекордные 0.17



В 2012 году создание ВЭПП-2000 было отмечено премией Российской академии наук им. Векслера (Ю.М. Шатунов, И.А. Кооп, Е.А. Переведенцев).

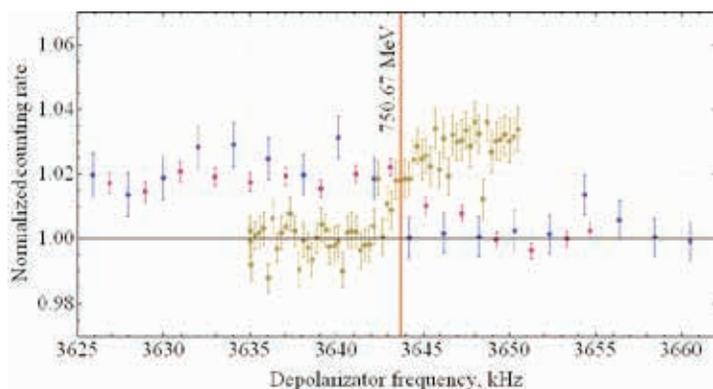


**Рис. 22.** И.А. Кооп, Е.А. Переведенцев, Ю.М. Шатунов в пультовой ВЭПП-2000, апрель 2012 г.

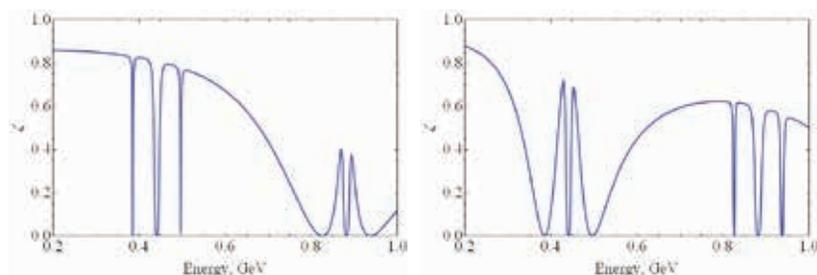
## 11. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ

Как на всех накопителях ИЯФ на ВЭПП-2000 было организовано измерение энергии по резонансной деполяризации поляризованных пучков. С небольшой переделкой вакуумной камеры в линзах триплета удалось вставить два сцинтилляционных счетчика для регистрации частиц, выбывающих из пучка из-за эффекта Тушена, при внутрисгустковом рассеянии в одном из промежутков встречи. В области впуска частиц нашлось место для коротких пластин, которые использовались как для раскочки собственных мод бетатронных колебаний, так и для резонансной деполяризации.

Время радиационной поляризации на ВЭПП-2000 составляет 12 минут на энергии 1 ГэВ. Применение соленоидов для финальной фокусировки коллайдера не препятствует получению поляризованного пучка, хотя конфигурация их взаимных полярностей (+ - +) или (+ - - +), создавая вторую или первую гармоники продольного поля соответственно, подавляет разные целые спиновые резонансы. Поэтому конфигурация должна выбираться различной для работы на низкой или на высокой энергии. Однако экспериментальное измерение энергии на уровне 750 МэВ с включенными соленоидами обнаружило сдвиг частоты резонансной деполяризации, что, скорее всего, свидетельствовало о неполной компенсации сильных продольных полей в соленоидах.

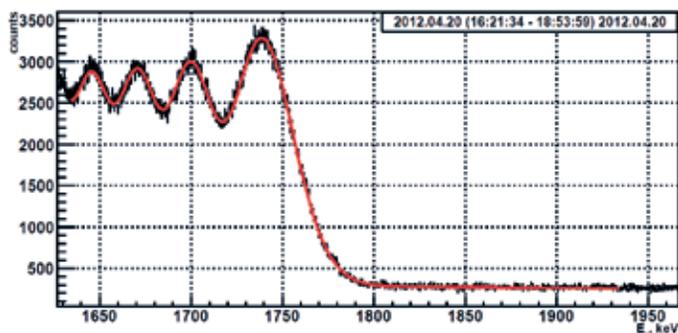


**Рис. 23.** Слева: первое измерение энергии по резонансной деполяризации, с включенными соленоидами (2010 год). Три сканирования (с разными скоростью и направлением сканирования) частотой деполяризатора, и скачок ~3% в скорости счёта тушековского поляриметра. Снизу: расчётная степень поляризации для полярности соленоидов (+ - +) и (+ - - +)



Для постоянного контроля энергии в 2012 году была установлена (Н.Ю. Мучной, М.Н. Ачасов) система измерения энергии по обратному комптоновскому рассеянию (ОКР). При этом из-за тесноты и напряжён-

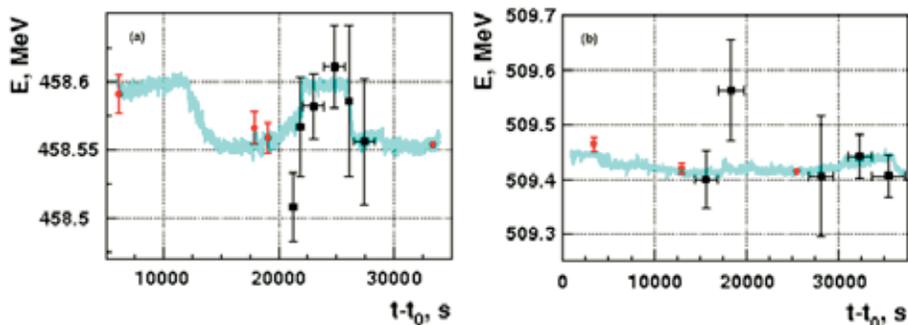
ности магнитных элементов ввод лазерного излучения (по настоянию Ю.М. Шатунова) был сделан непосредственно в дипольный магнит, что привело к необычному (осциллирующему!) виду спектра рассеянных фотонов; осцилляции ярче всего проявлялись вблизи края спектра [31]. Это явление связано с интерференцией изначально когерентных лазерных фотонов при их комптон-рассеянии на встречных электронах, летящих по круговой орбите. В итоге, интерференция вторичных фотонов с энергией порядка МэВ порождает осцилляции в спектре. Формула для количественного описания этого спектра (Е.А. Переведенцев) использовалась для подгонки экспериментальных данных и позволяла одновременно найти энергию пучка, разброс энергий частиц в пучке и магнитное поле в области взаимодействия [31].



**Рис. 24.** Слева: край спектра рассеянных фотонов. Справа: вакуумный ввод/вывод излучения

Сравнение данных ОКР с калибровкой энергии по резонансной деполяризации показало совпадение результатов с точностью не хуже  $10^{-4}$ .

Для стабилизации энергии при длительных экспериментах с набором светимости на ВЭПП-2000 постоянно задействована система ЯМР датчиков, установленных возле вакуумных камер в магнитах в области еще хорошего поля (Г.В. Карпов, П.Ю. Шатунов).



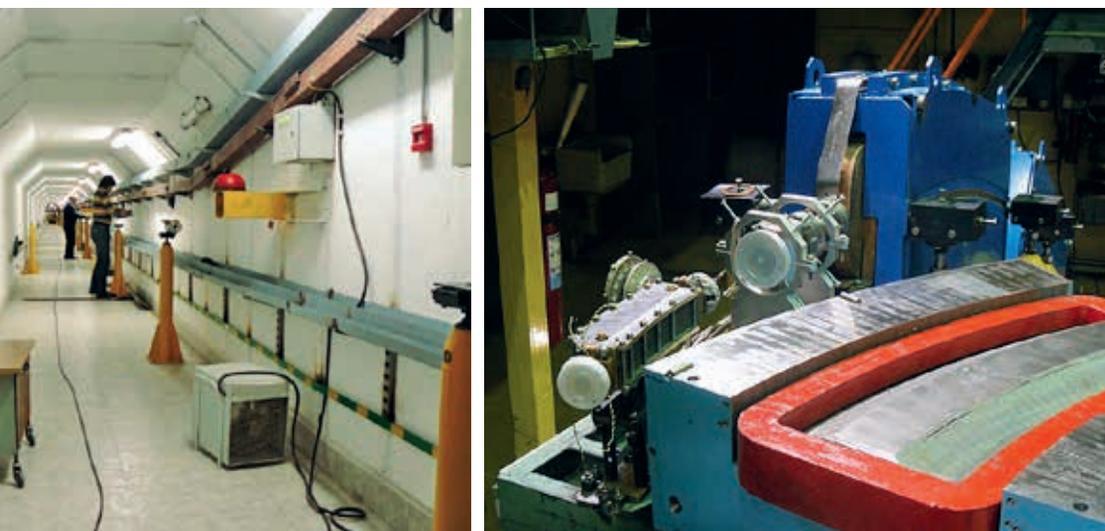
**Рис. 25.** Измерения энергии методами ОКР (чёрные точки), резонансной деполяризацией (красные) и контроль по ЯМР (голубые) в спецрежиме «тёплой оптики» с выключенными соленоидами

## 12. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА 2013–2015 гг.

Ещё на старте проекта ВЭПП-2000 было понятно, что старый инжекционный комплекс на основе синхротрона Б-3М не сможет обеспечить установку с возросшей в 30 раз по сравнению с ВЭПП-2М светимостью достаточным числом позитронов. В 2002 году было начато строительство 250-метрового тоннеля от Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 и проектирование канала транспортировки [32].



**Рис. 26.** Схема комплекса после модернизации

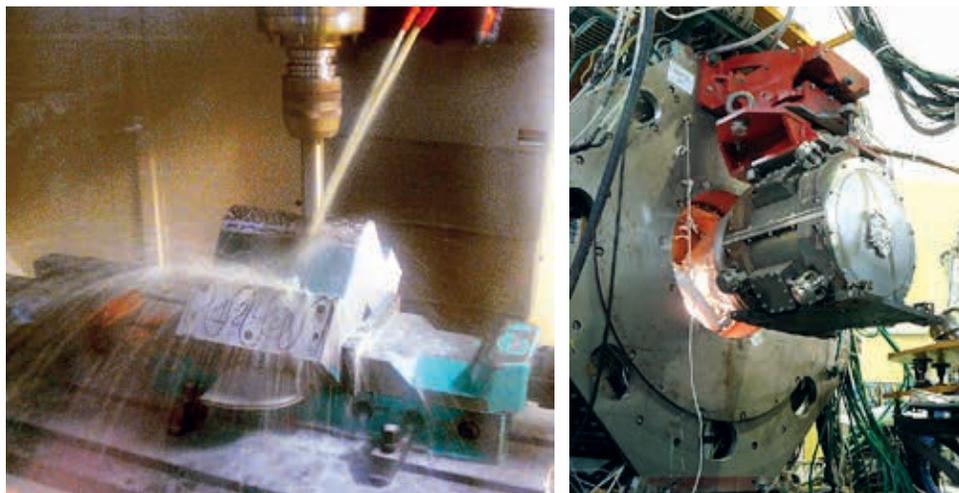


**Рис. 27.** Слева: Ю.М. Шатунов и И.М. Землянский примеряют квадруполи в тоннеле K-500, 24.01.2012. Справа: сборка финальной части канала в зале БЭП, 04.08.2015

По мере эксплуатации ВЭПП-2000 в 2010–2013 гг. с ускорением выше 800 МэВ в самом кольце коллайдера стало очевидно, что для достижения проектной светимости помимо производства достаточного числа позитронов необходимо обеспечить инжекцию из БЭП во всём диапазоне ВЭПП-2000.

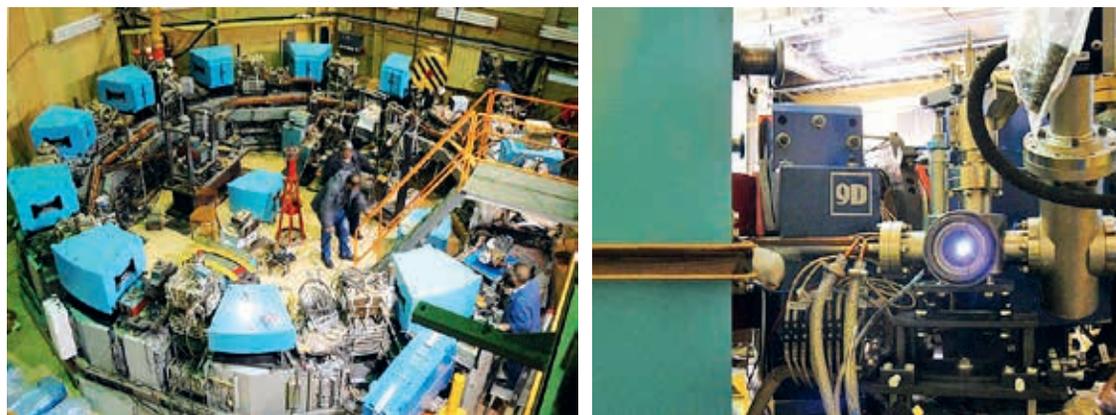
Летом 2013 года комплекс был остановлен на модернизацию [33], которая продолжалась до конца 2015 года. Лишь в сезоне 2016–2017 гг. ВЭПП-2000 снова начал работать на светимость.

Был демонтирован конверсионный узел, на его месте собран участок подъёма из тоннеля в зал БЭП. Поскольку ИК поставляет затухший

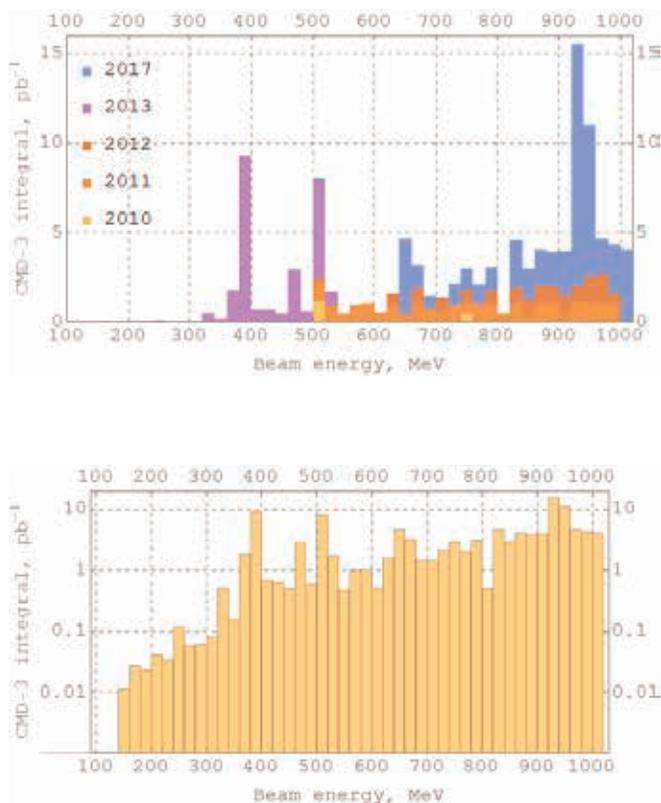


**Рис. 28.** Слева: обработка сложного полюсного профиля четвертинки магнитопровода линзы БЭП на станке с ЧПУ, 08.10.2014. Справа: соленоид, подвешенный на КМД-3 для вкатывания на кольцо ВЭПП, 14.11.2014

плотный пучок, появилась возможность значительно сократить апертуру как впускного магнита (для повышения энергии инжекции до 500 МэВ), так и в кольце БЭП. Магнитный зазор в диполях был сокращён с 40 до 32 мм, чтобы в совокупности с повышением тока питания до 10 кА достичь беспрецедентного для «тёплых» накопителей поля 26 кГс. Профиль квадруполь был также переобработан, что позволило нарастить секступольную компоненту, которая резко падает при сильном насыщении железа. Нескомпенсированный хроматизм был одним из жёстких ограничений энергии БЭП до модернизации. Был изготовлен новый ВЧ-резонатор 13-й гармоники с напряжением 100 кВ. Также пришлось изготовить новые магниты для канала транспортировки БЭП-ВЭПП.



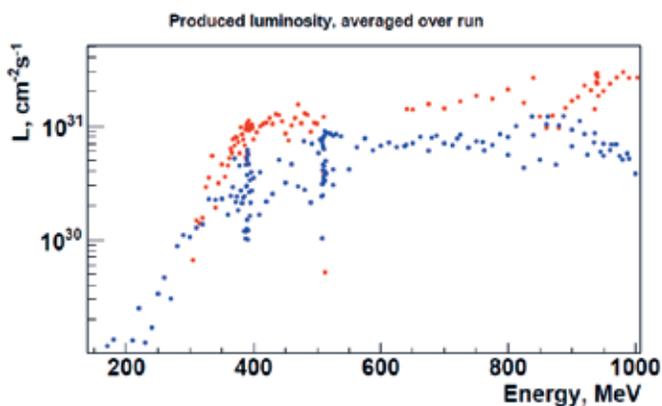
**Рис. 29.** Слева: В.П. Просветов, Г.Г. Шумаков, А.Ю. Челбаев принимают магнитопроводы диполей БЭП после обработки в ЭП, 23.10.2014. Справа: синхротронное излучение в окне нового вывода СИ на БЭП, 11.10.2016



В 2016 году производился запуск и наладка совместной работы ИК и ВЭПП-2000 [34]. В 2017 году возобновился набор светимости в диапазоне 640 – 1003 МэВ в пучке [35]. Скорость накопления позитронов в БЭП составила  $5 \times 10^8$   $e^+$ /сек, что более чем на порядок превзошло возможности старого инжектора. Светимость в области высокой энергии возросла в разы, пиковая светимость достигла  $4 \times 10^{31}$   $cm^{-2}s^{-1}$ . Набранный за сезон интеграл превысил рекордные 50  $pb^{-1}$  на каждый детектор.

**Рис. 30.** Набранный детектором КМД-3 интеграл светимости, по годам (сверху) и полный (снизу). Выделяются «пики» в области  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\eta'$ ,  $\phi$ -мезонов, а также на пороге рождения нуклон-антинуклонных пар

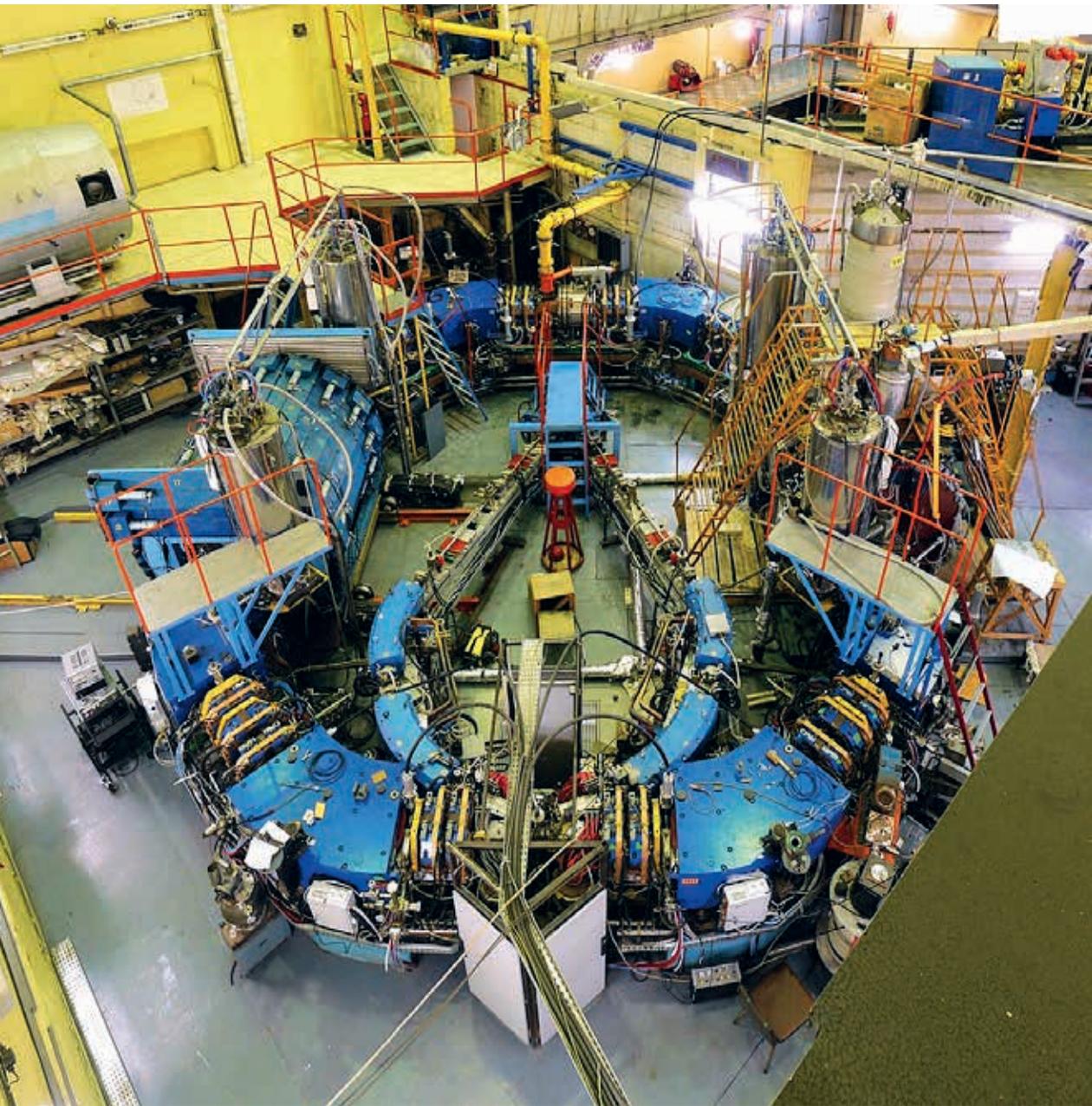
Набор экспериментальных данных на ВЭПП-2000 продолжается. Светимость продолжает расти, благодаря стабильной работе инжектора и непрерывающейся работе по настройке и изучению машины с уникальными, необычными свойствами оптики и эффектами встречи. Сезон 2017–2018 гг. посвящён вновь низкой энергии, где также бьются рекорд за рекордом...



**Рис. 31.** Светимость ВЭПП-2000, усреднённая по 10% лучших заходов, по данным КМД-3. (синие точки получены со старым инжектором; красные – после модернизации)

### 13. ПЕРСПЕКТИВЫ

В ближайшие годы ВЭПП-2000 остаётся основной ускорительной установкой ИЯФ, поставляющей данные для физики элементарных частиц в области энергий до  $2E=2$  ГэВ. На коллайдере планируется набрать интеграл светимости не менее  $1 \text{ фбн}^{-1}$ .



**Рис. 32.** Коллайдер ВЭПП-2000 в июле 2016 года

## ЛИТЕРАТУРА

1. L.M. Barkov et al., Status of the Novosibirsk Phi-Factory Project, Proc PAC' 91, pp.183-185.
2. R.W. Assmann et al., LEP Luminosity Revisited: Design and Reality, Proc. APAC' 2001, pp.74-78.
3. И.Б. Вассерман, Ф.М. Израйлев, Г.М. Тумайкин. Критерий стохастичности при взаимодействии встречных пучков на основном резонансе связи. Препринт ИЯФ, 79-74, 1979.
4. И.Б. Вассерман, Ф.М. Израйлев, И.А. Кооп, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Некоторые возможности увеличения предельной плотности токов в установках со встречными пучками. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, стр. 284-287, Дубна (1981).
5. S. Krishnagopal, R. Siemann, Simulation of Round Beams, Proc. PAC' 89, pp. 836-838.
6. V.V. Danilov et al., The Concept of Round Colliding Beams, Proc. EPAC' 96, pp.1149-1151.
7. V.V. Danilov and E.A. Perevedentsev, Invariants for Nonlinear Accelerator Optics and Round Colliding Beams, Proc. 7th ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam-Beam Issues for Multibunch, High Luminosity Circular Colliders, Dubna, 18-20 May 1995, pp.167-182, 1996.
8. V.V. Danilov and E.A. Perevedentsev, An Approach to Integrability in Round Colliding Beams, Proc. 14th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop: Beam Dynamics Issues for  $e^+e^-$  Factories (ICFA 97), Frascati, 1997, Frascati Physics Series vol. X, (1998). pp. 321-326.
9. В. Литвиненко, Е. Переведенцев. Расчёт параметров пучка в накопителях со связью колебаний. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2. с. 285-288, 1979.
10. А.П. Лысенко, RING code.
11. E.Young et al., Collisions of Resonantly Coupled Round Beams at the Cornell Electron-Positron Storage Ring (CESR), Proc. PAC' 97, pp.1542-1544.
12. I.A. Koop et al., Dynamic Aperture of the Storage Ring VEPP-2M in Round Beam Mode, Proc. PAC' 97, pp. 1433-1435.
13. Yu.M. Shatunov et al., Project of a New Electron-Positron Collider VEPP-2000, Proc. EPAC' 00, pp. 439-441.
14. П.Ю. Шатунов. Магнитная система накопителя с электрон-позитронными встречными пучками ВЭПП-2000, Дисс. к. ф.-м.н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2011.
15. Накопительное кольцо БЭП. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-98, 1983.
16. A.N. Dubrovin. MERMAID user's guide, Novosibirsk, 2006.
17. A.A. Valishev, I.A. Koop, E.A. Perevedentsev, D.B. Shwartz, «Correction of the Betatron Coupling and Closed Orbit Distortion at the VEPP-2000 Collider», Proc. PAC' 01, pp.1996-1998.
18. V.V. Anashin et al., Design of the VEPP-2000 Vacuum System, Proc. APAC' 04, pp.657-659.

19. Д.Е. Беркаев. Инжекция электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000. Дисс. к. ф-м. н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2010.
20. Yu. A. Rogovsky et al., Beam measurements with visible synchrotron light at VEPP-2000 collider, Proc. DIPAC '2011, pp. 140-142.
21. Yu.A. Rogovsky, E.A. Bekhtenev, Pickup beam measurement system at the VEPP-2000 collider, Proc. DIPAC '2011, pp. 203-205.
22. Yu.A. Rogovsky et al., The Longitudinal Distribution and Bunch Length Measurements at VEPP-2000 Collider, Proc. RuPAC '2016, pp. 673-675.
23. V. Volkov et al., Single Mode RF Cavity for VEPP-2000 Storage Ring Based Collider, Proc. EPAC' 04, pp. 752-754.
24. A. Senchenko et al., VEPP-2000 Collider Control System, Proc. PCaPAC' 12, pp. 263-267.
25. D. Berkaev et al., VEPP-2000 Electron-Positron Collider Commissioning and First Results of Round Colliding Beam Tests, Proc. EPAC' 08, pp. 956-958.
26. А.Л. Романов. Настройка орбиты и электронно-оптической структуры накопителя ВЭПП-2000 методом матриц откликов. Дисс. к. ф-м. н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2011.
27. J. Safranek, Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements, NIMA, 388, pp. 27-36 (1997).
28. S. Krishnagopal, R. Siemann, Some aspects of the two beam performance of DCI, Nucl. Instrum. Meth. A313 (1992) 328-336.
29. Д.Б. Шварц, Круглые встречные пучки в коллайдере ВЭПП-2000. Дисс. к. ф-м. н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2013.
30. D. Shwartz et al., Implementation of Round Colliding Beams Concept at VEPP-2000, Proc. eeFACT'16, pp. 32-38.
31. E.V. Abakumova et al., Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference, Phys. Rev. Lett. (2013) 110, 140402.
32. I.M. Zemlyansky et al., Commissioning of e+/e- Transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility, Proc. RuPAC' 2016, pp. 213-215.
33. D. Shwartz et al., Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV, Proc. IPAC' 14, pp. 102-104.
34. D. Shwartz et al., Recommissioning and Perspectives of VEPP-2000  $e^+ e^-$  Collider, Proc. ICHEP' 16, PoS (ICHEP2016) 054.
35. P. Shatunov et al., High Luminosity at VEPP-2000 Collider With New Injector, Proc. IPAC' 17, pp. 2989-2991.
36. B.I. Grishanov, F.V. Podgorny, Injection in the storage ring VEPP-2000, Proc. HEACC'01, Tsukuba, Japan.

## ГЛАВА 6

Д.Е. Беркаев, Н.С. Диканский, П.В. Логачев, Б.А. Скарбо

# ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-5

Разработка и создание принципиально нового комплекса электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-5 начались в ИЯФ СО РАН в соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР по фундаментальным свойствам материи 1985 года.

В связи с этим Институт уже значительное время ведет проектирование и сооружение нового комплекса ускорительных установок со встречными электрон-позитронными пучками сверхвысокой светимости, а также детекторов для регистрации результатов взаимодействия сталкивающихся частиц [1, 2]. Это единственный проект в России в столь важной области науки, который по своим параметрам превосходит близкие по характеру зарубежные проекты. Сверхвысокая светимость новых установок (получивших название «фабрик»), на несколько порядков превышающая светимости существовавших ускорителей, потребовали создания и нового инжекционного комплекса для их работы.

Работы по созданию Инжекционного Комплекса (ИК) ВЭПП-5 ИЯФ были поручены лаборатории 1-2 Н.С. Диканского, успешно разработавшей к этому времени установку НАП-М с блестящими результатами по электронному охлаждению [3]. Позже лаборатория 1-2 была преобразована в объединенную лабораторию 5. Работы на ИК ВЭПП-5 начались в 1987 году с небольшой группы под руководством А.В. Новохатского (см. рис. 1).

Большой опыт в расчетах, моделировании и изготовлении макетов ускоряющих структур по проекту ВЛЭПП [4, 5] позволял надеяться и на успешное создание ускоряющих секций форинжектора ВЭПП – 5 под его руководством.

В дальнейшем работы на ИК ВЭПП-5 последовательно возглавляли П.В. Логачев, А.А. Старостенко и Д.Е. Беркаев (см. рис. 2).



**Рис. 1.** От разработки ускоряющей секции ВЛЭПП к форинжектору ВЭПП-5



**Рис. 2.** Руководители работ по ИК ВЭПП-5. Слева направо: Д.Е. Беркаев, Н.С. Диканский, П.В. Логачев, А.А. Старостенко

Комментарий А.В. Новохатского: *«Очень интересная история о начале проекта ВЭПП-5 напомнила много событий. Особо хотел бы подчеркнуть следующее:*

1. *Начало проекта стало возможным только благодаря огромной поддержке и помощи А.Н. Скринского.*

2. *Н.С. Диканский являлся фантастическим лидером проекта, несмотря на его большую занятость по контракту с SSC (США) в то время.*

3. *Как я помню, Саша Александров и Паша Логачев проделали огромный объем работ по разработке и сборке форинжектора.*

4. *Без Ивана Васильевича Казарезова не было бы модуляторов клистрона 5045.*

5. *Хотел бы еще раз отметить очень важную роль Бориса Скарбо для проекта.*

*Выражаю огромную признательность Ю. Боймельштейну, Ю. Семенову, Н. Коту, С. Беломестных, А. Кулакову, М. Авилову, О. Баженову, П. Мартышкину, Ю. Токареву и всем остальным, кто помогал мне в начале проекта. Мои наилучшие пожелания всем в честь юбилея института».*

Было понятно, что основу инжекционного комплекса составят линейные ускорители электронов и позитронов, варианты которых в различных ускорительных центрах (SLAC, ЦЕРН (LEP), KEK и др.) успешно решали поставленные перед ними задачи по формированию электронных и позитронных сгустков различных энергий высокой интенсивности.

В институте к этому времени еще не были разработаны и отлажены сложные технологии для производства структур линейных ускорителей

на бегущей волне, а отечественная промышленность не могла производить мощные и надежные клистроны 10-сантиметрового диапазона для питания этих структур. Как показал опыт по созданию ИК ВЭПП-5, потребовались многие годы для сооружения такого инжектора.

Общие проблемы и трудности страны на рубеже 80–90-х годов прошлого века заметно осложнили разработку и создание как всего проекта ВЭПП-5, так и инжекционного комплекса в частности. Первоначально проект ВЭПП-5 включал в себя инжекционный комплекс, ф-фабрику и В-фабрику. Усиливавшиеся проблемы финансирования исключили из проекта ф-фабрику, затем проект В-фабрики был заменен на ст-фабрику [1], переросший затем в Супер ст-фабрику [2].

Что касается вариантов создания ИК ВЭПП-5, то они варьировались в достаточно широких пределах в зависимости от оптимизма и пессимизма в финансировании проекта. Наиболее оптимистичные начальные предложения предполагали строительство двух линейных ускорителей на рабочую энергию 510 МэВ. Один из них планировался для производства позитронов, а второй – как основной электрон-позитронный ускоритель. Строить оба ускорителя планировалось в «чистом поле», а именно, в специально построенном для них здании, например, за зданиями 15 или 16 ИЯФ. Другие варианты рассматривали более скромный ускоритель электронов с энергиями 200 – 300 МэВ для производства позитронов.

В качестве примера на рис. 3 показано фото с проектом ИК ВЭПП-5 с источником позитронов на базе линейного ускорителя с энергией 250 МэВ и конвертором, основным линейным ускорителем на энергию 510 МэВ, накопителем-охладителем (НО), соответствующими инжекционными каналами и даже суперлиномом 2-см диапазона из проекта ВЛЭПП для доускорения частиц до рабочей энергии В – фабрики.



**Рис. 3.** Фото с презентации проекта зав. лаб. 1-2 ИЯФ Н.С. Диканского в ноябре 1989 года

Все это сделало судьбу ИК ВЭПП-5 достаточно неопределенной. В частности, отмеченные выше проблемы с финансированием привели к тому, что ИЯФ был вынужден расположить весь форинжектор ИК ВЭПП-5 в здании 13, на месте только что построенного стенда для испытаний

основных элементов форинжектора (электронной пушки, ускоряющей секции и модулятора с клистроном КИУ – 12). Там же пришлось найти место и НО с каналами, а также планировалось разместить и  $\phi$ - фабрику.

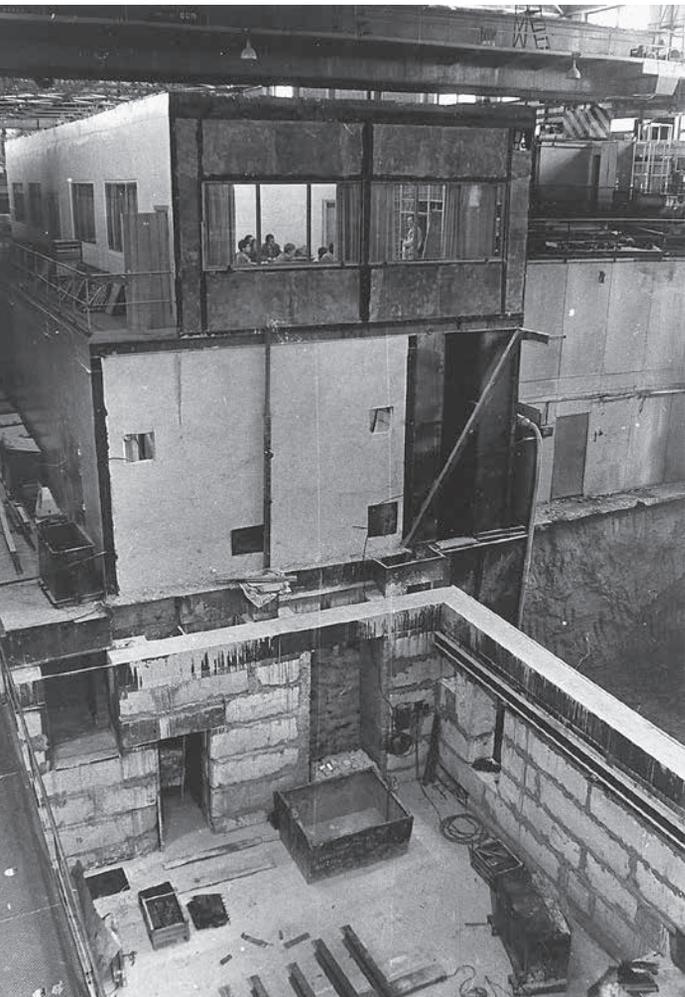
При рассмотрении вариантов окончательного размещения инжектора в здании 13 ИЯФ были приняты во внимание не только возможности выполнения всех физических требований проекта в этом помещении, но и преимущества практической реализации инжекционного комплекса в сжатые сроки при минимизации, в том числе, строительных затрат. Важным моментом для такого выбора оказалось наличие в 13-м здании готовой инженерной инфраструктуры: системы электроснабжения и водоснабжения (технической воды и дистиллята) по крайней мере для работы начальной части ИК, а также подъемного крана, разгрузочной площадки и помещений для работы. По словам Н.С. Диканского, инициатором и главным энтузиастом такого размещения был тогдашний главный инженер ИЯФ В.П. Приходько.

На снимке (рис. 4) видно, как к практически готовым помещениям форинжектора (бывшим помещениям стенда) пристраивались зал накопителя–охладителя (зал 2 ИК) и зал для размещения  $\phi$ -фабрики (зал 3 ИК). Сейчас этот 3-й зал ИК используется как часть канала для вывода пучков на коллайдер ВЭПП-2000 и комплекс ВЭПП-3, ВЭПП-4М, а также как вспомогательное помещение для отработки и испытаний различного оборудования (элементов системы форинжектора и установок плазменного ускорения, узлов разрабатываемого в ИЯФ аналога американского клистрона 5045, СВЧ пушки и/или фотопушки и т.п.). В настоящее время рассматривается вариант размещения в зале 3 нового коллайдера, так называемого «мю-мю-трона».

Решение разместить форинжектор и накопитель-охладитель внутри уже существующего здания определило жесткие ограничения на размеры площади, занимаемой под элементы и оборудование ИК. Существенным требованием было обеспечение надежности работы инжектора. Поэтому были использованы, в основном, известные физические и технические решения для основных узлов ИК. Размещение форинжектора на ограниченной площади, необходимость максимально высокого темпа ускорения в секциях, обусловили использование в качестве источников СВЧ мощности для ускоряющих секций только клистронов 5045 10 см диапазона производства SLAC (США) [6, 7]. Основные причины выбора этого клистрона – высокая импульсная СВЧ мощность (до 63 МВт) и очень большое время жизни клистронов ( $\approx 40$  тыс. часов). Усугубившиеся проблемы с финансированием проекта затянули получение полного комплекта необходимых клистронов 5045, которые фактически поставлялись по «полубартерной» схеме, частично как оплата выполненных для американцев работ, частично за счет «хороших» личных отношений и т.п.

Тем не менее первый клистрон прибыл в ИЯФ достаточно быстро, но доставка этого клистрона получилась в некотором смысле трагикомичной. При перегрузке клистрона в аэропорту Франкфурта-на-Майне (Германия), клистрон был опрокинут и разбит службами аэропорта.

К счастью, транспортировка клистрона была застрахована и институт получил новый клистрон на замену разбитого без всякого ущерба, кроме некоторых временных издержек.



Трудности 90-х годов сказались, в конечном итоге, на проблемах и времени создания как форинжктора, так и накопителя-охладителя. Так, например, главный разработчик оптики НО А.Н. Ворошилов (по проекту С.И. Мишнева) подался в скит, главный конструктор А.А. Диденко и главный разработчик ВЧ питания С.А. Беломестных также покинули ИЯФ по различным причинам, как и «присоединившиеся» к ним впоследствии В.А. Лебедев, В.А. Долгашов, В.С. Тупиков, В.Д. Шемелин и многие другие.

**Рис. 4.** Строительство помещений ИК ВЭПП-5 в 13-м здании. Вверху в комнате физиков над клистронной галереей форинжктора А.В. Новохатский ведет семинар для сотрудников. Внизу – еще не перекрытый зал 2 накопителя-охладителя с проходами в 1-й зал форинжктора. Справа внизу – яма для зала ф-фабрики (сейчас это зал 3 ИК, под возможный «мю-мю-трон»)

Был достаточно длинный отрезок времени сложных 90-х годов, когда ИЯФ, вынужденный зарабатывать деньги на зарубежных контрактах (SSC, США, GSI, Германия и др.), так перераспределил своих людей, что одно время на НО фактически работал почти один Н.П. Запяткин да А.В. Бублей контролировал в ЭП ИЯФ изготовление магнитных элементов накопителя-охладителя.

Впоследствии для форсирования работ по сборке вакуумных камер и магнитной системы накопителя была вынужденно подключена команда из лаборатории 14 ИЯФ под руководством С.А. Максимова.

Но достаточно долгий период создания ИК ВЭПП-5 имел, с другой стороны, и свои положительные стороны: произошло формирование

большого работоспособного коллектива. В работах по инжектору принимал участие внушительный коллектив сотрудников всего института: лабораторий, конструкторского бюро, экспериментального производства, вспомогательных служб. Всех практически невозможно упомянуть. Можно назвать лишь некоторых, и это будет далеко не полный список.

Возрастающий объем работ непрерывно пополнял состав сначала небольшой группы, затем сектора, а впоследствии и большой лаборатории сотрудниками различных специальностей, включая физиков, радиофизиков, инженеров, конструкторов, программистов, механиков и лаборантов. В отдельные моменты времени в составе объединенной лаборатории 5 работало порядка 150 человек.

Как уже отмечалось, работы по форинжектору ВЭПП-5 начались с небольшой группы под руководством А.В. Новохатского. Еще в июле 1989 года в нее входили только А.А. Кулаков, М.А. Олейников и Б.А. Скарбо.

С самого начала работ, как только клистрон 5045 был выбран в качестве базового варианта для форинжектора, возникла задача создания модулятора для такого клистрона. Покупка американского модулятора была исключена, необходимо было разрабатывать и создавать собственный модулятор. Достаточно быстро подключились к этим работам опытные С.Б. Вассерман, И.В. Казарезов, Н.Х. Кот, Ю.Ф. Токарев, а позднее Ю.И. Семенов, Р.Х. Галимов, П.А. Бак, А.Г. Чупыра, А.М. Резанов, взвалившие на свои плечи, совместно со многими сотрудниками ИЯФ, работы по проектированию, созданию и обслуживанию модуляторов и клистронов.

Ю.М. Боймельштейн пришел на форинжектор в октябре 1989 г. и стал фактически главным энергетиком всего ИК ВЭПП-5. Его взаимодействие со службами ОГЭ и МЭП практически избавило остальную часть команды комплекса от проблем с электричеством, обеспечением водой и дистиллятом, приточной и вытяжной вентиляцией, прокладкой кабелей, монтажом электротехнического и другого оборудования. Большую помощь в этом оказывали Р.Х. Галимов и его команда монтажников-такелажников (А.А. Чирцов, Ю.Н. Зюкин, С.В. Мякин и др.).

Практически в это же время (осень 1989-го), после успешного окончания физфака НГУ к работам на ИК и комплексе ВЭПП- 5 присоединились П.В. Логачев, А.А. Александров, М.С. Авилов и О.Б. Малышев. В течение еще нескольких следующих лет команду дополнили А.В. Антошин, С.Н. Ключев, Е.С. Константинов, П.В. Мартышкин, О.Ю. Баженов, К.В. Губин, Р.Г. Громов, С.М. Гуров, О.В. Корозников, И.Л. Пивоваров, А.А. Старостенко, А.В. Акимов, А.А. Корепанов, Я.В. Куленко, В.Э. Карлин, Д.А. Малютин, А.А. Никифоров, А.М. Барняков, Т.В. Рыбickaя, Т.А. Девятайкина (Яскина), К.В. Астрелина, А.Е. Левичев, Ф.А. Еманов, А.В. Петренко и другие выпускники НГУ и НГТУ (НЭТИ). Последовательность появления этих людей в команде ИК может заметно отличаться как по времени прихода, так и по составу указанных в этом списке людей. Наверняка найдутся и не указанные здесь люди. Но главное не в этом. Главное в том, что на инжекционный комплекс

КОЛЛАЙДЕРЫ И ДЕТЕКТОРЫ

пришла мощная, умная и активная «когорта Н.С. Диканского», бывшего в то время деканом физфака НГУ и заведующим лабораторией 5 ИЯФ. Именно такой курс на необходимость постоянной работы со студентами, привлечение их к интересной и самостоятельной работе на ускорительных установках (при неременной передаче накопленного опыта от более старших и опытных сотрудников института), сыграл важную роль в формировании коллектива лаборатории. Заметную роль в привлечении студентов на кафедру физики ускорителей сыграли командировки молодых студентов и аспирантов в различные зарубежные ускорительные лаборатории. Но, к сожалению, в дальнейшем из этой «когорты Диканского» 12 человек уехали в Фермилаб и другие американские (и не только) лаборатории, заметно меньше студентов физфака НГУ стало обучаться на кафедре ускорителей и все меньше приходило на работу в ИЯФ. Аналогичная ситуация произошла и со студентами физтеха НГТУ/НЭТИ. Но тем не менее новые сотрудники появляются на ИК ВЭПП-5, принося новый энтузиазм, амбиции и стремление к интересной работе. Среди них можно отметить Д.А. Старостенко, Д.А. Никифорова, А.В. Андрианова, К.И. Живанкова и других.

Огромную роль в создании ускоряющих секций и всей СВЧ системы форинжектора сыграли пополнившие первоначальную команду создателей ускоряющих структур в лице А.В. Новохатского, М.А. Авилова и О.Ю. Баженова сотрудники из других институтов (В.М. Павлов и В.В. Подлевских) и бывшей лаборатории 4 ИЯФ (О.В. Пирогов и С.Л. Самойлов). Неоценимую помощь в этой работе оказали сотрудники ЭП ИЯФ Д.Е. Куклин, А.Н. Косарев, В.Ф. Пактусов, С.П. Карин и М.Б. Корабельников (кстати, Максим Борисович был сначала сотрудником лаборатории 5). Именно В. Подлевских, после ухода из ИЯФ А. Новохатского, потратил много времени и сил на доведение ускоряющих структур и нагрузок к ним до рабочего состояния. Кроме того, идея и выбор материала для нагрузок ускоряющих секций тоже принадлежит В. Подлевских. После него изготовление и настройка ускоряющих структур форинжектора шли под руководством С.Л. Самойлова. Большую помощь в организации фазовых измерений и обеспечении необходимых фазовых сдвигов СВЧ сигналов между секциями, подключенными к одному клистрону, оказал Д.П. Суханов.

Изготовление и эксплуатацию первых электронных пушек обеспечили А.Н. Шарапа и А.В. Шемякин. Первая электронная пушка на стенде форинжектора работала от высоковольтного источника постоянного тока на 100 кВ. Впоследствии А.А. Корепановым под руководством И.В. Казарезова питание электронной пушки форинжектора было заменено на импульсное, сначала на 100 кВ, а потом и на 200 кВ. В дальнейшем все работы с электронной пушкой легли на плечи А.Р. Фролова и А.С. Цыганова, приложивших свои умелые руки и головы как к процессам замены и активации катодов, так и к системе управления пушкой, включая и создание импульсного питания пушки на 100 и 200 кВ. Большую помощь в поддержании работоспособности катодов пушки и их замене оказывали Г.И. Кузнецов и его «тонких дел мастер» С.В. Тур.

Неоценима роль А.Р. Фролова с помощниками в лице А.С. Цыганова, А.В. Отмара и супермонтажника С.И. Алиновского в построении элементов общей системы управления комплексом, в особенности систем временной привязки и распределения огромного числа синхронизирующих и запускающих различное оборудование импульсов, а главное в создании системы выявления рассинхронизации отдельных частей или элементов ИК. Во взаимодействии с командой Г.Я. Куркина им поддерживается общая синхронизация ИК ВЭПП-5 с ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/ВЭПП-4М.

Система субгармонической группировки (при поддержке команды Г.Я. Куркина) и система термостабилизации форинжектора оказались безраздельной вотчиной Н.Н. Лебедева, так же, как и система регистрации сигналов со всех люминофорных датчиков инжекционного комплекса.

Наносекундные системы впуска-выпуска изготавливали, настраивали и эксплуатировали Б.И. Гришанов, Ф.В. Подгорный, А.И. Бутakov, А.С. Касаев и подключившийся в последнее время к этим работам С.В. Васильев.

Разработка конверсионной системы началась с командировки в лабораторию SLAC А.А. Кулакова, а затем и П.В. Мартышкина для ознакомления с разработанной там позитронной мишенью и началом моделирования процессов рождения и сбора позитронов. Под руководством вернувшегося в ИЯФ Р.М. Лапика были разработаны несколько вариантов концентратора магнитного потока. Расчеты реальных магнитных полей концентраторов совместно с моделированием процесса сбора позитронов и их последующей трассировки позволили создать оптимальную конверсионную систему ИК ВЭПП-5. Питание магнита-концентратора было обеспечено А.М. Якутиным.

Сборка и поддержание непрерывно растущей вакуумной системы инжекционного комплекса в рабочем состоянии, включавшей как волноводные тракты от клистронов к резонаторам системы умножения мощности и ускоряющим секциям, так и элементам вакуумных камер форинжектора, НО и каналов осуществлялась А.В. Антошиным, Г.Н. Ежковым, С.Н. Ключевым, В.И. Копыловым, и А.А. Новиковым. Незамедлительную помощь и советы в любой момент оказывали вакуумщикам ИК В.В. Анашин и Л.А. Мироненко.

На начальном этапе обсуждением системы управления комплекса и ее программного обеспечения занималась небольшая группа во главе с Ю.И. Эйдельманом, А.А. Кулаковым, Б.А. Скарбо и М.Н. Захваткиным при регулярных консультациях с командой Э.А. Купера. Потом к этим работам присоединились и их фактически возглавили Д.Ю. Болховитянов, И.Л. Пивоваров, Р.Г. Громов, Е.А. Гусев и другие. Сотрудник ОВС ИЯФ С. П. Ковалев виртуозно установил на первые управляющие машины форинжектора (Пентиумы на 133 МГц) свободно распространяемую версию системы Unix BSD и познакомил с азами работы с сервером системы управления, в том числе в удаленном доступе и с графическим интерфейсом.

А в создании, обслуживании и развитии измерительной и управляющей частей системы управления, так же, как и систем различного питания ИК ВЭПП-5, приняла участие почти вся объединенная 6-я лаборатория. Упомянуть всех сотрудников этих лабораторий, обеспечивших успешное создание и эксплуатацию ИК ВЭПП-5, очень сложно, отметим только заведующих шестью лабораториями: А.С. Медведко, Э.А. Купера, Г.Я. Куркина, В.В. Колмогорова, А.М. Батракова, А.Г. Трибендиса и их сотрудников.

Огромный объем работ по конструированию как элементов ИК ВЭПП-5, так и помещений комплекса выполнили сотрудники НКО-5 ИЯФ во главе с Н.А. Кузнецовым. Несомненная заслуга в их успешном завершении принадлежит С.В. Шиянкову, А.Д. Лисицыну, Н.А. Киселевой, В.Е. Акимову, Н.А. Золотухиной, А.И. Михайлову, В.М. Барбашину, И.А. Лопатину, Л.Н. Арапову, С.Б. Горячеву и многим другим. Так, например, начальник НКО ИЯФ С.В. Шиянков значительную часть своей деятельности в институте посвятил исключительно форинжктору, в том числе именно работам по созданию ИК была посвящена его диссертация кандидата наук [25].

Невозможно обойти вниманием В.И. Кокоулина, заместителя заведующего лабораторией 5. Роль этого ныне ушедшего члена нашей команды просто невозможно переоценить. Помимо стандартных должностных обязанностей зам. зав. лабораторией ему было поручено персонально заниматься всеми проблемами с капитальным строительством и инженерией всех элементов ИК. Как часто шутил и не шутил Вадим Иванович (при этом зачастую показывая какую-то «бумажку» с печатью), что мол он «официальный заместитель А.Н. Скринского по капитальному строительству комплекса ВЭПП-5». Большую помощь В.И. Кокоулину по проектированию, строительству и обустройству подземных и надземных помещений комплекса с привлечением персонала МЭП и РСУ ИЯФ оказали С.Б. Горячев и А.П. Ершов.

Увеличившийся состав лаборатории требовал и значительного количества помещений не только для размещения сотрудников, но, в первую очередь, для проведения настройки и испытаний различного оборудования. Большая часть этого «жилого» фонда была восстановлена силами сотрудников лаборатории при ремонте помещений 13-го здания после пожара.

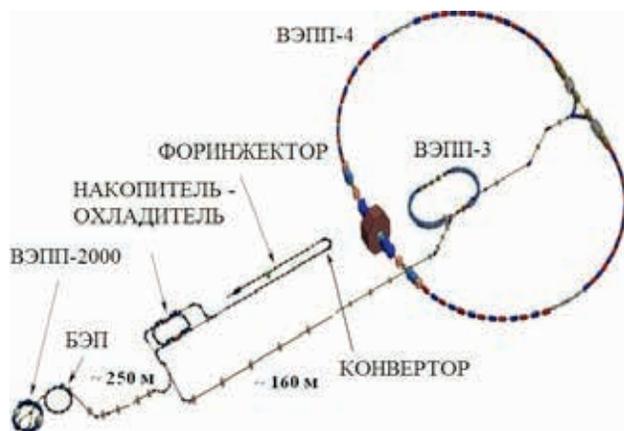
В марте 1997 года был издан приказ о проведении пусконаладочных работ на форинжкоре в радиационно-опасном режиме. Это предполагало работу на комплексе в круглосуточном режиме, а также постоянный контроль за всеми системами комплекса. В 1998 году под руководством Ю.М. Боймельштейна началось создание дежурной службы комплекса, в которую на первом этапе вошли В.Б. Лабецкий, Е.А. Знобищев, А.И. Шавенков, А.П. Филиппов. Они, как и другие работники дежурной службы – В.В. Квенцер, Е.Ю. Новикова, Г.К. Холодов, внесли большой вклад в бесперебойную работу комплекса.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИК ВЭПП-5

В состав инжекционного комплекса входят форинжектор, накопитель-охладитель и каналы транспортировки пучков к коллайдеру ВЭПП-2000 и комплексу ВЭПП-3, ВЭПП-4М. Как уже отмечалось выше, при создании ИК были использованы, в основном, известные физические и технические решения для большинства его частей. Подробные описания комплекса отражены в литературе, например [8-17, 20, 21], а также в диссертациях сотрудников ИЯФ [22-27], отразивших большой вклад их авторов в создание ИК ВЭПП-5. Поэтому ниже кратко остановимся на проектных параметрах ИК и особенностях выбранных решений для основных элементов комплекса. Общая схема комплекса с коллайдерами ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М приведена на рис. 5.

### ФОРИНЖЕКТОР

Форинжектор изначально должен был обеспечить одновременную работу ст-фабрики, коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М на полную светимость. Для этого он по проекту должен каждую секунду производить  $(5 \div 10) \cdot 10^{10}$  электронов и столько же позитронов. В результате затянувшейся реализации проекта ВЭПП-5 входившая в комплекс ст-фабрика эволюционировала в супер ст-фабрику. Теперь уже проектные параметры форинжектора не смогут обеспечить одновременную работу коллайдеров ВЭПП-2000, ВЭПП-4М и супер ст-фабрики на полную светимость последней. Если проект супер ст-фабрики все же будет реализован, то ему, скорее всего, потребуется собственный инжекционный комплекс, либо ИК ВЭПП-5 может оказаться какой-то частью этого нового инжектора.



**Рис. 5.** Схема ИК ВЭПП-5 с каналами к ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/ВЭПП-4

Основные проектные параметры форинжектора приведены в таблице 1. Основу форинжектора составляют линейный ускоритель электронов на энергию 300 МэВ, линейный ускоритель электронов и позитронов на энергию 510 МэВ, магнитная система для изохронного поворота (на  $180^\circ$ ) пучка из 300 МэВ-ного ускорителя и конверсионная система (см. рис. 6).

## Проектные параметры форинжектора

Энергия электронов и позитронов	МэВ	510
Число электронов в импульсе		$10^{11}$
Число позитронов в импульсе		$10^9$
Частота повторения импульсов	Гц	50
Энергетический разброс	%	
электронного сгустка		$\pm 1$
позитронного сгустка		$\pm 3$
Рабочая частота клистрона	МГц	2856
Импульсная мощность клистрона	МВт	$\approx 63$
Число клистронов		4 + 1
Полная потребляемая мощность	МВт	$\approx 1$

Первый ускоритель используется для получения интенсивных электронных сгустков для последующего производства позитронов. Выбранная энергия электронного пучка и типа конверсионной системы позволяют достигнуть коэффициента конверсии на уровне  $2 \div 3\%$ . Ускоритель на 510 МэВ используется как для ускорения позитронов, полученных в конверсионной системе, так и при доускорении электронных сгустков. В этом случае отдельные электронные сгустки с ускорителя 300 МэВ направляются мимо позитронной мишени в ускоритель на 510 МэВ, настроенный так, чтобы в этом случае ускорить электроны с энергией  $270 \div 300$  МэВ до выходной энергии форинжектора.

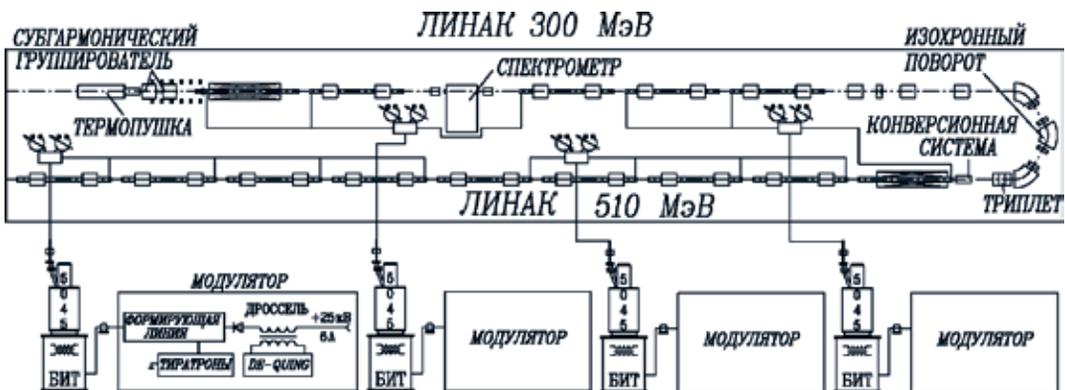


Рис. 6. Общая схема форинжектора

В настоящее время выходная энергия форинжектора составляет около 400 МэВ и по разным причинам пока не дотягивает до проектной энергии 510 МэВ. Точно также, выходная энергия ускорителя на 300 МэВ по похожим причинам составляет пока 270 МэВ. Но так как пучки с выхода ИК поступают в коллайдеры ВЭПП 2000 и ВЭПП-4М через бустерные накопители БЭП и ВЭПП-3, то несоответствие выходной энергии инжекционного комплекса не сказывается на работе этих коллайдеров.

Линейные ускорители состоят из набора модулей. Основными элементами модуля являются: клистрон 5045 10-см диапазона производства лаборатории SLAC (США), модулятор клистрона, система умножения мощности и три или четыре ускоряющие секции на бегущей волне. Кроме того, 300 МэВ-й ускоритель включает в себя термоэлектронную пушку и систему продольной компрессии пучка.

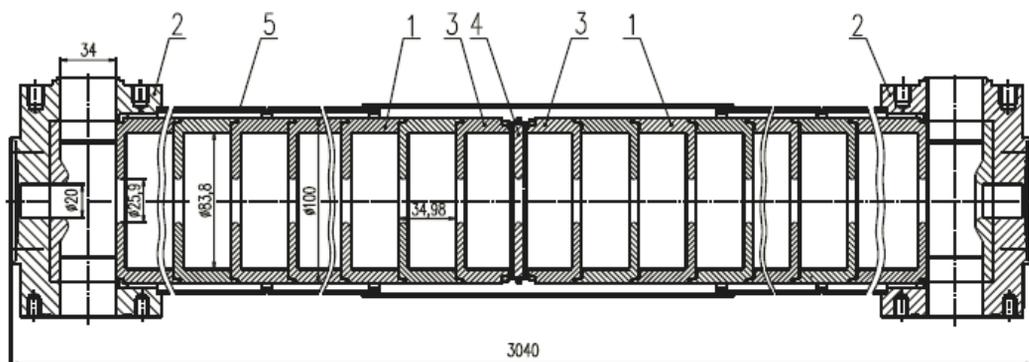
### ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА И СИСТЕМА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПРЕССИИ ПУЧКА

Первоначальный электронный сгусток формируется в 200 кВ триодной электронной пушке с сеточным управлением. При подаче на сетку управляющего импульса напряжения формируется электронный сгусток, далее поступающий в систему продольной компрессии пучка. Она включает в себя субгармонический группирователь, работающий на 16-й субгармонике основной частоты линейного ускорителя (178,5 МГц), и группирователь на основной частоте форинжектора 2856 МГц. Субгармонический группирователь сконструирован таким образом, чтобы достигнуть в нем продольного сжатия сгустка более чем в десять раз. Еще во столько же раз сгусток сжимается в поле встречной волны основной частоты при прохождении второго группирователя.

Такая система формирования сгустка позволяет при относительно малом начальном токе пушки, и, следовательно, достаточно малом эмиттансе пучка, получить короткий ( $\approx 20$  пс) интенсивный электронный сгусток, чтобы при дальнейшем ускорении обеспечить малый ( $\pm 1\%$ ) энергетический разброс.

### ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ НА 300 И 510 МЭВ

По своей структуре оба линейных ускорителя аналогичны: 300 МэВ-й ускоритель состоит из 5, а 510 МэВ-й – из 9 ускоряющих секций. Структура секций [12, 13, 23] представлена на рис. 7, а их основные параметры приведены в табл. 2.



**Рис. 7.** Ускоряющая секция. 1 – регулярная ускоряющая ячейка, 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная (соединительная) ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения

Таблица 2.

## Параметры ускоряющей секции

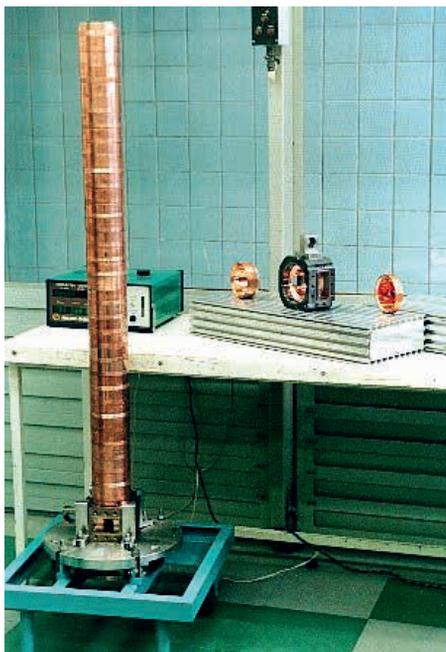
Рабочий тип колебаний		$2\pi/3$
Рабочая частота	МГц	2856
Длина одной секции	мм	3030
Число ускоряющих ячеек в секции		85
Период	мм	34,98
Внутренний диаметр	мм	83,8
Диаметр отверстия в диафрагме	мм	25,9
Толщина диафрагмы	мм	6
Коэффициент перенапряжения		1,7
Групповая скорость		0,02с
Добротность		$1,3 \cdot 10^4$
Шунтовой импеданс на единицу длины	МОм/м	53
Средний достигнутый ускоряющий градиент	МэВ/м	35

В качестве ускоряющих структур было принято решение использовать структуры на бегущей волне. Они представляют собой круглый диафрагмированный волновод с постоянной геометрией ячеек, набегом фазы на ячейку  $2\pi/3$ , и фазовой скоростью основной ускоряющей гармоника, равной скорости света. Секции с постоянной геометрией ячеек (с постоянным импедансом) были сознательно выбраны вместо структур с постоянным градиентом (с переменной геометрией ячеек). Последние хотя и обеспечивают более высокую выходную энергию ускоряемых частиц, но являются более сложными в изготовлении. Еще одной особенностью ускоряющих секций форинжктора является то, что они изготавливаются из двух одинаковых половинок, каждая из которых паяется отдельно, а затем они объединяются в одну 3-метровую секцию. Такая технология изготовления была обусловлена отсутствием в ИЯФ трехметровой вакуумной печи, а разработанная специально для пайки секций форинжктора вакуумная печь могла обеспечить пайку только половинок секций по высоте, что никак не сказалось на окончательном качестве ускоряющих секций ИК ВЭПП-5.

В процессе создания ускоряющих секций форинжктора в ИЯФ были освоены отсутствовавшие ранее технологии, необходимые для создания таких структур, а именно: расчет и конструирование элементов секций, технологии их алмазного точения, численного моделирования, холодных измерений и настроек, вакуумной пайки и другие. На следующих рисунках показаны: ускоряющая структура на измерительном стенде перед пайкой (рис. 8), трансформаторы типа волны и ячейки структур (рис. 9).

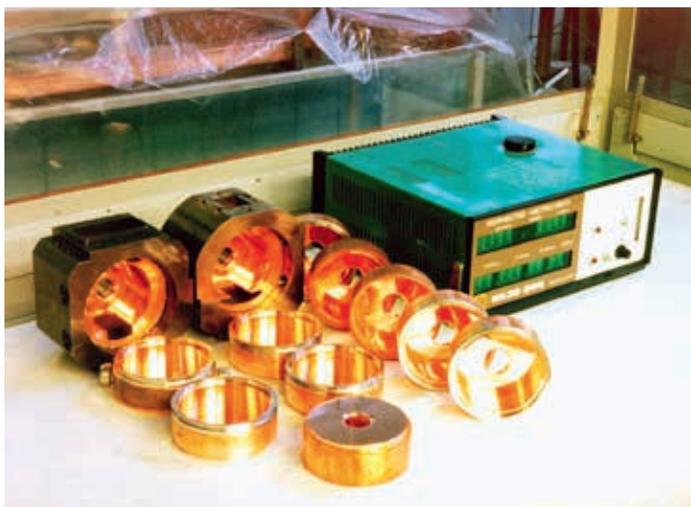
Следует отметить, что освоение такой технологии создания ускоряющих секций позволило обеспечить форинжктор всеми необходи-

мыми для работы 14 секциями, и, кроме того, поставить две такие же секции и две системы умножения мощности в ОИЯИ (Дубна) для проекта «ИРЕН» [17, 18], обеспечив коллег необходимым оборудованием. В процессе этих работ совместно с сотрудниками ИХКиГ СО РАН был предложен новый вариант структуры с параллельной связью [19] и создан ускоритель на 4-7 МэВ на ее основе.



**Рис. 8.** Ускоряющая структура на измерительном стенде перед пайкой

**Рис. 9.** Элементы ускоряющей структуры (стандартные ячейки и трансформаторы типа волны)



Для увеличения захвата электронных и позитронных пучков низкой энергии первые секции каждого ускорителя имеют повышенный темп ускорения до 25 МэВ/м, а поперечная фокусировка пучков в этих секциях осуществляется магнитным полем соответствующих соленоидов и квадрупольных линз.

После ускорения в первых секциях электронные или позитронные пучки набирают энергию ~80 МэВ, а их поперечные размеры уменьшаются в несколько раз. Остальные (регулярные) секции ускорителей имеют темп ускорения 18 МэВ/м, а поперечная фокусировка в них осуществляется квадрупольными линзами.

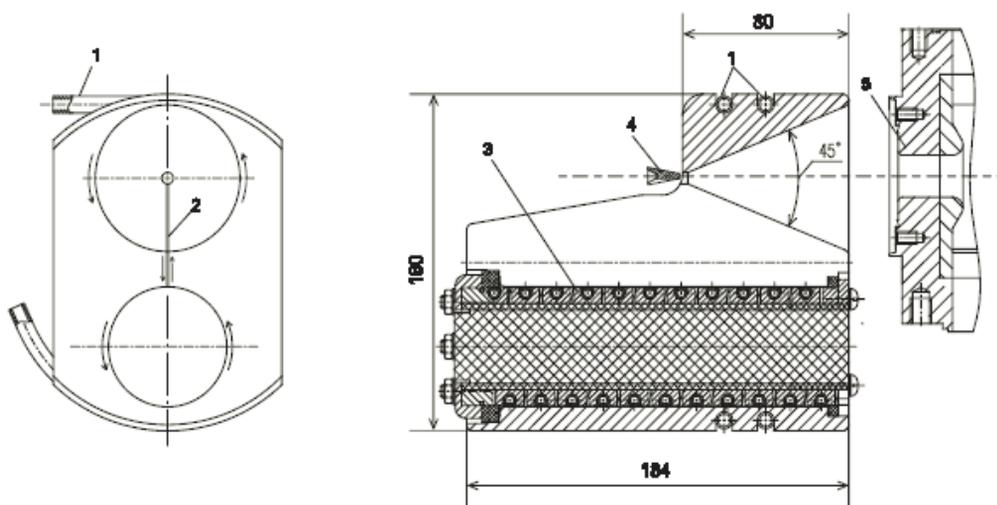
С выхода 300 МэВ-го ускорителя интенсивный электронный пучок изохронно разворачивается в горизонтальной плоскости на 180° в

специальной магнитной системе, лишь незначительно изменяющей его продольный размер (система рассчитана на поворот сгустка с энергетическим разбросом до  $\pm 3\%$ ). После поворота электронный сгусток поступает в конверсионную систему форинжектора для получения позитронов.

После ускорителя на 510 МэВ электроны, доускоренные до текущей рабочей энергии (сейчас это 395 МэВ), инжектируются в накопитель-охладитель напрямую. Позитроны, ускоренные до этой же энергии комплекса, должны предварительно направляться в дебанчер-монохроматор для уменьшения энергетического разброса с последующей их инжекцией в НО. В настоящее время дебанчер-монохроматор пока не создан, т.к. долгое время отсутствовал 5-й клистрон, а без него не изготавливалась и секция дебанчера. Поэтому позитроны пока так же инжектируются напрямую в НО. Но теперь появился 5-й клистрон (был восстановлен в ИЯФ из ранее поврежденного и непригодного к эксплуатации) и ситуация с дебанчером-монохроматором будет в скором времени решена, что должно заметно увеличить захват позитронов в охладитель.

## КОНВЕРСИОННАЯ СИСТЕМА

Для получения позитронов электронный сгусток с энергией примерно 300 МэВ фокусируется магнитным триплетом на конверсионную мишень. Его поперечный размер на мишени составляет  $\sim 1$  мм. Для сбора позитронов используется магнитная система с адиабатическим спаданием магнитного поля (рис. 10), формируемого концентратором маг-



**Рис. 10.** Схема источника позитронов ИК ВЭПП-5. Стрелками на схеме слева обозначены поверхностные токи. 1 – трубы водяного охлаждения; 2 – паз между конической полостью и полостью первичной обмотки (ширина паза – 0,2 мм; на рисунке ширина паза изображена в неправильном масштабе, т. к. иначе оба края разреза сливаются); 3 – импульсная катушка (первичная обмотка); 4 – конверсионная мишень, 5 – начало ускоряющей структуры

**Рис. 11.** Концентратор магнитного потока источника позитронов ИК ВЭПП-5



нитного потока [15, 20-22] (рис. 11) и соленоидом, расположенным на первой ускоряющей секции 510 МэВ-го ускорителя. Расчеты показывают, при энергии электронов 270 – 300 МэВ предложенная схема

сбора позитронов и их захвата в режим ускорения позволяет получить коэффициент конверсии на уровне 2 – 3%.

Испытания конверсионной системы ИК ВЭПП-5 показали, что она способна обеспечить за один импульс до  $5 \cdot 10^8$  позитронов при текущем значении числа электронов и их текущей энергии на выходе ускорителя 300 МэВ.

Основным преимуществом конверсионной системы ИК ВЭПП-5 перед аналогичными установками является согласующее устройство улучшенной конструкции, в котором удалось достичь оптимальной для фокусировки позитронов величины магнитного поля, сохранив аксиальную симметрию этого поля.

## СВЧ СИСТЕМА ФОРИНЖЕКТОРА

Заполнение ускоряющих секций СВЧ энергией осуществляется по волноводам от клистронных усилителей с использованием системы умножения мощности. В качестве усилителей СВЧ мощности выбраны клистроны 5045 10 см диапазона производства SLAC (США).

## МОДУЛЯТОР КЛИСТРОНА

Высоковольтные импульсы для клистронов формируются в модуляторах. В настоящее время разработаны, испытаны и работают в составе форинжектора 5 модуляторов клистронов по традиционной схеме с колебательным зарядом формирующей линии. Данный модулятор является законченным техническим решением собственной разработки ИЯФ [25], обеспечивает штатную работу клистрона 5045 и включает в себя все необходимые для этого устройства: высоковольтное зарядное устройство, формирующую линию, высоковольтные ключи, импульсный высоковольтный трансформатор, питание накала клистрона, систему управления, диагностики и блокировок. Система управления модулятором подключена к общей системе управления ИК ВЭПП-5. Среди основных параметров модулятора необходимо отметить: импульсное напряжение на выходе 23,5 кВ, импульсный ток 6,3 кА, длительность импульса 3,5 мкс, импульсная мощность 150 МВт, а частота повторения импульсов – до 50 Гц.

Для устранения необходимости в экранированных помещениях основные элементы модулятора собраны в двух шкафах, рядом с которыми располагается бак импульсного трансформатора с клистроном, фокусирующим соленоидом и биологической защитой (рис. 12). Клистронная галерея ИК ВЭПП-5 отделена от ускорителей бетонной защитой.



**Рис. 12.** Клистронная галерея форинжектора и главный смотритель клистронов Н.Х. Кот

Сложность монтажа клистронов в галерее форинжектора заключалась в том, что ее высота была практически на пределе возможности размещения в ней клистронов 5045. Ограничения на высоту клистронной галереи так же, как и на высоту главной пультовой, определялись краном, установленным под крышей 13-го здания. Эти проблемы предсказывались еще до прибытия первого клистрона, и принимались меры по преодолению таких неустраиваемых ограничений по высоте, в частности, специально подобранной для этого тали и других мероприятий.

Монтаж первого клистрона с нагрузкой для его испытаний прошел на пределе возможностей по высоте. Прошел удачно, благодаря как опыту разработчика клистрона Рональда Кунца (SLAC, США), так и квалификации сотрудников форинжектора. Но и в последующем, при необходимости каких-либо манипуляций с клистроном, эти операции требуют повышенной осторожности и терпеливости. Замечательно, что в команде инженера нашелся свой «Рональд Кунц», а именно Николай Хрисанович Кот. Этот спокойный и аккуратный человек с большим опытом работы с разнообразным высоковольтным оборудованием стал незаменимым смотрителем как клистронов 5045, так и их модуляторов. Если что-то случилось с клистроном или модулятором, зови главного смотрителя, он все исправит.

Пользуясь этим отступлением, скажем еще несколько слов о двух людях команды форинжектора, а именно, Иване Васильевиче Казареве и Юрии Игнатовиче Семенове, внесших заметный вклад в создание форинжектора вообще, а модуляторов клистронов в особенности. Иван Васильевич вместе со своими сотрудниками А.В. Акимовым и А.А. Корепановым провел огромный объем исследований по элементной базе модуляторов, включая зарядные устройства, компоненты формирующих линий, высоковольтные коммутаторы, клипперные диоды и т.д. и т.п. Все это внесло огромный вклад в создание модуляторов для клистронов 5045 и стало основой его докторской диссертации [25].

Ю.И. Семенов перешел на форинжектор из 4-й лаборатории ИЯФ, где вместе с О.Н. Брежневым и А.В. Новохатским занимался СВЧ питанием ускоряющих секций ВЛЭПП. Он смог полностью передать в команду форинжектора большой опыт работ, накопленный в команде О.Н. Брежнева. Причем вместе со знаниями и опытом работы он передал приличный объем оборудования, остро необходимого то для создания модуляторов форинжектора, то для испытаний прототипа ускоряющей секции, то еще для чего-нибудь. Таким он остается и сейчас, занимаясь в последнее время электронной сваркой. Сложилось впечатление, что Ю.И. Семенов знает обо всем и у него есть все...

Для работы ускоряющих секций форинжектора на полную энергию достаточно 4 клистронов, СВЧ мощность которых распределяется системой умножения и распределения СВЧ мощности. Пятый клистрон планируется использовать для питания дебанчера-монохроматора в накопителе-охладителе для компенсации энергетического разброса позитронов.

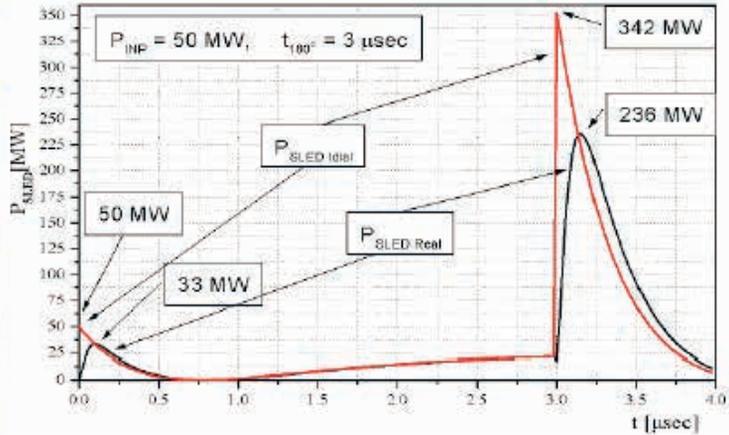
Как отмечено выше, создание дебанчера задерживалось отсутствием 5-го клистронов. В настоящее время 5-й клистрон (восстановленный в ИЯФ из ранее поврежденного и непригодного к эксплуатации) и модулятор для него собраны и работоспособны. Но проблема выхода клистронов из строя по разным причинам существует, замены им пока нет, поэтому в ИЯФ давно обсуждаются, а в последнее время активно ведутся работы по созданию собственного аналога клистронов 5045. В настоящее время разработаны и изготовлены волноводные вакуумные окна мощностью до 30 МВт, аналог солениода клистронов, керамический изолятор катодного узла. Изготавливаются макет клистронов для диодного режима работы, волноводный делитель СВЧ мощности и коллектор пучка. Ведется конструирование группирующих резонаторов и катодного узла клистронов. Так что будем надеяться, что в ближайшие годы ИЯФ будет выпускать и эксплуатировать собственные аналоги клистронов 5045.

## **СИСТЕМА УМНОЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ МОЩНОСТИ**

Так как ускорители форинжектора работают в режиме ускорения одного короткого интенсивного сгустка электронов или позитронов, а клистрон выдает значительно более длинный импульс, то для эффективной реализации энергии СВЧ импульса клистронов мож-

но использовать систему умножения мощности, которая позволяет значительно увеличить импульсную СВЧ мощность в ускоряющих секциях за счет сокращения длительности ускоряющего СВЧ импульса. Система умножения SLED хорошо отработана в лаборатории SLAC [6], и было решено использовать такую же систему на форинжекторе. В состав системы умножения мощности для каждого клистрона (рис. 13) входят:

- 3 дБ щелевой мост;
- два высокочастотных резонатора;
- блок СВЧ электроники для быстрого переворота фазы на  $180^\circ$  с регулировкой временных интервалов.



**Рис. 13.** Система умножения мощности SLED, изготовленная в ИЯФ СО РАН (слева). Зависимость ВЧ мощности на выходе SLED от времени для идеального (красная кривая справа) и реального (черная кривая) случаев

Такая система умножения позволила увеличить импульсную мощность в ускоряющих секциях форинжектора в несколько раз (см. графики на рис. 13). Отличие реальной зависимости СВЧ мощности от идеальной связано в первую очередь с ненулевым временем переворота фазы СВЧ импульса клистрона, конечностью фронтов этого импульса, а также с омическими потерями в системе умножения мощности. Применение этой системы позволило получить требуемые темпы ускорения во всех секциях форинжектора при использовании всего 4 клистронов 5045.

В системе распределения СВЧ мощности форинжектора ВЭПП-5 один клистрон и одна система SLED питают или три, или четыре ускоряющие секции. Для обеспечения высокого темпа ускорения в первых секциях линейных ускорителей к ним подводится половина «умноженной» СВЧ мощности от соответствующего клистрона, а вторая часть этой мощности распределяется поровну между двумя регулярными секциями. Мощность от двух других клистронов после системы умножения мощности делится поровну между четырьмя соответствующими

регулярными секциями. Распределение мощности осуществляется с помощью трехдецибельных мостов. Фазировка клистронов и регулирование уровня их мощности проводятся на малом уровне мощности с помощью регулируемых фазовращателей и аттенуаторов на входе каждого клистрона. Необходимый фазовый сдвиг между ускоряющими секциями, подключенными к одному клистрону, осуществляется уже на высоком уровне мощности с помощью фазовращателей, выполненных из механически сжимаемых отрезков волноводов.

Общий вид зала форинжктора показан на рис. 14.



**Рис. 14.** Общий вид зала форинжктора. Справа ускоритель электронов, внизу по центру магнитная система изохронного поворота, слева за поворотом – конверсионная система и основной ускоритель на 510 МэВ

## НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ

Основные параметры накопителя-охлаждителя приведены в табл. 3, а общая схема на рис. 15. Магнитная структура накопителя-охлаждителя зеркально-симметрична относительно двух взаимноперпендикулярных осей, проходящих через центры коротких и длинных прямолинейных промежутков, т.е. состоит из четырех квадрантов. Каждый из них включает следующие элементы основной магнитной структуры: два  $45^\circ$  магнита, квадрупольную линзу и 3 квадрупольных дублета, систему коррекций орбиты и естественного хроматизма кольца. Питание магнитных элементов постоянное и не переполюсовывается при смене знака циркулирующих частиц. В состав накопителя должен входить специальный дебанчер, обеспечивающий согласование энергетического разброса позитронного пучка, выпускаемого из форинжктора с существенно меньшим энергетическим акцептансом накопителя-охлаждителя. Как отмечено выше, дебанчер пока отсутствует, но в ближайшее время будет установлен.

Основные параметры накопителя-охладителя

Энергия	395 – 420 МэВ
Периметр	27,40 м
Частоты бетатронных колебаний	
По горизонтали	4,45
По вертикали	2,69
Синхротронная частота	0,021
Времена радиационного затухания (мс)	
Вертикальные колебания	17,5
Горизонтальные колебания	11,3
Продольные колебания	11,9
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	0,026
Частота обращения	10,9375 МГц
Напряжение ВЧ системы	9,5 кВ
Гармоника частоты ВЧ системы	1
Продольный размер пучка	15 см

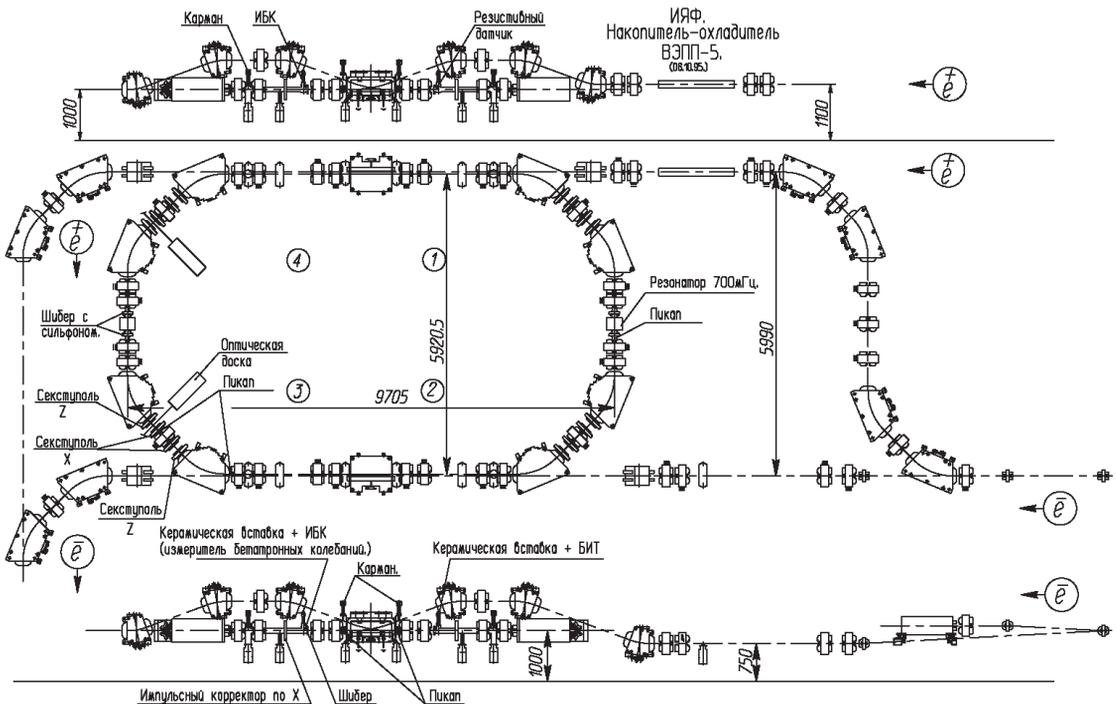


Рис. 15. Общая схема накопителя-охладителя

Параметры пучков на входе и выходе из накопителя-охладителя приведены в табл. 4.

**Проектные параметры пучков  
в накопителе-охладителе**

Таблица 4.

	На входе	На выходе
Энергетический разброс, %	1,0	0,07
x-эмиттанс, мрад·см	1,5	0,0023
z-эмиттанс, мрад·см	1,5	0,0005
Продольный размер, см	2,5	15

В накопителе-охладителе используется схема однооборотной инжекции с предударом накопленного пучка. В качестве септум-магнита используется магнит типа Ламбертсона. Магнит Ламбертсона используется как для впуска, так и для выпуска частиц, поэтому имеет большую вертикальную апертуру. Впуск-выпуск частиц одного знака осуществляется в одном и том же промежутке. Всего под впуск-выпуск занято два длинных прямолинейных промежутка – отдельно для электронов и позитронов. Для согласования оптических функций каналов инжекции и накопителя-охладителя в его магнитную структуру включены специальные «мосты». Общий вид зала накопителя-охладителя показан на рис. 16, а на рис. 17 – празднование первого накопления электронов в накопителе-охладителе ИК ВЭПП-5.



**Рис. 16.** Общий вид зала накопителя-охладителя

**Зал накопителя-охладителя**



**Рис. 17.** Первое накопление электронов в НО ИК ВЭПП-5, 3 декабря 2007 года. Слева направо: К.В. Астрелина, Д.А. Малютин, Т.В. Рыбцкая, А.В. Петренко, Н.С. Диканский, П.В. Логачев, М.Ф. Блинов, В.Б. Лабецкий, А.П. Филипов, С.Л. Самойлов

## **ВЧ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ ВЭПП-5**

В первоначальном проекте инжекционного комплекса предполагалось, что ВЧ система накопителя-охладителя ВЭПП-5 включает в себя два резонатора с общим ускоряющим напряжением до 800 кВ, работающих с частотой 700 МГц (64-я гармоника частоты обращения). Частота и величина напряжения в то время определялись необходимостью получить пучок с малым продольным размером порядка 0,4 см для последующей инжекции пучков в линейный ускоритель 2 см диапазона. Однако в процессе реализации проекта было решено оставить только один резонатор. Таким образом, ВЧ система состояла из генератора на клистроне КУ-393 с мощностью 65 кВт, передающего волноводного тракта, циркулятора, цилиндрического медного резонатора с шунтовым сопротивлением 2,24 МОм (с учетом коэффициента пролета) и системы управления. Чтобы обеспечить фазовую устойчивость пучка, высшие моды (ВМ) резонатора были сильно нагружены. Связь с ВМ осуществлялась через три расположенных по азимуту обечайки резонатора волновода с частотой отсечки 908 МГц. Это был первый в институте "одномодовый" резонатор. Такая ВЧ система работала на накопителе-охладителе с 2006 г. по сентябрь 2017 г. Активное участие в ее создании принимали от лаб. 6-2: И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, И.Г. Макаров, С. Носырев, В.Н. Осипов,

Г.Н. Острейко, В.М. Петров, И.К. Седляров, Г.В. Сердобинцев; от лаб. 5: Н.Х. Кот, А.Р. Фролов; от НКО: А.Р. Штейнке.

Со временем возникла идея разработать новый вариант ВЧ системы для кольца НО. С одной стороны, это было обусловлено тем, что необходимость выпуска из накопителя коротких сгустков отпала, с другой – появились проблемы с заменой и ремонтом комплектующих ВЧ генератора, в первую очередь клистрона КУ-293. Новая ВЧ система, работаю-



**Рис. 18.** Создатели новой ВЧ системы НО на фоне резонатора. Слева направо: А.М. Пилан, Г.Я. Куркин, А.А. Кондаков, А.Ю. Мартыновский, А.Г. Трибендис, И.К. Седляров

Коллайдеры и детекторы

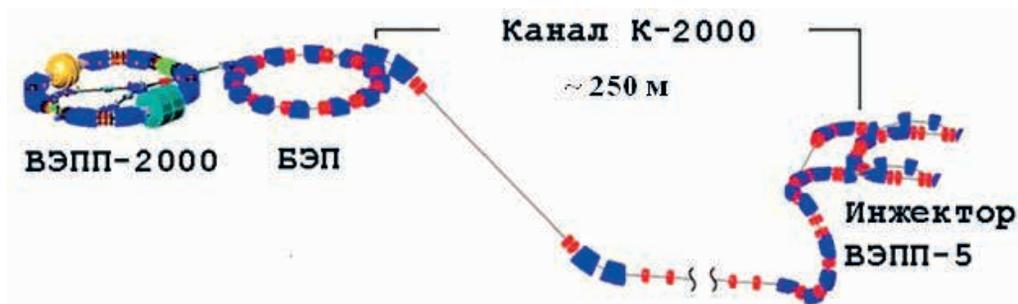
щая на частоте 10,94 МГц (первая гармоника частоты обращения), была разработана и установлена в сентябре 2017 года. Переход на первую гармонику существенно увеличил размеры сепаратрисы и при ускоряющем напряжении «всего» 9,5 кВ позволил при инжекции из линейного ускорителя увеличить захват электронов и позитронов в накопитель, повысить как скорость накопления, так и величину накопленного тока. В настоящее время ВЧ система НО ВЭПП-5 состоит из задающего генератора, усилителя 2х3,5 кВт (твердотельный, производства НПО «Триада ТВ» г. Новосибирск), ускоряющего резонатора и системы управления. Резонатор образован двумя четвертьволновыми коаксиальными линиями, подключенными к керамическому изолятору вакуумной камеры. Коаксиальные линии нагружены ферритовыми кольцами марки 90 ВНП. Использование феррита позволило существенно сократить размеры резонатора и разместить его в коротком промежутке накопителя вместо предыдущего резонатора на 700 МГц. Шунтовое сопротивление резонатора 16 кОм, потери – 2,5 кВт. Для высших мод резонатора ВЧ потери в феррите велики, и влиянием ВМ на пучок можно пренебречь. Существенной особенностью данной ВЧ системы является высокая надёжность работы, а также малые затраты на обслуживание. Маломощные электронные блоки и вся система управления ВЧ изготовлены в лаборатории 6 института. Активное участие в создании ВЧ системы принимали от лаб. 6-2: А.А. Кондаков, Г.Я. Куркин, А.Ю. Мартыновский, В.М. Петров, А.М. Пилан, И.К. Седяров, А.Г. Трибендис; от НКО: Ю.А. Бирючевский. На рис. 18 представлена фотография нового резонатора НО и его создателей на кольце накопителя.

### **КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ К-500 (НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ – ВЭПП-3) И К-2000 (НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ – ВЭПП-2000)**

Электронно-оптический канал К-500 служит для транспортировки пучков электронов и позитронов из накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5 к бустерному накопителю ВЭПП-3 комплекса ВЭПП-4, а канал К-2000 для транспортировки пучков к бустеру БЭП коллайдера ВЭПП-2000. Общая разработка каналов осуществлена под руководством В.А. Киселева.

Каналы размещаются в существующем туннеле под зданием 13, пол которого находится на отметке – 9,6 метра от пола 13-го здания или вниз на – 5,62 метра от медианной плоскости НО. Функционально каналы состоят из трех участков, а именно: участка спуска в тоннель (общий для обоих каналов), прямолинейных участков и участков подъема к ВЭПП-3 и ВЭПП-2000 (БЭП). На рис. 19 показан общий вид пространственной структуры канала к ВЭПП-2000, структура канала к ВЭПП-3 аналогична.

Каналы состоят из набора поворотных магнитов, осуществляющих повороты пучков в горизонтальной или вертикальной плоскости, набора квадрупольных линз, обеспечивающих стандартные ФОДО структуры, а также ахроматичность параллельных переносов и согласование параметров пучков на спуске и при подъеме пучков на впуске в накопитель



**Рис. 19.** Общий вид пространственной структуры канала к ВЭПП-2000

ВЭПП-3 и бустер БЭП коллайдера ВЭПП-2000. В каналах установлены магнитные корректоры положения пучков, насосы для вакуумной откачки, а также люминофорные пробники и токовые мониторы изображения пучка для этапов настройки и контроля работоспособности каналов. Общий вид одного из прямолинейных участков канала к ВЭПП-2000 показан на рис. 20.



**Рис. 20.** Фрагмент прямолинейной части канала К2000 к коллайдеру ВЭПП-2000

### ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1987 г. – начало работ по разработке и проектированию ИК ВЭПП-5.

1990 г. – начало строительства помещений стенда форинжектора.

1994 г. – получен и собран первый клистрон 5045, завершено строительство и отделка радиационно-защищенного тоннеля для линейных ускорителей, клистронной галереи, пультовой и радиопультовой ИК.

- 1996 г. – ускорены первые электроны на установке «Стенд».  
 2002 г. – запущен линейный ускоритель электронов (270 МэВ) и конверсионная система форинжектора.  
 2007 г. – захват и накопление электронов в накопителе-охладителе.  
 2013 г. – захват и накопление позитронов в накопителе-охладителе.  
 27.01.2016 г. – пучок электронов в БЭП.  
 23.06.2016 г. – пучок позитронов в БЭП.  
 19.10.2016 г. – пучок электронов в ВЭПП-3.  
 28.12.2016 г. – пучок позитронов в ВЭПП-3.

### ТЕКУЩИЕ ПАРАМЕТРЫ (2018 г.)

Энергия частиц на выходе накопителя-охладителя:	395 МэВ
Число электронов на выходе электронной пушки:	$1,0 \cdot 10^{11}$ /выстрел
Скорость накопления позитронов:	$1,1 \cdot 10^9$ /выстрел
Скорость накопления при частоте повторений 12,5 Гц:	$1,4 \cdot 10^{10}$ /с
Максимальное число частиц в накопителе:	$1,2 \cdot 10^{11}$ частиц

Как видно из достигнутых параметров, в настоящее время выходная энергия инжекционного комплекса составляет 395 МэВ и по разным причинам пока не дотягивает до проектной энергии 510 МэВ. Но так как пучки с выхода ИК поступают в коллайдеры ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М через бустерные накопители БЭП и ВЭПП-3, то временное несоответствие выходной энергии инжектора никак не сказывается на работе этих коллайдеров.

Число позитронов на выходе ИК меньше, чем было заявлено в проекте. Одна из причин низкого числа позитронов на выходе заключается в том, что инжекция позитронов в накопитель-охладитель осуществляется напрямую, без использования дебанчера-монохроматора по причине его отсутствия. В ближайшем будущем такой дебанчер будет разработан и установлен, его СВЧ питание будет обеспечено 5-м клистроном. Это позволит заметно уменьшить энергетический разброс позитронного сгустка и лучше согласовать его с акцептансом накопителя, повысив число позитронов на выходе ИК.

Еще один путь повышения числа позитронов будет обеспечен увеличением частоты работы комплекса с текущих 12,5 Гц до проектных 50 Гц, т.е. в четыре раза. Но для этого нужно будет произвести заметные вложения для развития инженерной инфраструктуры и аппаратуры комплекса.

Возможно также увеличение энергии электронного пучка на конвертере с текущих 270 МэВ до проектных 300 МэВ, что повысит коэф-



**Рис. 21.** Презентация запуска ИК ВЭПП-5.

На первом плане слева направо: мэр Новосибирска А.Е. Локоть, губернатор НСО В.Ф. Городецкий, руководитель ФАНО М.М. Котюков, директор ИЯФ П.В. Логачев. 18.12.2015 г.

фициент конверсии позитронов. Еще один путь заключается в увеличении тока с электронной пушки, например, до возможных 10–20 А, что также увеличит исходное число электронов для конверсии в позитроны. Конечно, нет предела в устранении различных нестыковок или недоработок в разводке СВЧ между секциями, магнитной оптике, геодезии...

Следует также заметить, что сегодняшние параметры ИК ВЭПП-5 в настоящее время полностью закрыли текущие и, надеемся, будущие потребности коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М в электронах и позитронах. Светимость коллайдера ВЭПП-2000 повысилась более, чем на порядок.

Так что будем надеяться, что взаимодействие инжекционного комплекса ВЭПП с коллайдерами ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М будет долгим и счастливым, и у всех будут радостные и счастливые лица, как на фотографии (рис. 21) с презентации запуска ИК ВЭПП-5!!!

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физический проект комплекса ВЭПП-5. ИЯФ, Новосибирск, 2005 г.
2. Проект супер с-т фабрики в Новосибирске. Концептуальный проект. Новосибирск, 2011 г.
3. Budker G.I., Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Meshkov I.N., Parkhomchuk V.V., Pestrikov D.V., Skrinisky A.N., Sukhina B.N. Experimental Study of Electron cooling, Part. Accel. V.7, № 4, p.197-211, (1976).
4. Balakin V.E., Brezhnev O.N., Novokhatsky A.V. and Semenov Yu.I. The accelerating structure of the colliding linear electron-positron beam. A study of the maximum attainable accelerating rate. A paper presented at the 6th All-Union Conf. on Charged Particle Accelerators. Dubna, 1978.
5. Balakin V.E., Skrinisky A.N. VLEPP PROJECT (Status Report) Preprint BINP 81-129. Novosibirsk, 1981.
6. The Stanford two-miles accelerator. Ed. by R. B. Nearl, New-York-Amsterdam: W. A. Benjamin, Inc. 1968.
7. Z.D. Farkas, H.A. Hogg, G.A. Loew and P.B. Wilson, «SLED: A Method of Doubling SLAC's energy», Proc. of the 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators, SLAC, Stanford, CA, May 1974, pp. 576-586; SLAC-PUB- 1453.
8. В.В. Анашин, С.А. Беломестных, А.Н. Ворошилов, Б.И. Гришанов, А.А. Диденко, Н.С. Диканский, М.Н. Захваткин, В.Я. Корчагин, Н.А. Кузнецов, И.В. Купцов, В.А. Лебедев, П.В. Логачев, С.И. Мишнев, А.Ю. Носарев, В.В. Пархомчук, С.В. Тамбовцев, В.Е. Якименко. Накопитель-охладитель для инжекционного комплекса ВЭПП-5. Препринт ИЯФ 92-44, Новосибирск, 1992.
9. A.V. Novokhatski, A.V. Alexandrov, M.S. Avilov, O.Yu. Bazhenov, Yu.M. Boimelshtain, N.S. Dikansky, I.V. Kazarezov, N.Kh. Kot, A.A. Kulakov, N.A. Kuznetsov, P.V. Logatchov, P.V. Martyishkin, Yu.I. Semenov, A.N. Sharapa, A.V. Shemyakin, S.V. Shiyankov, B.A. Skarbo, A.N. Skrinisky, S.B.Vasserman. Electron-positron preinjector complex at Novosibirsk. Presented at the International Workshop on Sources and Pre-Accelerators for Linear Colliders, 29.9-4.10 1994, Schwerin (Germany).
10. М.С. Авилов, А.В. Александров, А.В. Антошин, О.Ю. Баженов, П.А. Бак, Ю.М. Боймельштейн, Р.Х. Галимов, К.В. Губин, Н.С. Диканский, А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин, Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников, А.Н. Косарев, Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.Д. Лисицин, П.В. Логачев, Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров, А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо, А.Н. Скринский, Д.П. Суханов, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов, А.Р. Фролов, В.Д. Хамбинов, А.Н. Шарapa, А.В. Шемякин, С.В. Шиянков. ФОРИНЖЕКТОР КОМПЛЕКСА ВЭПП-5. СОСТОЯНИЕ РАБОТ. Представлена на XV Международном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц, 16-21 сентября, Алушта, 1997.
11. A.V. Aleksandrov, M.S. Avilov, A.V. Antoshin, P.A. Bak, O.Yu. Bazhenov, Yu.M. Boimelshtein, R.Kh. Galimov, K.V. Gubin, N.S. Dikansky, A.G. Igolkin, I.V. Kazarezov, V.E. Carlin, N.A. Kiseleva, S.N. Klyushchev, O.V. Koroznikov, A.N. Kosarev, N.Kh. Kot, D.E. Kuklin, A.D. Lisitsin,

P.V. Logatchev, L.A. Mironenko, A.V. Novokhatski, V.M. Pavlov, I.L. Pivovarov, A.M. Rezakov, V.S. Severilo, Yu.I. Semenov, B.A. Skarbo, A.N. Skrinsky, D.P. Sukhanov, Yu.F. Tokarev, A.V. Filippov, A.R. Frolov, V.D. Khambikov, A.N. Sharapa, A.V. Shemyakin, S.V. Shiyankov. Test of the prototype of VEPP-5 preinjector. Представлено на Международном совещании LC-97, Звенигород, 1997.

12. A.N. Kosarev, D.E. Kuklin, A.V. Novokhatski, V.V. Podlevskih, S.V. Shiyankov. The Accelerating Structure for VEPP-5 Preinjector. Представлено на Международном совещании LC-97, Звенигород, 1997.

13. А.Н. Косарев, Д.Е. Куклин, А.В. Новохатский, В.В. Подлевских, С.В. Шиянков. Ускоряющая структура инжекционного комплекса ВЭПП-5. Вопросы атомной науки и техники, серия ядерно-физических исследований, выпуск 2, том 1, Харьков, 1998, с. 125-128.

14. М.С. Авиллов, А.В. Акимов, А.В. Антошин, П.А. Бак, Ю.М. Боймельштейн, Д.Ю. Болховитянов, Р.Х. Галимов, Р.Г. Громов, К.В. Губин, С.М. Гуров, Е.А. Гусев, Н.С. Диканский, И.В. Казарезов, С.Н. Ключев, В.И. Кокоулин, Е.С. Константинов, Н.Х. Кот, Р.М. Лапик, Н.Н. Лебедев, А.И. Лобас, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин, Л.А. Мироненко, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров, О.В. Пирогов, В.В. Подлевских, С.Л. Самойлов, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо, А.А. Старостенко, Ю.Ф. Токарев, А.Р. Фролов, В.Д. Хамбиков, А.С. Цыганов, А.Г. Чупыра, С.В. Шиянков. Инжекционный комплекс ВЭПП-5. Состояние работ. Атомная энергия, № 1, 2003, с. 82-87.

15. К.В. Астрелина, М.Ф. Блинов, Т.А. Всеволожская, Н.С. Диканский, Ф.А. Еманов, Р.М. Лапик, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин, А.В. Петренко, Т.В. Рыбичная, А.Н. Скринский, С.В. Шиянков, Т.А. Яскина. Получение интенсивных позитронных пучков на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Письма в ЖЭТФ, 2008, том 133, вып. 1, стр. 94-114.

16. А.А. Старостенко, П.В. Логачев, О.И. Мешков, Д.А. Никифоров, А.В. Андрианов, А.Е. Левичев, Ф.А. Еманов, К.В. Астрелина, М.Ф. Блинов, А.С. Цыганов, Д.Е. Беркаев, И.А. Кооп, Д.Ю. Болховитянов, В.Л. Дорохов. Статус и перспективы инжекционного комплекса ИЯФ Письма в ЗЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). с. 1493-1499.

17. A.V. Novochatsky, A.V. Aleksandrov, M.S. Avilov, S.V. Belomestnukh, Yu. M. Boimelshtein, N.S. Dikansky, B.S. Estrin, I.V. Kazarezov, A.A. Kulakov, N.A. Kuznetsov, N.Kh. Kot, P.V. Logachev, Yu.I. Semenov, B.A. Skarbo, A.N. Skrinsky, A.V. Shemyakin, S.V. Shiyankov, Yu.F. Tokarev, S.B. Vasserman. Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN). Proceedings of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory, 27-29 April 1993, JINR, Dubna, 1993, p. 197-211.

18. А.В. Новохатский, Н.С. Диканский, Б.А. Скарбо, С.В. Шиянков и др. Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 для комплекса ИРЕН ОИЯИ. Доклады XV Совещания по ускорителям заряженных частиц, 22-24 октября 1996, ИФВЭ, Протвино, 1996, с. 96-107.

19. O.N. Brezhnev, V.M. Pavlov, O.V. Pirogov, Ju.D. Chernousov. Accelerating Structure for high Gradient Accelerators. Тезисы докладов XVII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, стр. 71, 17-23 сентября 2001 г., Алушта, Харьков, 2001.

20. Р.М. Лапик, П.В. Мартышкин, С.В. Шиянков, А. М. Якутин. Система электрон-позитронной конверсии инжекционного комплекса ВЭПП-5. Препринт ИЯФ № 2005-50.

21. R.M. Lapik, P.V. Martyshkin. The Capture Efficient of High Field Flux Concentrator. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference.

22. Павел Вениаминович Мартышкин. Разработка конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2000.

23. Виталий Викторович Подлевских. Ускоряющая секция и СВЧ нагрузка для форинжктора ВЭПП-5, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2003.

24. Сергей Владимирович Шиянков. Основные системы и элементы форинжктора ВЭПП-5, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2003.

25. Иван Васильевич Казарезов. Генераторы высокого напряжения для питания мощных импульсных источников СВЧ линейных ускорителей, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2003.

26. Дмитрий Юрьевич Болховитянов. Программное обеспечение системы управления инжекционного комплекса ВЭПП-5, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2007.

27. Алексей Васильевич Петренко. Модельно-независимый анализ и калибровка моделей поперечного движения пучка в накопителях, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2012.

## ГЛАВА 7

Е.Б. Левичев, П.А. Пиминов, Г.М. Тумайкин

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС  
ВЭПП-4М

## ВВЕДЕНИЕ

С началом работ по модернизации после пожара в августе 1985 года к названию комплекса была добавлена буква М, и комплекс получил новое название – ВЭПП-4М. *Подробное описание комплекса с обширным списком цитируемой литературы изложено в препринте «Ускорительный комплекс ВЭПП-4» ИЯФ 2011-20 (<http://www.inp.nsk.su/publications>), подготовленном в 2011 году В.В. Смалюком. Поэтому в изложении материала по ВЭПП-4М акцент будет сделан на моментах, прежде всего связанных с его модернизацией и дальнейшим развитием, но без подробного описания ряда систем и экспериментов, изложенных в вышеуказанном препринте и цитируемой литературе. В этом препринте представлен широкий список разработчиков ВЭПП-4М и участников экспериментов: А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, А.Е. Бондарь, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, В.Ф. Веремеенко, С.А. Глухов, Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, В.Н. Ерохов, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлев, Э.И. Зинин, В.В. Каминский, В.И. Каплин, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселев, В.Р. Козак, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев, В.Р. Мамкин, А.С. Медведко, О.И. Мешков, А.И. Микайылов, Л.А. Мироненко, С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю. Мучной, В.В. Нейфельд, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, Д.М. Николенко, В.К. Овчар, И.Н. Окунев, А.П. Онучин, В.В. Орешонок, В.Н. Осипов, В.В. Петров, В.М. Петров, П.А. Пиминов, О.А. Плотникова, А.В. Полянский, Ю.А. Пупков, В.В. Репков, Е.А. Ротов, В.К. Сандырев, В.В. Свищев, И.К. Седляров, А.Н. Селиванов, Е.А. Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смадюк, Е.В. Старостина, Д.П. Суханов, С.В. Тарарышкин, Ю.А. Тихонов, Д.К. Топорков, Г.М. Тумайкин, И.Ф. Утюпин, М.Г. Федотов, А.Д. Хильченко, В.М. Цуканов, В.П. Черпонов, И.Н. Чуркин, А.Г. Шамоу, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов, С.В. Шиянков, Е.И. Шубин. Список по сравнению с ранними публикациями содержит большее количество авторов, что связано с двумя факторами. Во-первых, в препринте приведено описание всех систем комплекса, в создании и модернизации которых почти 30 лет принимал участие коллектив нескольких лабораторий, а во-вторых, в связи с тенденцией двух последних десятилетий количество публикаций стало важной частью аттестации научного сотрудника. Тем не менее, приведенный выше список авторов не включает многих сотрудников, работавших в первые годы выполнения программы модернизации. Это сотрудники, которые по тем или иным причинам к моменту написания указанного выше препринта уже не работали в ИЯФ или переключились на другую тематику внутри ИЯФ, но внесли важный, а некоторые определяющий вклад в*



И.Я. Протопопов

модернизацию комплекса. К числу таких сотрудников следует отнести *И.Я. Протопопова, А.А. Жоленца, Г.А. Корнюхина, Б.В. Левичева, П.Д. Воблого, Ю.И. Эйдельмана, Г.Я. Кезерашвили, М.М. Карлинера, И.А. Шехтмана, В.Е. Пелеганчука, Е.П. Мельникова, А.Н. Дубровина, С.П. Петрова, Б.А. Баклакова, А.В. Филипченко, Э.И. Горникера, А.И. Наumenкова, Б.М. Смирнова, Ю.Г. Матвеева, Е.Н. Харитонова, М.Ю. Фомина, В.А. Корчагина, П.А. Дурнова, А.С. Калинина, В.Г. Попова, А.Б. Тёмных, Ю.А. Левашова, С.Ф. Михайлова, Э.М. Трахтенберга.*

В конце главы о ВЭПП-4М дается ограниченный список публикаций по сравнению с указанным выше в препринте. Значительная часть списка работ представлена в виде диссертаций (в том числе упомянутых в препринте), так как в них подробнее изложен материал и, кроме того, ещё раз упоминаются сотрудники, внесшие существенный научный вклад в модернизацию и работу комплекса.

Модернизация комплекса началась с 1987 года, когда были приняты окончательные решения по его физической программе и, соответственно, его структуре. На первом этапе восстановления комплекса руководителем работ был один из создателей ВЭПП-4 И.Я. Протопопов,



**Рис. 1.** Молодое поколение физиков. Впереди у них новые коллаидеры. Слева направо: 1-й ряд – Е. Старостина, К. Карюкина, И. Морозов, М. Скамароха, В. Борин, Г. Баранов, В. Дорохов, 2-й ряд – С. Синяткин, И. Окунев, А. Богомяков

конструкторские работы велись под руководством Г.А. Корнюхина. Основной состав участников этого этапа представляли физики и инженеры как ускорительной, так и радиофизической лаборатории, создававшие ранее ВЭПП-4. Постепенно со временем на комплекс приходили новые сотрудники, в основном молодые физики и инженеры, окончившие НГТУ и НГУ.

Обновлялся и состав радиофизической лаборатории, играющей важную роль в развитии комплекса. В этих условиях продолжалась модернизация с одновременным проведением ускорительных и после ввода детектора КЕДР физических экспериментов. Фактически комплекс стал школой для нового поколения ускорительщиков. С 2000 года руководителем лаборатории стал Е.Б. Левичев, ведущий ускорительный курс для студентов НГТУ. С целью повышения и разграничения ответственности им внутри лаборатории были организованы структурные подразделения-сектора.



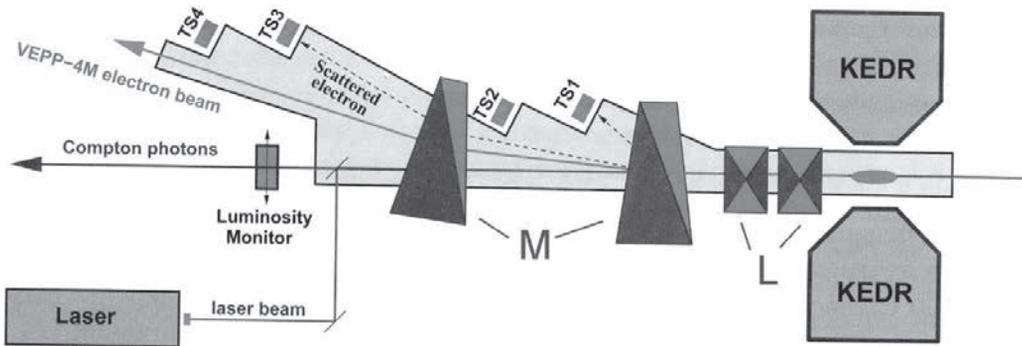
**Рис. 2.** Руководство комплекса ВЭПП-4М. Обсуждаются текущие проблемы. Слева направо: А.Н. Журавлев, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков, П.А. Пиминов

## 1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Пожар вывел из строя практически все системы комплекса. Часть из них было решено восстанавливать практически в старом виде, однако большинство установок комплекса в соответствии с новыми физическими программами и практической целесообразностью было существенно модернизировано. Естественно, модернизация в первую очередь затронула магнитную систему коллайдера.

Ещё до пожара серьёзно рассматривалось несколько вариантов возможной модернизации магнитной системы комплекса, в первую очередь для таких физических задач, как монохроматизация энергии взаимодействия или получение встречных пучков с продольной поляризацией. Изучалась также возможность реализации в туннеле ВЭПП-4 варианта В-фабрики. Планировалось до подготовки варианта модернизации еще несколько лет поработать в исходном варианте со старым детектором МД-1. К этому времени были начаты работы по созданию нового детектора с продольным магнитным полем. Однако пожар спутал и ускорил все планы – нужно было срочно решать, что делать дальше. В итоге после многих обсуждений было принято решение: в физиче-

ской программе оставить и улучшить возможности для экспериментов по двухфотонной физике при существенном повышении светимости [1]. Повышение светимости могло бы обеспечить также проведение и других экспериментов, в частности, прецизионных, основанных на использовании поляризованных пучков. А. Бондарем, А. Жоленцом и А. Чилингаровым была предложена структура промежутка, обеспечивающая регистрацию рассеянных электронов (позитронов), далее называемых РЭ, с измерением их энергии и не использующая детектор с поперечным магнитным полем, как это было на ВЭПП-4 с детектором МД-1 [2]. В этой схеме оказалось возможным установить детектор с продольным магнитным полем и приблизить фокусирующие линзы к месту встречи. Эти линзы и установленные после них поворотные магниты (по два с каждой стороны) представляют собой спектрометры, измеряющие с помощью расположенных в них систем регистрации спектр РЭ (рис. 3). Элементы системы регистрации РЭ расположены внутри накопителя вдоль вакуумной камеры на удалении 9-17 метров от места встречи. На каждом направлении имеются 4 позиции для регистрации РЭ. Каждой позиции соответствует свой диапазон энергий РЭ, которые благодаря поворотным магнитам выходят из вакуумной камеры и фокусируются на координатные счетчики (TS1-TS4) системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ). Счетчики определяют радиальные координаты РЭ, что позволяет однозначно определить их энергию. Для калибровки СРРЭ было предложено использовать обратное комптоновское рассеяние (ОКР) на пучке лазерных фотонов [3], о чем будет изложено ниже.

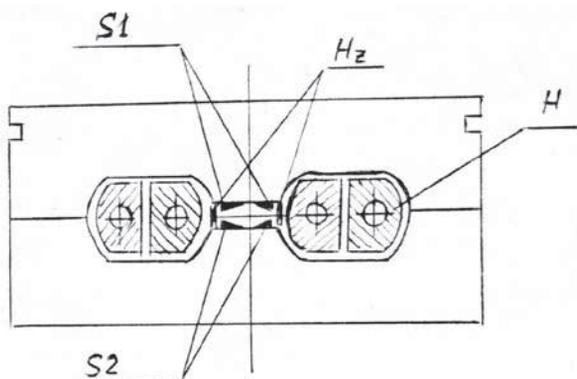


**Рис. 3.** Схема электронной части спектрометра: L – фокусирующие линзы, M – магниты спектрометра, TS1-TS4 – координатные счетчики для регистрации рассеянных электронов

Важнейшим моментом модернизации стала симметризация магнитной структуры относительно центра промежутков. В старом коллайдере ВЭПП-4 магнитная структура не могла быть симметричной, так как промежутки были введены в разрыв структуры ФОДО с раздвижкой полуколец для создания промежутков. Для симметризации оптики северное полукольцо были перевернуто относительно радиального на-

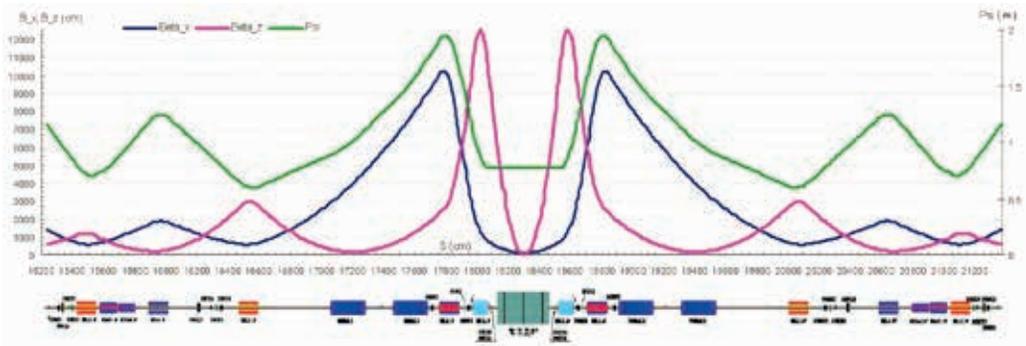
правления, что сделало всю структуру зеркально симметричной относительно оси, проходящей через центры прямолинейных промежутков. Из полуколец, прилегающих к экспериментальному промежутку, было убрано ещё по одному магниту ( $1/2$  элемента периодичности), что позволило удлинить этот промежуток и облегчить создание необходимой оптики промежутка. Новый детектор КЕДР был поставлен в центр экспериментального промежутка, в то время как старый детектор МД-1 был смещен от центра промежутка в сторону северного полукольца на 2,3 метра. Была проведена симметризация и технического промежутка, его центр был сдвинут также на 2,3 метра в сторону северного полукольца. Изменилось расстояние между дублетами технического промежутка, его центральная свободная от линз часть была укорочена по сравнению с боковыми. Соответственно, пришлось передвинуть часть элементов впускного канала и переставить резонаторы. На концах промежутка были установлены 5 полюсные градиентные виглеры. Эти виглеры были получены посредством разрезания пополам старого 9-полюсного виглера, установленного ранее в экспериментальном промежутке. Функция этих виглеров – перераспределение декрементов затухания бетатронных и синхротронных колебаний.

В процессе работы ВЭПП-4 ещё до пожара вышла из строя значительная часть коррекций квадратичной нелинейности, заложенных в линзовой части элементов периодичности. Её восстановление в старом виде не представлялось возможным, поэтому было принято другое решение. На плоском участке длиной 34 см, прилегающем к линзовой части, был увеличен межполюсной зазор с 30 до 38,6 мм, и в образовавшееся пространство между полюсом и вакуумной камерой на всю ширину полюсов были установлены две клинообразные шины (рис. 4), образующие токовые витки на верхнем (S1) и нижнем (S2) полюсах. При одинаковой полярности токов в верхнем и нижнем витках в магнитах создается квадратичная нелинейность того или другого знака в зависимости от направления тока. Правда, одновременно изменяется и величина поля на этом участке. При разной полярности токов в верхнем и нижнем витках возбуждается поле повернутого квадрупольа. Каждая из четырех групп этих витков (верхние и нижние в D и F-магнитах), включенных последовательно, запитана от отдельного источника. Задавая отличающиеся значения токов в верхнем и нижнем витках, можно одновременно управлять хроматизмом и величиной связи радиальных и вертикальных бетатронных колебаний.



**Рис. 4.** Размещение секstupольных (S1, S2) коррекций и коррекций основного поля ( $H_z$ ) в плоской части магнита

В новой схеме экспериментального промежутка (рис. 5) удалось уменьшить вертикальную бета-функцию в месте встречи до 5 см. В созданной оптике в месте встречи получилась большая величина радиальной  $\psi$ -функции, так что энергетический размер пучка в месте встречи превышает бетатронный. Это также наряду с уменьшением  $\beta$ -функции способствовало увеличению светимости, естественно, при одновременном увеличении числа частиц в сгустке. Всего в промежутке установлено 10 линз (по 5 с каждой стороны). На концах экспериментального промежутка симметрично установлены трехполюсные магнитные змейки ZM, обеспечивающие на низкой энергии увеличение декрементов затухания и управление размерами и энергетическим разбросом сгустков. Еще ближе к полукольцам расположены дополнительные магниты EM3, основная функция которых – исключить попадание жесткого синхротронного излучения из змеек в камеры полуколец и направить его на приемники излучения. Благодаря симметрии оказалось возможным уменьшить число источников питания, так как симметричные элементы можно было запитать последовательно от одного источника.



**Рис. 5.** Схема экспериментального промежутка

Правда, в техническом промежутке, ставшем также симметричным, число источников питания линз пришлось увеличить с 2 до 4, так как в дублетах фокусирующие и дефокусирующие линзы запитаны от разных источников. Кроме того, здесь добавились источники питания двух градиентных виглеров, размещенных на концах технического промежутка (рис. 6).

В середине полуколец вместо двух элементов периодичности были организованы эквивалентные по оптике вставки, состоящие из 4 магнитов и 4 линз с увеличенной апертурой. В магнитах установлены пластины для локального электростатического разведения орбит электронов и позитронов, что позволило реализовать режим  $2 \times 2$  сгустка. В конструкции магнитов и линз вставок была заложена возможность вывода синхротронного излучения из поворотных магнитов и установленной во вставке северного полукольца трехполюсной (позднее 9-полюсной) змейки. Для размещения каналов СИ и экспериментального оборудования в прилегающей к северному полукольцу области был сооружен бункер.

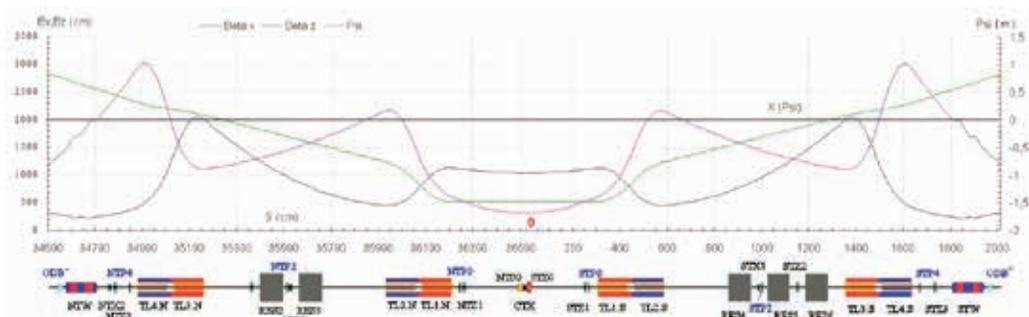


Рис. 6. Схема технического промезутка

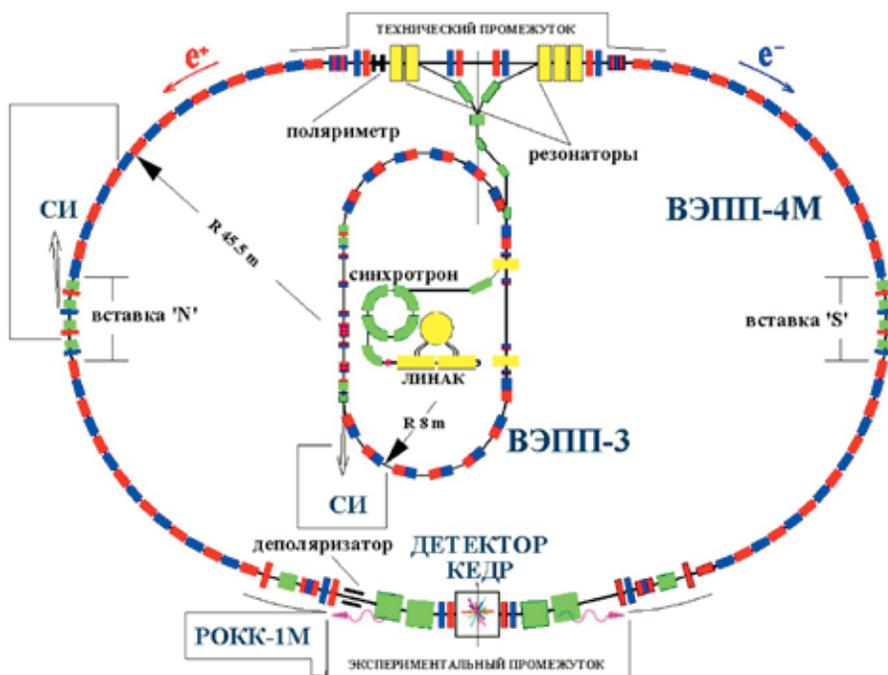


Рис. 7. Схема комплекса ВЭПП-4М

## 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ДРУГИХ СИСТЕМ

Помимо магнитной системы предстояло восстановление и модернизация других систем. Первый этап восстановления и модернизации, затронувший в основном магнитную структуру, высокочастотную систему, канал от ВЭПП-3 к ВЭПП-4, систему выпуска-впуска, системы питания и управления и, естественно, инжекционную часть комплекса (установку «ПОЗИТРОН» и ВЭПП-3), был завершен в конце 1991 года. 27 ноября 1991 года в кольце ВЭПП-4 впервые после пожара был получен захват электронного пучка. В дальнейшем модернизация продолжалась как по ходу подготовки к экспериментам по физике высоких энергий, так и в период проведения этих экспериментов с использованием «окон», связанных с вводом в строй детектора КЕДР.

Перечислим кратко основные моменты модернизации других систем комплекса.

### 2.1. КАНАЛ ВЭПП-3-ВЭПП-4М. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ [4, 5]

В связи с изменением расстановки линз технического промежутка возникла необходимость подвижки части канала, находящейся в 15 здании. Одновременно была изменена схема инжекции. Вместо одного впускного магнита с углом поворота  $10^\circ$  с септумом 6 мм, были установлены два: десятиградусный с септумом 6 мм и одноградусный с септумом 1,2 мм. К сожалению, несмотря на существенное улучшение условий инжекции, режим накопления не был реализован из-за большого эмиттанса впускаемого пучка, малого вертикального акцептанса ВЭПП-4М и коллективных эффектов взаимодействия циркулирующего и впускаемого пучков. Установлена новая система наблюдения за пучками в канале, основанная на датчиках тока изображения [6], не разрушающих пучок. В процессе восстановления была реализована существенная модернизация всех систем впуска-выпуска комплекса и система быстрого сведения пучков в области взаимодействия.



**Рис. 8.** О. Анчугов и Д. Шведов.  
У них единица измерения времени – наносекунда

### 2.2. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ ВЭПП-4М И ВЭПП-3 [7, 8, 9]

Вместо прежней кратности частоты ускоряющих резонаторов ВЭПП-4 ( $q=221$ ) была принята другая ( $q=222$ ), что было необходимо для организации двухгусткового режима. В техническом промежутке установлено 5 резонаторов прежней конструкции, но существенно доработанных в связи с переходом на новую частоту. Новые генераторы построены на отечественных лампах ГУ-101А. Разработана модульная конструкция генератора, обеспечивающая сложение мощностей от нескольких ламп. В отличие от старой ВЧ-системы на лампах ГИ-50, установленных около резонаторов, модули установлены в защищенном зале. Выходные каскады модулей подключаются к волноводу, к которому ранее был подключен Гирокон, далее мощность передается по этому волноводу в радиационноопасное помещение и через коаксиальные переходы подается в резонаторы. Один подключенный к волноводу мо-

дуль дает мощность 500 квт, что обеспечит получение энергии пучков 5,3 ГэВ. Планируемая мощность ВЧ-системы до 1 Мвт будет достаточна для получения 6 ГэВ. Улучшена до  $10^{-8}$  стабильность частоты, что очень важно для проведения прецизионных экспериментов. Основные разработчики новой ВЧ системы: Э.И. Горникер, Г.Я. Куркин, В.М. Петров, И.К. Седяров. Модульная конструкция построения генератора со сложением мощности от нескольких генераторных ламп оказалась весьма удачной и нашла применение и в других установках: на созданном в ИЯФ ЛСЭ на основе ускорителя-рекуператора, на накопительном кольце Сибирь-2 в Курчатовском институте, на ЛСЭ в DUKE (США).

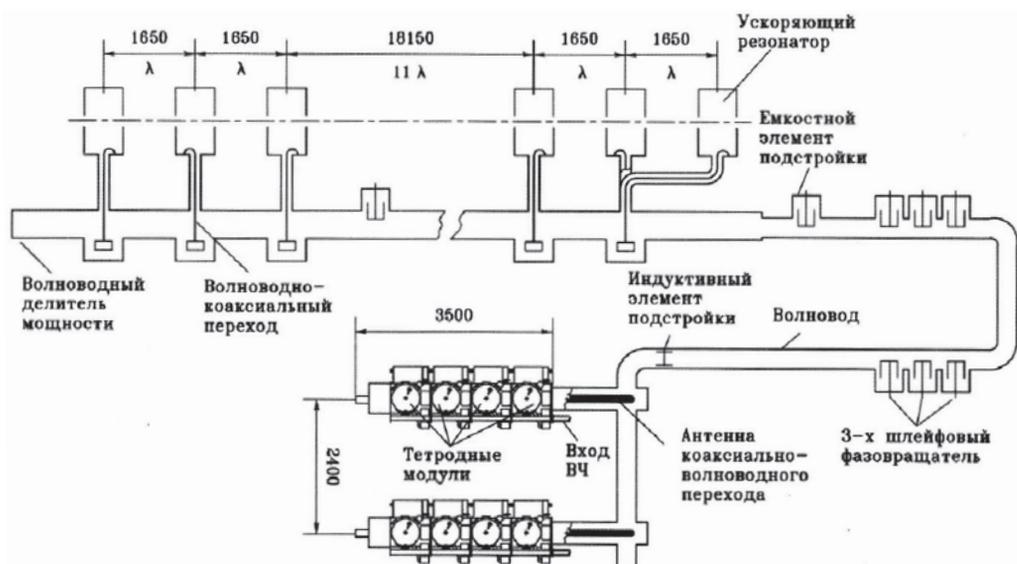


Рис. 9. ВЧ-система ВЭПП-4М, построенная на лампах ГУ-101А

Рис. 10. Два модуля ВЧ-системы и часть команды ВЧ-спецов. Слева направо: В.М. Петров (вмонтирован), Е.В. Козырев, Г.Я. Куркин, С.Д. Гуров, И.К. Седяров, А.М. Пилан, А.А. Кондаков



В связи с переходом к 2-сгустковому режиму на ВЭПП-4М потребовался перевод бустера ВЭПП-3 также в 2-сгустковый режим. Для этого была переделана высокочастотная система 1-й гармоники на 2-ю, а 19-й гармоники на 18-ю [9].

### 2.3. СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ [10, 11]

Проведена модернизация системы питания магнитных элементов коллайдера. Вместо ГПН для питания магнитов полуколец используются 3 параллельно включенных источника ИСТ-М, созданных на базе ранее используемых ИСТРов с заменой старой системы управления и контроля на современную. Для долговременной стабилизации поля полуколец и подавления медленных уходов в системе питания создан дополнительный контур обратной связи по полю, в который включен прецизионный ЯМР-магнитометр. Г.В. Карповым была разработана и изготовлена серия современных прецизионных ЯМР магнитометров на основе импульсных методов. Импульсные методы широко распространены в ЯМР спектроскопии и ЯМР-томографии. В основе метода, используемого в магнитометрах, лежит воздействие на образец с рабочими ядрами (чаще всего протонами) помещенного в магнитное поле радиочастотного импульса с частотой заполнения, близкой к частоте ЯМР, связанной с индукцией магнитного поля через гиромагнитное отношение, являющейся свой-

ством ядер и известной с хорошей точностью. По окончании импульса регистрируется сигнал «спада свободной индукции» и находится его частота, которая и является искомой частотой ЯМР. Точность магнитометра составляет порядка  $10^{-6}$  и лучше для однородных полей.



**Рис. 11.** Г.В. Карпов.  
Настройка ЯМР-магнитометра

В цепь питания последовательно с элементами периодичности полуколец включены магниты вставок в полукольцах, линзы каждой вставки запитаны последовательно от отдельного источника ИСТ-М. Для точного согласования оптики вставок введено регулируемое шунтирование катушек 3 линз. Источники ИСТ-М также используются для питания и магнитов и части линз экспериментального промежутка, градиентных виглеров и систем коррекции градиентов и секступольных коррекций в полукольцах. Имеется набор менее мощных источников

питания В-1000, В-300, ТИР, УМ-4, предназначенных для питания линз технического промежутка, оставшихся линз экспериментального промежутка и слаботочных коррекций. Управление и контроль всех источников питания переведены на ЦАПы и АЦП нового поколения. Работа по повышению надежности, точности и стабильности источников питания продолжается силами как радиотехнической лаборатории (В.В. Колмогоров, А.С. Медведко, В.Р. Козак, О.В. Беликов, Б.А. Довженко), так и службами комплекса ВЭПП-4М. Запланирована покупка мощных выпрямительных источников питания для полукоец ВЭПП-4М и ВЭПП-3. Это позволит обеспечить получение энергии 6 ГэВ на ВЭПП-4М и заменить выработавший свой ресурс ГПН на ВЭПП-3.

**Рис. 12.** А.А. Жмака, С.П. Васичев, В.В. Свищев. Их задача – обеспечить стабильность и надежность около 400 источников питания



#### 2.4. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ [12, 13]

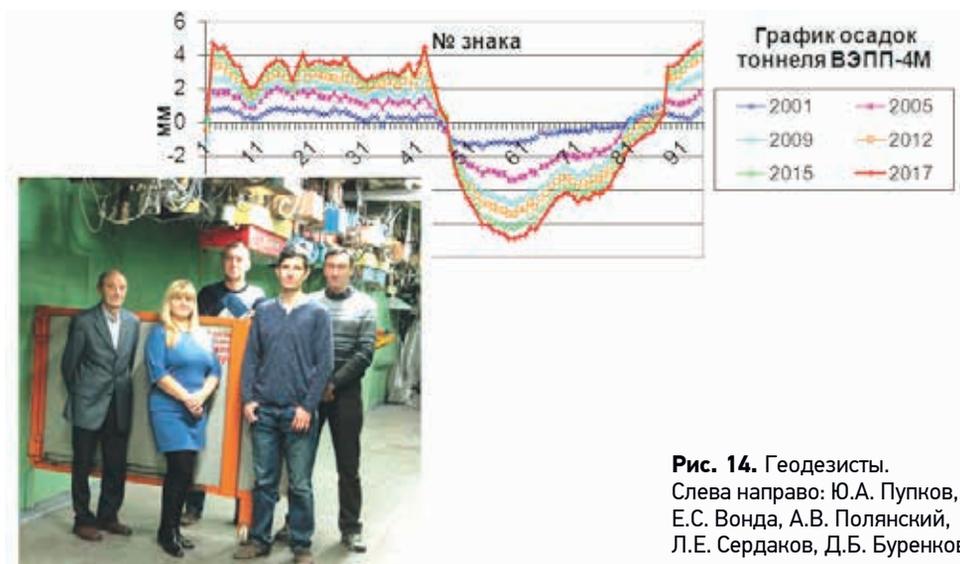
Проведение прецизионных экспериментов существенно повысило требования к температурному режиму всего оборудования комплекса и, прежде всего, к стабильности температуры магнитных элементов. Для выполнения этой задачи были разработаны новые системы измерения температуры элементов. Созданная в последние годы система термоконтроля имеет около 700 точек наблюдения и обеспечивает не только измерение температуры, но и защиту оборудования с предварительным звуковым оповещением. Система построена на современной элементной базе с использованием цифровых термодатчиков с абсолютной точностью 0,5 градуса и разрешением 0,06°C и подключена к компьютерной сети комплекса. Стабилизация температуры технической воды обеспечивается «тепловым насосом», стабилизация температуры дистиллята и, соответственно, магнитов полукоец ВЭПП-4 – с помощью устройств регулирования расхода технической воды, подаваемой в теплообменник. Суточная стабильность ~0,1°C. Для обеспечения продольной устойчивости пучка в ВЭПП-4 требуется точное поддержание частоты высших мод в резонаторах. Это накладывает жесткие требования на стабильность их температуры. Для резонаторов на базе промышленных PID-регуляторов-подогревателей и автономного контроллера была создана система стабилизации охлаждающего дистиллята. Полученная точность стабилизации температуры резонаторов составляет 0,2°C.



**Рис. 13.** Термостабилизация – важная часть прецизионных экспериментов. Слева направо: А.А. Волков, В.М. Цуканов, О.А. Плотникова, И.И. Морозов

## 2.5. ГЕОДЕЗИЯ [14, 15]

Полностью обновлена система геодезического мониторинга. Разработаны новые алгоритмы выставки магнитных элементов, упрощающие требования на точность установки. Произошел переход на новую инструментальную и методическую базу, основанную на использовании лазерного оборудования. Всё это обеспечило повышение точности и уменьшение времени измерений. Проводится ежегодный мониторинг положения геознаков туннеля. За годы эксплуатации комплекса произошла заметная осадка туннеля (см. ниже) в части южного полукольца. В лаборатории создана высококвалифицированная группа геодезистов, успешно решающая геодезические проблемы крупных установок не только в ИЯФ, но и за его пределами.



**Рис. 14.** Геодезисты. Слева направо: Ю.А. Пупков, Е.С. Вонда, А.В. Полянский, Л.Е. Сердаков, Д.Б. Буренков

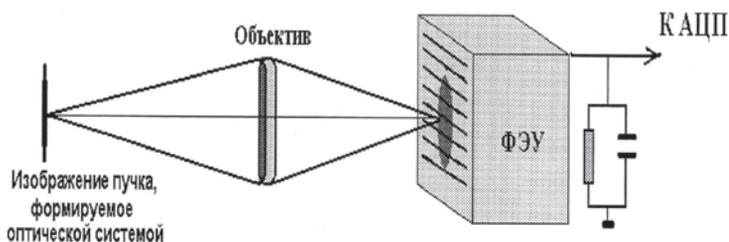
## 2.6. ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ [16, 17, 18]

Существенные улучшения проведены в системах диагностики. В промежутки ВЭПП-4 и вставок установлены новые пикапы с электродами в виде небольших дисков. Эти пикапы хорошо согласованы и слабо влияют на импеданс.

Усилиями Е. Бехтенева и Г. Карпова модернизирована электроника всех пикапов, как старых, так и новых. В настоящее время в ИЯФ для всех накопителей разработана и изготовлена новая электроника систем измерения положения пучка на современной электронной компонентной базе. Характерной особенностью данной электроники является использование АЦП для каждого электрода каждого пикапа. Это позволяет проводить полноценные поворотные измерения всеми пикапами накопителей, что значительно увеличивает возможности настройки и оптимизации работы накопителей. В ИЯФ разработаны несколько типов электроники пикапов, подходящих для разных накопителей. Так, разработанная в ИЯФ электроника системы измерения положения пучка ВЭПП-4 обладает высоким временным разрешением и позволяет отдельно измерять положение пучков электронов и позитронов, отстоящим по времени до 20 нс. Учитывая, что электроны и позитроны в ВЭПП-4 движутся в одной вакуумной камере, это позволяет измерять траектории пучков пикапами, находящимися вблизи мест встречи. Для накопителей, где нет встречных пучков, таких, как ВЭПП-3, разработана электроника с повышенной точностью на основе так называемой «матрицы ключей», позволяющая измерять положение пучка с разрешением порядка 1 микронметра и лучше. Находящаяся на входе блока электроники «матрица ключей» позволяет подключать любой из 4 электродов пикапа к любому из 4 каналов обработки сигналов. Это устраняет погрешность измерений, связанную с неодинаковостью и нестабильностью коэффициентов передач каналов и значительно повышает точность измерений.

Для управления системами измерения положения пучка разработано современное программное обеспечение на основе EPICS, позволяющее вести непрерывный круглосуточный мониторинг результатов измерений, а также настраивать и тестировать каждый блок электроники. Накопленный в ИЯФ опыт по разработке систем измерения положения пучка позволяет уверенно смотреть в будущее в плане создания аналогичных систем для будущих накопителей заряженных частиц ИЯФ, таких, как ст-фабрика.

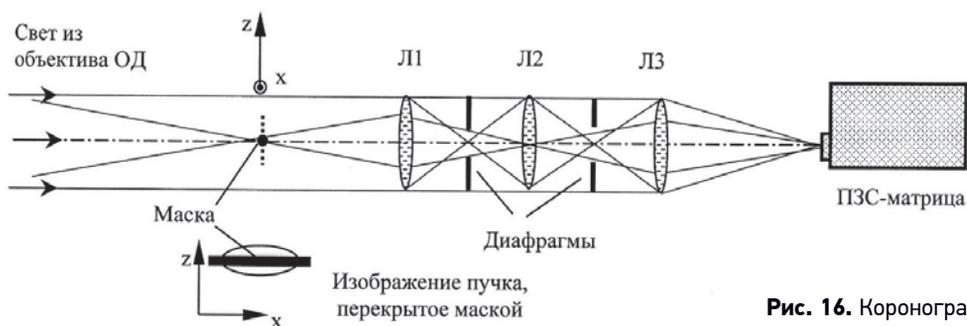
Новое дыхание получили системы оптического наблюдения благодаря работе О.И. Мешкова и А.Н. Журавлева. Внедрены новые уникальные методики наблюдения параметров пучков. Для получения двумерного изображения пучка используется ПЗС-камера (700x500 ячеек), которая позволяет измерять размеры пучков и их положение в течение 100 оборотов. Для быстрого поворотного измерения профиля и положения пучка установлен шестнадцатианодный ФЭУ, на который спроектировано изображение поперечного сечения пучка.



**Рис. 15.** Оптическая схема и расположение анодов ФЭУ относительно пучка

Аппаратура, созданная на его основе, позволяет наблюдать профиль пучка в процессе инжекции или возбуждении когерентных колебаний, регистрируя за один цикл 130 тыс. профилей. Созданный прибор обеспечивает более высокую чувствительность по сравнению с электростатическим пикапом при изучении спектра колебаний пучков и дает возможность наблюдать не только положение центра тяжести пучка, но и его размер. Прибор позволяет вести непрерывный мониторинг малых фазовых колебаний, что важно при проведении прецизионных экспериментов.

С использованием ПЗС-матриц был создан новый прибор коронограф, позволяющий измерять распределение плотности частиц на больших амплитудах, что представляет интерес для изучения механизмов потерь частиц.



**Рис. 16.** Коронограф

Для увеличения разрешения при оптических измерениях поперечных размеров полезно было перейти в рентгеновскую область. Созданная для этой цели многоточечная рентгеновская камера-обскура используется для прецизионной стабилизации положения пучка в области встречи. В последнее время в арсенале диагностик появился ещё один инструмент—streak-камера с разрешением 1 пикосек и новой конструкции ф-диссектор с разрешением 1,7 пикосек. Это дает новые возможности для изучения продольной динамики частиц.

Расширение и обновление диагностики повысило возможности оперативного контроля параметров пучков и позволило провести большой цикл экспериментов. Однако следует отметить, что имеющиеся возможности систем диагностики пока не полностью реализованы для проведения ускорительных экспериментов.

## 2.7. УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ [19, 20, 21]

Во время пожара электроника управления либо была полностью уничтожена, либо вышла из строя. У разработчиков естественно возникло желание не восстанавливать её в старом виде, а использовать новые идеи и разработки, появившиеся к этому времени. Но, с другой стороны, сложившаяся ситуация требовала скорейшего оживления комплекса. И тут нужно было по каждой системе находить оптимальное решение. О том, как решались проблемы автоматизации на первом этапе восстановления и в последующие годы, рассказывает С.Е. Карнаев:



*– К моменту пожара на комплексе активно осваивалась новая аппаратура в стандарте КАМАК. К этому времени «Одренок» перестал «бодаться», была обкатана специально для него созданная операционная система ОДОС, были задействованы несколько КАМАК-крейтов с электроникой: для управления инжектором Позитрон и для монитора светимости. Пожар полностью уничтожил все, что имело отношение к управлению комплексом: пультовую, электронику и вычислительный центр, где размещались машины ОДРА.*

*Была поставлена задача к лету следующего года восстановить и запустить в действие накопитель ВЭПП-3. И встал вопрос: как строить систему управления? Строить ее нужно было заново. И, если вопрос по части контрольно-измерительной электроники решался очевидно – 6-я лаборатория в конструктиве КАМАК имела в своем арсенале всё, что могло только понадобиться для управления (а чего не имела – была готова разработать), то решение вопроса о компьютерном обеспечении не было столь простым. В институте развивался и иной путь компьютерной автоматизации, который базировался на Электрониках 60 и PDP-11. Кроме того, уже появились персональные компьютеры фирмы IBM. Этот путь привлекал тем, что весь остальной мир шел по нему.*

*Но у ИЯФ всегда была своя дорога, руководство приняло решение: автоматизировать будем на «Одряхах». Во-первых, «Одренок» в то время неплохо смотрелся с точки зрения производительности и обеспеченности периферией: дисками, терминалами, дисплеями. Были планы по увеличению производительности и наращиванию оперативной памяти. Во-вторых, для «Одренка» была создана многозадачная система реального времени ОДОС, вобравшая в себя множество полезных для построения системы управления функций, имелся системный софт для разработки программ и на комплексе работали создатели всего этого хозяйства. В-третьих, за несколько предыдущих лет было наработано большое количество программного обеспечения, которое во время пожара уцелело на магнитных лентах, и была идея, что им можно будет воспользоваться. Наконец, на ВЭПП-4 была команда, которая имела опыт именно на машинах*

ОДРА, и переучивание людей на другую систему, несомненно, заняло бы много времени.

Короче, было принято решение, которое обеспечило не только быстрый ввод в строй накопителя ВЭПП-3, но и дальнейшее (лет на 15) динамичное развитие системы управления, которая успешно решала все задачи по обеспечению проведения экспериментов на комплексе ВЭПП-4. И, если чего-то в этом деле в дальнейшем не ладилось, то системы управления это касалось не в самую первую очередь. В те 80-е годы, когда компьютеры еще только-только появились, никто не предполагал, сколь бурным будет их последующее развитие, что затем придут Linux и Ethernet, что разовьются целые программные комплексы для построения систем управления. Но даже если бы это и предполагали, то все равно выбрали бы «Одренка»!

Работы по созданию новой системы начались сразу, как только удалось организовать рабочие места, оборудованные крейтами с электроникой и «Одрятами». Была заложена структура системы, аналогичная существовавшей до пожара: одна машина управляет инжектором Позитрон, вторая – ВЭПП-3. В дальнейшем для расширения возможностей управления и размещения электроники для ВЭПП-3 было выделено три «Одренка» (магнитная система, ВЧ и диагностика пучка), а для Позитрона – два. Бывшее программное обеспечение было аккуратно скопировано с лент на жесткие диски, которые были подключены к «Одрятам». Были использованы некоторые библиотеки и тексты программ для справки, но в целом все программы пришлось писать заново. Но, главное, была использована опробованная идеология построения программ и методы их взаимодействия.

Поскольку в 13-м здании на тот момент еще шла зачистка, то несколько стоек с аппаратурой были установлены в одном из залов ДОЛа, где сейчас размещается ВЦ ОВС. В течение осени 1985 года и последующей зимы в этом полутемном пустующем помещении А. Темных и С. Карнаев с утра до ночи корпели над прототипами программ новой системы управления. Распределение работ было такое: для ВЭПП-3 программы делали А. Темных и С. Мишнев, а для Позитрона – С. Карнаев и Ю. Эйдельман. Системы были принципиально разные по своим задачам и методам управления, но общие вопросы, например, по конфигурированию аппаратуры, сохранению-восстановлению режимов, обсуждали и реализовывали совместно. Большую роль в организации стендов сыграли В. Козак и С. Тарарышкин, создавшие систему подключения «Одрят» к жестким дискам, С. Белов, настроивший систему подготовки программ, и А. Алешаев, продолжавший совершенствовать ОДОС.

Когда стойками с аппаратурой начала наполняться новая радиопультовая комплекса, работу перевели туда. К написанию программ подключились Е. Симонов, А. Дубровин и другие физики и инженеры. Это было уже весной 1986 года. Затем была оборудована пультовая. И начался процесс, как теперь говорят, интегрированного тестиро-

**Рис. 17.** С.Д. Белов и А.Н. Алешаев



вания, а затем – комишенинга. К маю вся электроника стояла на месте, все кабели были подключены и основные программы написаны. Программы дорабатывались и одновременно проверялись на деле. Такой подход и ранее, и в дальнейшем применяется на комплексе ВЭПП-4: программы пишут люди, работающие с установками и оборудованием, и тут же совместно с другими сотрудниками их проверяют. Некоторые программы для комплекса были разработаны силами 6-й лаборатории. Например, монитор вакуума, написанный В. Юхлиным, еще долго работал в неизменном виде, пока до него не дошли руки сотрудников комплекса. Для управления значительно усложненной в процессе модернизации магнитной системой ВЭПП-3 при ускорении пучка понадобилось использовать обратную связь по положению пучка на двух пикапах, что было реализовано А. Темных и С. Мишневым с использованием двух «Одрят». Для связи между «Одрятами» В. Каргальцевым была разработана дуплексная система, которую А. Алешаев включил в поддержку ОДОС. В качестве одного из достижений автоматизации в это время можно отметить реализацию автоматической настройки элементов инжектора Позитрон: подстройку секций линейного ускорителя и импульсных элементов к заданным значениям. Это позволило полностью автоматизировать процесс смены полярности частиц. Таким образом, к концу 80-х годов ВЭПП-3 надежно работал в автоматическом режиме, обеспечивая проведение экспериментов с использованием СИ, экспериментов с оптическим клистроном и на внутренней мишени.

Огромную роль в создании системы управления на начальном этапе сыграли сотрудники 6-й лаборатории. Ю. Ощепков нарисовал функциональную схему электроники, В. Козак разработал систему подключения к «Одренку» дополнительных крейтов, программное обеспечение для поддержки файлового хозяйства «Одрят» и довел до совершенства текстовый редактор, с помощью которого было написано все программное обеспечение. Разработчики электроники активно участвовали в процессе запуска системы управления, помогали решать все вопросы, связанные с использованием их аппаратуры, вплоть до модификации разработанных ими блоков. С. Тарарышкин,

В. Овчар, А. Леденев, Б. Гудков, А. Смирнов, А. Путьмаков, Э. Купер, А. Батраков, В. Репков – вот далеко не полный перечень специалистов, усилиями которых был создан полнофункциональный набор электроники, который по сей день обеспечивает успешное управление многими системами комплекса.

В последующие пять лет основным шагом развития управления на комплексе можно считать внедрение на ВЭПП-4М ЦАПов с интерполяцией выходного сигнала. Для управления магнитной системой коллайдера ВЭПП-4М предполагалось использовать четыре «Одренка», поскольку возросшие требования к синхронности и точности перестройки магнитной системы не позволяли, используя имеющиеся КАМАК-модули, реализовать управление от одного компьютера. Возникла идея разработать ЦАП с интерполяцией, который бы обеспечивал изменение выходного сигнала по линейной зависимости между двумя заданными значениями за заданное время. Таким образом, от «Одренка» требовалось только заранее задать в ЦАП таблицу значений и в нужный момент стартовать ее отработку. Сотрудники комплекса и 6-й лаборатории совместно выработали требования на такое устройство, и за два года Ю. Заруднев разработал два типа интерполирующих ЦАПов: одноканальный для управления мощными источниками тока и 16-канальный для маломощных источников. Программное обеспечение для управления ВЭПП-4М писали И. Протопопов, С. Карнаев, А. Науменков, Е. Симонов, Д. Шатилов, В. Смалюк. Постепенно был создан программный комплекс, так называемый «автопилот», для автоматического согласованного управления всеми процессами, выполняющимися на всех установках, включая работу детектора КЕДР, что обеспечивает работу комплекса по сценарию без вмешательства оператора. Важной функцией автопилота является автоматическая подстройка светимости при сведенных пучках, что значительно увеличивает набранный интеграл событий в условиях непрерывно меняющихся соотношений токов сведенных пучков. В разработке системы автопилота участвовали С. Карнаев, Д. Шатилов и С. Мишнев. Подробное описание системы управления, сложившейся к середине 90-х годов, изложено в диссертации С.Е. Карнаева [19].

В 90-е годы стало очевидно, что самостоятельное развитие компьютеров в ИЯФ не может конкурировать с мировой индустрией и что в систему управления ВЭПП-4 необходимо интегрировать современные компьютеры, в том числе и в качестве управляющих машин. В это время уже появились Pentium PC, и в ИЯФ широко использовалась операционная система Linux. Основные шаги в этот период: начало использования PC под управлением Linux в качестве графических терминалов и серверных машин и, конечно же, внедрение Ethernet как средства связи между «Одрятами» (разработал адаптер Ethernet-КАМАК И. Белоусов).

Эти шаги в дальнейшем позволили организовать взаимодействие программ, работающих в «Одрятах» и в PC, передавать в

PC данные о состоянии параметров системы управления. Позже, уже в 2000-х, О. Плотникова разработала программное обеспечение для сохранения этих данных в базе PostgreSQL, что дало возможность отслеживать состояние комплекса за длительный период. Стали появляться новые системы, которые подключались уже к PC: распределенная система измерения температур, контроллер для которой разработал В. Каплин, система термостабилизации резонаторов ВЭПП-4 (А. Волков и В. Цуканов), система подавления поперечных колебаний на ВЭПП-4М (Д. Суханов и В. Орешонок), некоторые устройства для диагностики пучка (А. Хильченко, Г. Карпов, Е. Бехтенов). К PC также стали подключать системы, использующие аппаратуру КАМАК. Например, к PC был подключен крейт монитора светимости, что позволило исключить из системы управления одного «Одренка».

С появлением мощных специализированных контроллеров с интерфейсом Ethernet начался новый виток развития, когда в системе управления стали появляться автономные устройства, дающие новое качество управления. Прежде всего, нужно сказать о новых пикап-станциях, заменивших систему, созданную в 80-е годы А. Калинин. Пикап-станции, разработанные Г. Карповым и Е. Бехтеновым, позволяют с высокой точностью (несколько микрон) измерять орбиты всех сзустнов, обращающихся в ВЭПП-4М, выполнять пооборотные измерения координат положения пучка, что обеспечивает моментальное измерение бета-функций в кольце. Кроме того, внедрение новых пикап-станций содействовало интеграции в систему управления программного обеспечения среды EPICS, что является принципиальным моментом для дальнейшего развития системы управления.

Последующая эволюция системы управления ВЭПП-4 будет происходить постепенным вытеснением «Одренка», заменой его на PC. Это медленный процесс, поскольку он требует предварительной подготовки программного обеспечения и контрольно-измерительной электроники, а затем замены электроники и последующей интеграции новых программ. Но именно поэтому этот процесс неизбежен. Существующая электроника, будучи новой 30 лет тому назад, к настоящему времени состарилась и не всегда подлежит ремонту. Производительность и программные возможности «Одренка» не удовлетворяют современным требованиям. Кроме того, не нужно забывать, что комплекс ВЭПП-4 постоянно работает на эксперименты, и проведение любых модернизаций системы управления не может занимать долгое время. Нужно также отметить, что в связи с большим количеством разнообразного оборудования и сложностью решаемых задач управления комплекс ВЭПП-4 является уникальным полигоном для разработки и проверки новых методов управления и диагностики, которые будут востребованы в дальнейшем при создании новых крупных установок.

### 3. РАБОТА С НОВЫМ ИНЖЕКЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ

С конца 2016 г. установка была переведена на режим работы с новым инжекционным комплексом (ИК) ВЭПП-5. В новой системе обеспечения ВЭПП-4 позитронами и электронами инжекция по-прежнему производится через бустер ВЭПП-3. Для улучшения его работы в течение последних лет обновлен ряд систем. В первую очередь, это относится к системам наблюдения за пучками. Новая система электроники пикапов позволяет измерять орбиту с точностью порядка 1 мкм с частотой 200 Гц и пооборотное положение пучка с точностью 5 мкм. С.И. Мишневым создано новое программное обеспечение, позволяющее уменьшить время ускорения в ВЭПП-3, так как при увеличении скорости накопления оно определяет время между циклами перепуска в ВЭПП-4М.

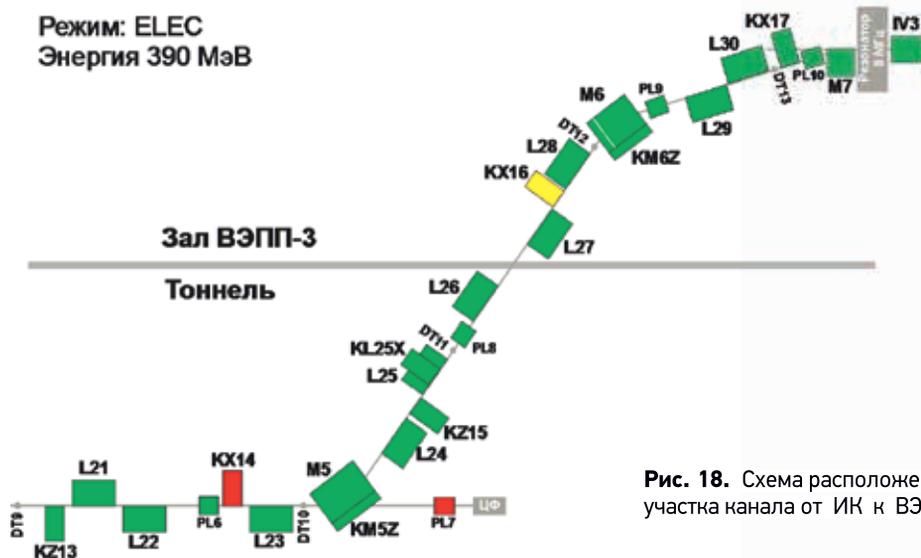


Рис. 18. Схема расположения участка канала от ИК к ВЭПП-3



Рис. 19. Участок подъема канала к ВЭПП-3. Слева направо: А.Н. Журавлев и В.А. Киселев

Полученная на январь 2017 года скорость накопления позитронов в ВЭПП-3 составляет  $1 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ , что на порядок превышает скорость накопления с установкой ПОЗИТРОН.

## 4. УСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА. СВЕТИМОСТЬ

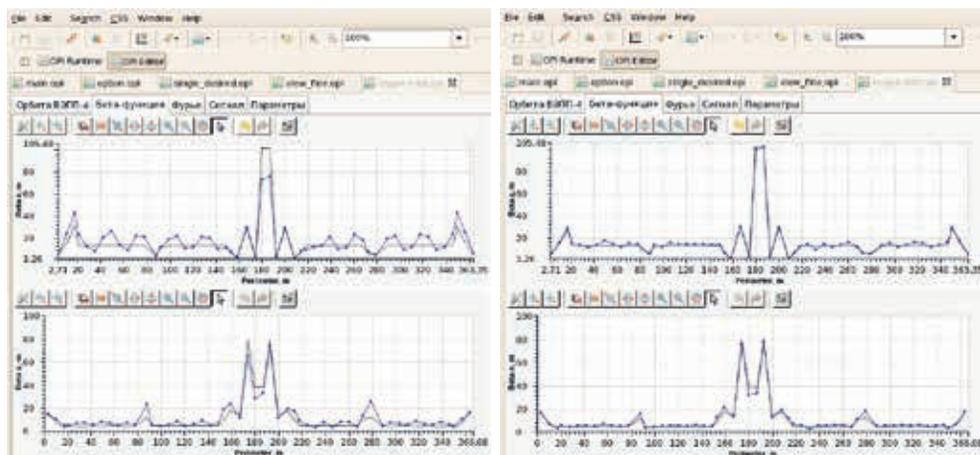
Важной частью модернизации комплекса было проведение программ, обеспечивающих не только его функционирование и улучшение его параметров, но и постановку ускорительных экспериментов, направленных в итоге на повышение светимости. Следует также отметить и другую важную сторону проведенных исследований: глубокое понимание динамики частиц в такой сложной машине, как ВЭПП-4М, является залогом успеха в программе сооружения следующего поколения коллайдеров с высокой светимостью, например, разрабатываемой в ИЯФ с-тау фабрики.

### 4.1. НАСТРОЙКА ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КОЛЬЦА

Новая электроника пикап-станций и, соответственно, новое программное обеспечение создали возможность оперативного измерения и коррекции оптической структуры коллайдера. Метод измерения бета-функции основан на измерении амплитуд колебаний в местах расположения пикапов после удара кикером. На рис. 21 приведены значения  $\beta$ -функций до (вверху) и после одной градиентной коррекции. Время измерения  $\beta$ -функции 1 сек, время одной итерации 1 мин. Таких коррекций обычно проводится несколько, что позволяет за разумное время выправлять оптику кольца.



**Рис. 20.** Е.А. Симонов (слева) и Д.Н. Шатилов – создатели программы коррекции оптики и многого другого



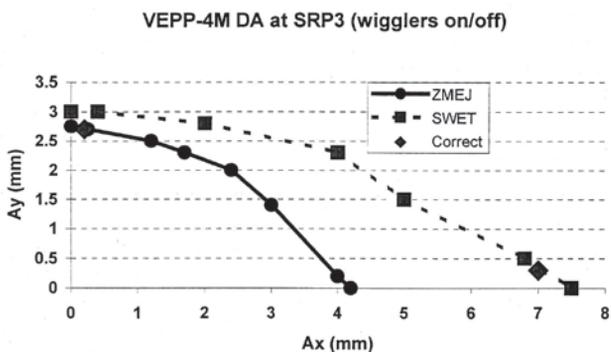
**Рис. 21.** Оптические функции до (слева) и после одnorазовой коррекции (справа)

## 4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПУЧКА [22, 23]

Изучение нелинейных эффектов в бетатронном движении частиц является необходимой составляющей работы по получению проектных параметров коллайдера (интенсивности пучка, светимости и т.д.). Эта работа велась в несколько этапов, и по мере появления новых идей или нового инструментария проводился очередной цикл экспериментов. Основная задача таких экспериментов: измерение динамической апертуры и поиск способов её увеличения. Известно, что динамическая апертура определяется влиянием нелинейных резонансов, поэтому на первом этапе были проведены эксперименты по изучению нелинейных резонансов вблизи рабочей области по частотам бетатронных колебаний. Развитый в последние десятилетия гамильтонов формализм позволяет математически описать нелинейные эффекты, а численное моделирование получить более конкретные результаты. Хотя основные нелинейные элементы заложены в структуру накопителя, в ВЭПП-4М, имеющем длинную историю, не все нелинейности магнитных элементов точно измерены, и это требовало экспериментального изучения.

Первым этапом было изучение движения частиц вблизи конкретных резонансов. Экспериментально исследована динамика пересечения вертикального нелинейного резонанса  $3Q_y=23$ . Исследованы фазовые траектории движения, образование областей автофазировки, потери частиц в зависимости от скорости пересечения резонанса, нелинейный сдвиг и др. Полученные результаты демонстрируют хорошее понимание нелинейных явлений и их влияние на динамику частиц. В частности, удалось разделить вклад октупольной и секступольной компонент в зависимость бетатронной частоты от амплитуды.

Проведен цикл экспериментов по изучению динамической апертуры разными методами: а) возбуждением бетатронных колебаний предельной величины с помощью кикера с одновременным измерением быстрым пикапом максимальной величины отклонения; б) измерением времени жизни пучка при ограничении апертуры подвижными диафрагмами; в) измерением «тушековского» времени жизни в зависимости от напряжения на резонаторе, как это делалось на ВЭПП-2М. Было об-



**Рис. 22.** Влияние змейки на динамическую апертуру ( $E=1,8$  ГэВ,  $H_{zmej} = 1,8$  Тл). Коррекция октуполями (correct, показаны 2 точки) позволяет увеличить величину апертуры до исходной (без змейки)

наружено сильное зарезание радиальной апертуры, связанное с возмущениями, вызываемыми, прежде всего, секступольными линзами, расположенными вблизи детектора. Перераспределение сил, компенсирующих хроматизм линз, из промежутка в кольцо, дало примерно полторакратное увеличение радиальной апертуры. Однако здесь необходимо позаботиться и о величине хроматизма бета-функции в месте встречи, что важно для эффектов встречи и проведения прецизионных экспериментов. Было проведено изучение влияния змеек на величину динамической апертуры. Как и следовало ожидать, обнаружилось уменьшение вертикальной и радиальной апертуры, которое удалось частично скомпенсировать с помощью октупольных линз (рис. 22).

### 4.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПУЧКА

Знание величины разброса важно при проведении прецизионных экспериментов. Обычно величина энергетического разброса определяется из измерений радиального и продольного размеров пучков. Для сравнения было опробовано еще два метода измерения. Первый основан на изучении спектра синхробетатронных резонансов. В спектре бетатронных колебаний, возбужденных после удара по пучку, кроме основного пика есть сателлиты. Их величина зависит от хроматизма и энергетического разброса. Для измерения спектра использовался многоанодный ФЭУ. Из анализа спектра, полученного путем дискретного преобразования Фурье, можно вычислить величину энергетического разброса [18]. Второй способ основан на измерении края спектра обратно-рассеянных комптоновских квантов, о чём будет сказано ниже.

### 4.4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ИМПЕДАНСОВ И СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ [24-29]

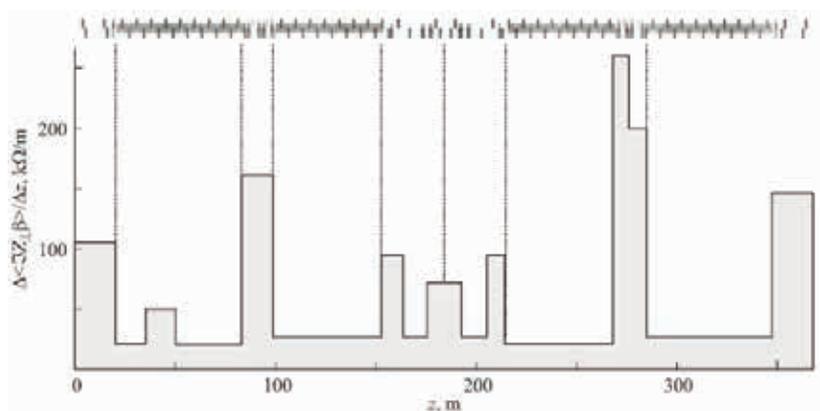
Знание величин импедансов необходимо для понимания коллективных явлений, определяющих предельные значения токов. Продольный импеданс, с которым связаны когерентные потери и длина сгустка, измерялся по сдвигу равновесной фазы сгустков в зависимости от ускоряющего напряжения и тока пучка. Было экспериментально показано, что наблюдаемое удлинение сгустка связано с продольным импедансом и определяются искажением потенциальной ямы и микроволновой неустойчивостью. Для изучения резистивной части поперечного импеданса использовалась зависимость времени быстрого затухания от тока и хроматизма. Реактивная часть поперечного импеданса определялась по когерентному сдвигу бетатронной частоты в зависимости от тока. Оригинальная методика нахождения распределения поперечного импеданса была предложена и опробована на ВЭПП-4М В. Киселевым и В. Смалюком.

Суть методики заключается в создании бампов на разных азимутах и измерении возмущения равновесной орбиты в зависимости от тока сгустка. Анализ этого возмущения позволяет оценить величину



**Рис. 23.** В.В. Смалюк

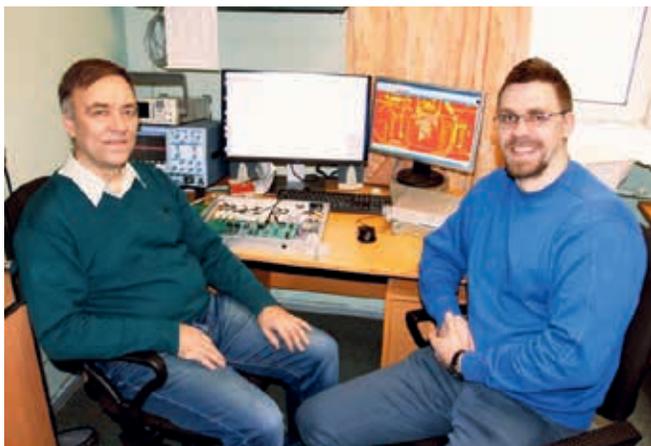
импеданса в месте бампа. Изучение импедансов явилось важным шагом в разработке систем подавления неустойчивостей с помощью обратных связей.



**Рис. 24.** Измеренное распределение вертикального импеданса вдоль орбиты

После постановки пластин разведения во вставках полуколец произошло существенное увеличение импеданса. Поэтому проблема получения токов в десятки миллиампер обострилась. Это относится как к поперечной, так и к продольной неустойчивости. Были приняты меры по созданию систем обратных связей (ОС) для подавления поперечных и продольных неустойчивостей. Важный вклад в понимание механизма возникновения поперечной неустойчивости внес М.М. Карлинер, что позволило провести численное моделирование и обеспечить разработку соответствующей аппаратуры. В кольцо были установлены кикеры и специальные пикапы, и создана на цифровой основе соответствующая электроника. В системе ОС по вертикали в качестве датчиков и кикеров используются согласованные полосковые линии. Свойство направленности полосковых линий позволяет разделить сигналы от электронов и позитронов и обеспечить раздельное воздействие кикера на электроны и позитроны. Системы обратной связи введены в эксплуатацию и работают с двумя сгустками электронов и позитронов. Для увеличения

**Рис. 25.** Создатели систем поперечной (ОС) Д. Суханов и В. Орешонок



захваченного тока оказалось полезным использовать поперечную ОС для подавления вертикальных когерентных колебаний после инъекции. Ввод новой малошумящей электроники позволил улучшить устойчивость работы системы.

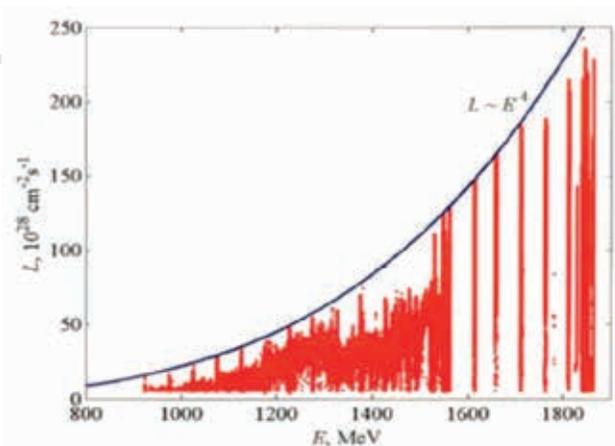
Борьба с продольной неустойчивостью всегда занимала заметное время в наладке комплекса для получения высокой светимости. Как на ВЭПП-4, так и после его модернизации основным методом подавления неустойчивости была настройка высших мод в ускоряющих резонаторах. Однако в режиме 2X2 сгустка ситуация усложнилась. Для надежного подавления продольной неустойчивости была разработана система ОС. В системе продольной ОС в качестве кикеров используются резонаторные системы отдельно для электронов и позитронов. Каждый кикер состоит из пары резонаторов, расстояние между которыми выбрано равным четверти длины их резонансной волны. Сигналы, пропорциональные продольной фазе каждого сгустка, получаются на каждом обороте с помощью быстрого фазового детектора, подключенного к датчику тока. Специальная электроника формирует сигнал ОС обратной связи, модулирующий воздействие высокочастотного напряжения этих резонаторов на сгусток, воздействуя только на одно направление: электронное или позитронное. В двух сгустках с помощью систем ОС удаётся инжектировать и ускорить до энергии 4 ГэВ 40 мА электронов (2017 г.).



**Рис. 26.** Резонаторы обратной связи и её разработчики В. Осипов и Е. Ротов

#### 4.5. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ВСТРЕЧИ. СВЕТИМОСТЬ

Проведены работы по оптимизации оптики места встречи с целью получения расчетной по моделированию [30] величины светимости. В частности, оказалось необходимым передвигать минимум бета-функции в месте встречи при сильно различающихся токах электронов и позитронов. Причина – увеличение сдвига равновесной фазы с увеличением числа частиц в сгустке и отсюда изменение момента прихода сгустка в место встречи. Освоен режим работы с двумя сгустками электронов и позитронов с разведением орбит во вставках. Исследовалась возможность повышения светимости в области низких энергий за счет увеличения радиального размера при включении расположенных в экспериментальном промежутке змеек. Полученное увеличение светимости (около 4) ограничивается уменьшением динамической апертуры нелинейностью полей змеек. Однако при этом еще происходит увеличение энергетического разброса, что ухудшает ситуацию при измерении параметров узких резонансов.



**Рис. 27.** Зависимость светимости от энергии по заходам 2000–2010 годов

В результате модернизации в области энергий до 2 ГэВ по сравнению с ВЭПП-4 светимость в области низких энергий была повышена почти на два порядка при максимальных, предельных токах до 3 мА в сгустке. Для более высоких энергий требуется увеличение токов.

#### 5. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ [31–34]

С 2000 года начались эксперименты с детектором КЕДР. Существенная часть работы комплекса была посвящена прецизионным измерениям масс в области энергий пучка 1500–1900 МэВ. Была поставлена задача улучшения точности ранее (1980 г.) проведенных измерений с детектором ОЛЯ и проведение новых, в частности, измерение массы тау-лептона.

Сначала нужно было решить три наиболее важные проблемы. Во-первых, необходимо было получить точную компенсацию продоль-

ного поля соленоида детектора с помощью компенсирующих катушек. Ошибка в компенсации приводит к ошибке в определении энергии, вычисляемой по частоте резонансной деполяризации, и усилению спиновых резонансов, что ведет к уменьшению времени жизни поляризации (ВЖП). Это было особенно важно для планируемого эксперимента по измерению массы тау-лептона, величина которой в системе центра масс лежит вблизи спинового резонанса ( $E=1763$  МэВ). Близость к целому резонансу и наличие в этой области других резонансов, связанных с бетатронными колебаниями, потребовали кропотливой работы по уменьшению влияния резонансов и увеличению ВЖП. Была проведена серия экспериментов, позволившая найти правильную величину тока компенсирующих катушек и сделать величину ошибки в определении энергии менее 1 кэВ.

Во-вторых, необходимо было получить высокую степень поляризации инжектированного из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М пучка. С этой целью в кольце ВЭПП-3, где происходит поляризация, был установлен мёллеровский поляриметр и найдены условия получения высокой степени поляризации. В частности, для каждой энергии ВЭПП-3 были определены оптимальные значения бетатронных частот и создана система их стабилизации. Однако, несмотря на принятые усилия, хорошую степень поляризации пучка в ВЭПП-3 в области вблизи порога тау-лептона получить не удалось. Поэтому для эксперимента по измерению массы тау-лептона поляризация в ВЭПП-3 велась на более высокой энергии (примерно на 80 МэВ выше), а после инжекции энергия ВЭПП-4М опускалась до нужного уровня. Для сохранения поляризации позитронов при переводе пучков в канал от ВЭПП-3 к ВЭПП-4М был установлен импульсный соленоид с интегралом поля 2,5 Тесла·м., обеспечивающий необходимый поворот спина.

Третьей задачей было создание адекватных поставленным целям тушековского поляриметра и деполяризатора, требования к которым по сравнению с поставленным в 80-х годах экспериментам существенно возросли. Эта задача была успешно решена В. Блиновым, А. Богомяковым, И. Николаевым, С. Никитиным, Н. Зиневичем, Е. Шубиным и В. Черепановым. По сравнению с экспериментами 1980 года в три раза было увеличено число счетчиков, регистрирующих тушековские электроны, и улучшена их эффективность, что на порядок уменьшило статистическую ошибку. Задающим генератором для деполяризатора служит управляемый от компьютера высокоточный синтезатор частоты. Сигнал от него подается на полосковую линию через усилитель мощностью до 100 Вт. Программное обеспечение позволяло реализовать различные режимы сканирования частотой деполяризатора. Для резонансной деполяризации можно было использовать бегущие или стоячие поперечные э.м. волны, создаваемые внутри вакуумной камеры с помощью отрезков полосковых линий, расположенных в четырёх местах кольца ВЭПП-4М. Необходимость использования разных мест связана с зависимостью функции спинового отклика как от энергии, так и от азимута.

В связи с задачами повышения точности потребовалось повышение стабильности энергии, связанной не только со стабильностью магнитного поля, но и с температурой охлаждающей воды, магнитных элементов, стенок тоннеля и др. Были оценены коэффициенты корреляции между измеряемыми параметрами и энергией. Мониторингирование этих параметров позволило экстраполировать поведение энергии между калибровками.

В этом плане представляют интерес проведенные эксперименты по изучению влияния изменений магнитного поля различных элементов на величину средней энергии пучка. В основу оценок для изменения энергии от отдельного элемента было положено соотношение [31]:

$$\Delta E/E = -\psi_x \Delta\theta/\alpha L,$$

где:  $\psi_x$  – горизонтальная дисперсионная функция,  $\Delta\theta$  – изменение угла поворота пучка в этом магните или корректоре,  $\alpha$  – коэффициент уплотнения орбит,  $L$  – периметр ускорителя.

Из вышеприведенного соотношения видно, что изменение энергии зависит от знака и величины дисперсии. Это соотношение было проверено экспериментально с использованием резонансной деполяризации, что позволило определить необходимые требования на стабильность поля во всех элементах магнитной системы.

Так как в паразитном месте орбиты электронов и позитронов разведены в разные стороны от медианной плоскости с помощью электростатического бампа, то представляло интерес провести одновременное сравнение энергий электронного и позитронного пучков. Оказалось, что величина разности энергий не превышала  $10^{-6}$ .

В результате была достигнута точность измерения энергии  $5 \times 10^{-7}$ , что эквивалентно 1 кэВ при энергии пучка 2 ГэВ. Это позволило по сравнению с экспериментами, проведенными на ВЭПП-4 в 1980 году, улучшить точность измерения масс на порядок. Получение такой точности обязано также увеличению светимости коллайдера и учету многих других факторов, определяющих точность эксперимента.

Кратко остановимся на тех проблемах, которые необходимо было изучить для достижения такой рекордной точности измерения массы частицы. Эксперимент по измерению массы узкого резонанса заключается в сканировании энергией сталкивающихся пучков (электронов и позитронов) с одновременной регистрацией рождающихся частиц и прецизионном измерении энергии. Полуширина наблюдаемого распределения определяется не шириной резонанса (она значительна уже), а энергетическим разбросом в пучке. В нашем случае, например, для области пси-мезона ( $E=1548$  МэВ) энергетический разброс в системе центра масс ( $2E$ ) равен  $5 \cdot 10^{-4}$ , а полученная точность измерения массы пси-мезона  $4 \cdot 10^{-6}$ . **Фактически в эксперименте удалось определить значение массы с точностью в 100 раз лучше, чем полученная ширина распределения в зависимости от энергии!!!** Стоит также отметить, что это распределение не является симметричным из-за радиационных поправок и других факторов. Для получения такой точности нужна достаточная статистика и учет большого количества попра-

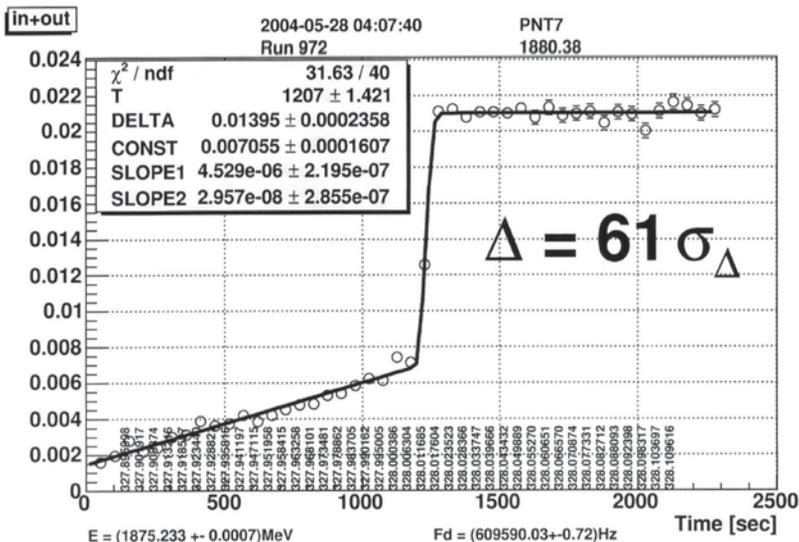
вок как в системе регистрации, так и в коллайдере при определении средней энергии в системе центра масс. Естественно требуется высокая стабильность магнитной системы и всей аппаратуры и её непрерывное мониторирование. Был проведен [33-36] тщательный анализ ошибок и поправок, значимых для определения средневзвешенной энергии столкновений в каждой точке сканирования резонанса. Результаты обобщены в работе [34], и ниже будут обозначены их основные моменты.



**Рис. 28.** Обсуждаются вопросы точности. Слева направо: С.А. Никитин, И.Б. Николаев, Г.М. Тумайкин, В.Е. Блинов

Процесс определения средневзвешенной энергии в системе центра масс состоит из следующих этапов:

1. Измерение частоты прецессии спина методом резонансной деполяризации. Фиксируется частота деполяризатора, при которой происходит деполяризация. Сканирование частотой деполяризатора



**Рис. 29.** Сканирование частотой деполяризатора. Показан деполяризационный скачок в скорости счета тушековских электронов

ведётся поочередно в двух направлениях, что исключает систематическую ошибку, связанную с шириной линий деполяризатора и спиновой частоты, а также с временами раскогеренирования спинов и набора статистики в регистрации тушековских электронов. Предварительно рассчитываются и экспериментально определяются оптимальное поле деполяризатора, оптимальная скорость сканирования частотой деполяризатора и величина частотной модуляции. Фактически подбираются условия, при которых удается выделить центральную линию спиновой частоты, ширина которой много меньше разброса спиновых частот, связанных энергетическому разбросу и разбросу амплитуд бетатронных колебаний. Изменение скорости счета после деполяризации не превышает (2-2,5)%, поэтому, как и в прошлых экспериментах, использовалась нормировка на неполяризованный сгусток.

**2. Определение средней энергии частиц в пучке, усредненной по периметру накопителя.** В идеальном случае плоской орбиты и отсутствия бетатронных и синхротронных колебаний энергия электронов (позитронов)  $\gamma \cdot m_e c^2$  связана с частотой прецессии спина  $\Omega$  известным соотношением :

$$\Omega = 2\pi f_0 (1 + \gamma a),$$

где:

$f_0$  – частота обращения,

$a$  – отношение аномальной и нормальной частей гиромагнитного отношения электрона.

Однако в реальной ситуации мы имеем дело с пучком частиц, совершающих бетатронные и синхротронные колебания и движущихся по реальной орбите, поэтому необходимо определить реальную, усреднённую по ансамблю частиц энергию.

Рассмотрим основные факторы, которые необходимо было учесть. Следует отметить, что одна часть этих факторов может быть классифицирована как поправка к средней энергии, а другая часть определяет величину ошибки.

Радиальные бетатронные, а также синхротронные колебания в присутствии квадратичной нелинейности поля накопителя изменяют среднюю энергию частиц относительно энергии равновесной частицы. Масштаб явления порядка  $10^{-6}$ . Однако этот эффект автоматически учитывается, так как процесс калибровки происходит за много времен затухания, поэтому измеряется энергия, усредненная по ансамблю амплитуд бетатронных и синхротронных колебаний.

Вертикальные бетатронные колебания и вертикальные искажения орбиты могут изменять независимо как частоту прецессии, так и энергию пучка, по отношению к энергии для случая плоской орбиты с нулевыми вертикальными бетатронными колебаниями. Эффект резко усиливается при приближении к спиновым резонансам [33, 34] и его необходимо учитывать. Здесь речь в первую очередь идет об ошибке. Источники возмущения орбиты по вертикали имеют случайный характер распределения и в общем случае их влияние можно оценить только в рамках статистической модели. Согласно проведенному моделированию при на-

блюдаемых искажениях орбиты величина поправки в экспериментах по измерению масс не превышала  $10^{-6}$ . Влияние специально создаваемых возмущений на спин можно точно рассчитать. В кольце имеются паразитные места встречи, где электронные и позитронные орбиты разведены локально по вертикали с помощью электростатических сепараторов. При калибровке энергии эти сепараторы выключаются, при определении энергии в системе центра масс вводится поправка на изменение энергии при включении этих сепараторов. Одновременное измерение частот деполяризации для электронов и позитронов, как упоминалось выше, показало их разницу не более  $10^{-6}$ . Обычно в экспериментах измерялась только энергия электронного пучка при выключенных сепараторах, и поправка за счет электростатических бампов для электронов и позитронов оценивалась величиной около 4 кэВ ( $2 \cdot 10^{-4}$ ).

Коэффициент уплотнения орбит связывает распределение частиц по энергии с их распределением по частоте обращения. Так как частота прецессии спина относительно системы ортов, вращающейся вместе с вектором скорости, определяется произведением фактора, пропорционального энергии частицы, на её частоту обращения, то вследствие синхротронных колебаний имеется систематический сдвиг средней по пучку спиновой частоты, пропорциональный коэффициенту уплотнения. Этот сдвиг относительно спиновой частоты равновесной частицы дает поправку в энергии, которая для ВЭПП-4М очень мала ( $\sim 10^{-9}$ ).

### **3. Определение средней энергии пучка в области взаимодействия.**

Из-за радиационных потерь на синхротронное излучение и когерентных потерь, связанных с распределённым импедансом вакуумной камеры, энергия пучка вдоль траектории не является постоянной. В кольце ВЭПП-4М вследствие симметрии магнитной структуры, выдержанной с точностью не хуже  $10^{-3}$  (погрешность изготовления магнитов), эффектом радиационных потерь при низкой энергии ( $2 \cdot 10^{-5}$  на 1,85 ГэВ) можно пренебречь, так как энергии пучков в месте встречи одинаковы и равны средней энергии с точностью лучше  $10^{-8}$ . Эффект растёт примерно как куб энергии и при 5 ГэВ составит порядка  $10^{-7}$ . Различие азимутального распределения когерентных потерь электронов и позитронов, связанных с различием импедансов полуколец, также может давать разницу их энергий в месте встречи. Вклад когерентных потерь зависит от тока пучка, поэтому при разных токах позитронов и электронов их энергии в месте встречи тоже могут отличаться. По грубым оценкам масштаб этих отличий в условиях ВЭПП-4М составляет, например,  $\sim 10^{-8}$ , если токи разнятся между собой в два раза.

### **4. Определение средневзвешенной энергии в системе центра масс.**

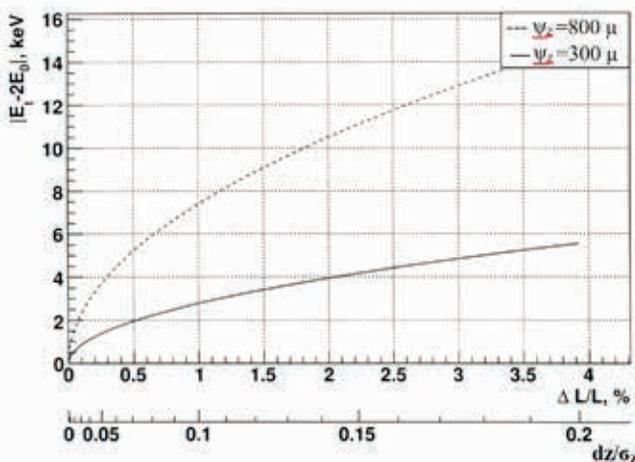
В реальной оптической структуре с малой бета-функцией в области взаимодействия пучков проявляются нелинейные эффекты, которые могут приводить к отличию средневзвешенной энергии в системе центра масс от простого сложения средних энергий электронов и позитронов. Такими эффектами являются хроматизм бета-функций и пси-функции. Эти эффекты нарушают симметрию плотности частиц в зависимости

от их энергии, что сдвигает средневзвешенную энергию в системе центра масс. Было проведено измерение хроматизма оптических функций и определены необходимые поправки. Причем оказалось, что этот хроматизм меняется при изменении настройки режима. Масштаб поправок от хроматизма оптических функций в месте встречи составлял порядка  $10^{-6}$ , что сравнимо с точностью измерения масс. Учет углового разброса пучков в месте встречи также уменьшает средневзвешенную энергию в системе центра масс. Эффект около  $10^{-7}$ .

**5. Влияние потенциала встречного пучка.** В области взаимодействия электрическое поле пучка увеличивает энергию встречной частицы. Масштаб поправки в энергии центра масс  $(+)\cdot 4\cdot 10^{-7}$ .

**6. Влияние вертикальной пси-функции, возбуждаемой электростатическим разведением орбит электронов и позитронов.** Следует остановиться ещё на одном важном моменте, относящемся конкретно к ВЭПП-4М. Электростатическое разведение орбит в 3 паразитных местах (одно в техническом промежутке и два в полукольцах) приводит к возбуждению вертикальной пси-функции, имеющей разные знаки для электронов и позитронов. Поэтому в случае неточного сведения пучков по вертикали в области взаимодействия средневзвешенная энергия в системе центра масс будет сдвигаться в ту или другую сторону. Как оказалось, при моделировании результирующая величина пси-функции в месте встречи зависит от направления разведения пучков в техническом промежутке и двух в боковых паразитных местах встречи. Её минимальное значение имеет место в случае, когда знак разведения в техническом и в боковых местах встречи разный, и в этом варианте пси-функция оставляет около 300 мк, а при одинаковом знаке разведения -800 мк.

На рис. 30 показано, как сдвигается энергия в системе центра масс из-за неточного нацеливания пучков по вертикали. По горизонтали также отложено соответствующее уменьшение светимости. Чтобы избежать ухода энергии, в процессе набора статистики требуется оперативная подстройка сведения пучков по максимуму светимости. Необходимость этого усиливается еще одним эффектом. В паразитных местах встречи даже при



**Рис. 30.** Сдвиг средневзвешенной энергии в системе центра масс и потеря светимости при неточном сведении пучков по вертикали ( $dz/\sigma_z$ ) для разных значений вертикальной пси-функции, имеющей разные знаки для электронов и позитронов

наличии разведения орбит сохраняется взаимодействие пучков, меняющееся при изменении токов. Это взаимодействие подобно корректору искажает по вертикали равновесные орбиты электронов и позитронов, нарушает сведение пучков и, соответственно, средневзвешенную энергию в системе центра масс. Этот факт указывает на необходимость непрерывной оперативной подстройки сведения при изменении величины токов встречных пучков. Расчеты (рис. 30) показывают, что для сохранения средневзвешенной энергии в системе центра масс с ошибкой не более  $4 \text{ кэВ}$  ( $10^{-6}$ ) при энергии накопителя  $1850 \text{ МэВ}$ , требуется непрерывное поддержание максимальной для данных токов светимости с точностью  $2\%$ . Это очень серьезное требование. Поэтому с помощью программы «Автопилот» ведется непрерывная, ориентированная на максимум светимости подстройка сведения орбит в месте встречи.

Заметной частью поляризационной программы работы комплекса было изучение возможностей прецизионного сравнения аномальных магнитных моментов электрона и позитрона [37]. Проведен большой цикл подготовительных экспериментов, нацеленных, прежде всего, на повышение разрешения и точности тушековского поляриметра. Полученное разрешение позволяет говорить о возможности сравнения частот деполяризации и, соответственно, энергии электронов и позитронов с относительной точностью несколько единиц на  $10^{-9}$ . Для разведения орбит электронов и позитронов был предложен и опробован высокочастотный способ разведения, создающий замкнутую через два оборота орбиту и обеспечивающий разведение орбит электронов и позитронов в техническом промежутке. Это позволяет избежать неконтролируемой разницы энергий электронного и позитронного сгустка, о чем было сказано выше, из-за разных орбит в паразитном месте встречи. Работы по сравнению аномальных моментов пока не завершены.

## 6. ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ (ОКР) В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ВЭПП-4М [38-40]



Рис. 31. Г.Я. Кезерашвили

Обратное комптоновское рассеяние является важной частью экспериментальной деятельности, выполненной и проводимой до настоящего времени на установке ВЭПП-4М.

Первое использование обратного комптоновского рассеяния для измерения поляризации было начато еще в 1982 году Г.Я. Кезерашвили.

При создании новой структуры экспериментального промежутка, обеспечивающей постановку экспериментов по двухфотонной физике, возникла задача точного измерения энергии рассеянных электронов, выпадающих

из ускорения после рождения исследуемого резонанса. Для калибровки системы регистрации было предложено использовать обратное комптоновское рассеяние лазерных пучков разных длин волн в месте встречи с использованием острой направленности и резкой границы спектра отраженных гамма-квантов [3]. В новой конфигурации оптики экспериментального промежутка для выполнения задачи калибровки энергии РЭ необходимо было организовать лобовую встречу пучков электронов и позитронов с лазерным пучком в центре детектора. Созданная для этой цели лазерная установка вместе с системой управления лазерным пучком получила название РОКК-1М (Рассеянные Обратно Комптоновские Кванты). Разработку её на начальном этапе и постановке первых экспериментов вел Г.Я. Кезерашвили вместе Н.Ю. Мучным. Установка размещена в северной части экспериментального промежутка (рис. 32). В эксперименте фиксируется совпадение в регистрации отраженного комптоновского гамма-кванта с выпавшим из ускорения рассеянным электроном (РЭ), регистрируемым координатными счетчиками TS, расположенными за доворотными диполями. Координата попадания РЭ благодаря фокусировке однозначно определяет его энергию независимо от угла вылета из места встречи. Сумма энергий отраженного гамма-кванта и РЭ при лобовом столкновении с хорошей точностью равна энергии первичного электрона (позитрона). Энергия гамма-кванта измеряется полупроводниковым детектором, шкала которого калибруется радиоактивными источниками гамма-квантов в области энергий от сотен кэВ до 6 МэВ с разрешением в несколько кэВ. Одновременно эта калибровка может быть проверена, когда энергия первичных электронов измерена резонансной деполяризацией. Такая схема позволяет определить энергию РЭ с точностью  $(0,1 - 1)\%$ , в зависимости от её координаты на счетчике TS в системе регистрации РЭ. Для калибровки всей области энергий РЭ требуется несколько лазеров с разными длинами волн от инфракрасной до ультрафиолетовой областей спектра. К моменту написания книги система калибровки РЭ полностью подготовлена к использованию в эксперименте [40].

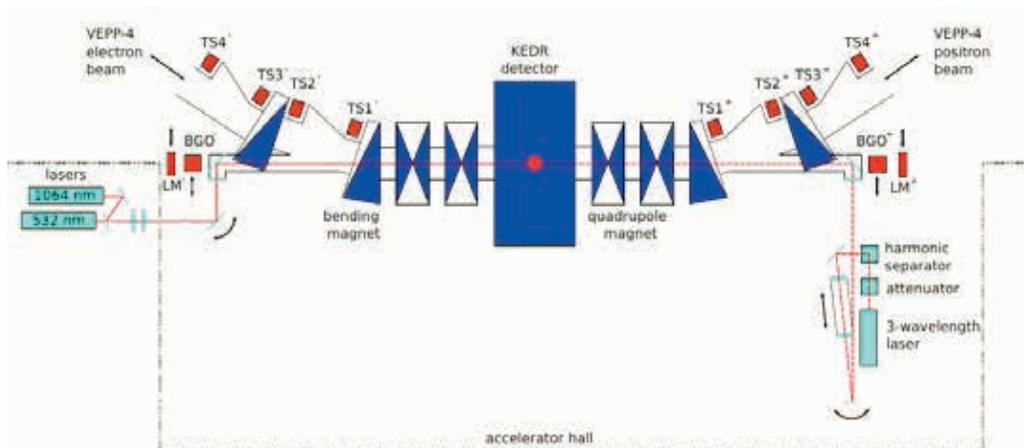
Кроме первоначально поставленной задачи калибровки системы РЭ описанная техника позволяет решать и другие:

- во-первых, если абсолютная энергия начальных электронов хорошо известна, а энергетический спектр комптоновских квантов измеряется детектором (калориметром), то край спектра может быть использован для абсолютной калибровки энергетической шкалы этого детектора;

- во-вторых, в случае, если имеется хорошо откалиброванный детектор (калориметр), то измеренное значение края спектра может быть использовано для проведения абсолютной калибровки энергии начальных электронов;

- в третьих, откалиброванная система рассеянных электронов при известной энергии пучка позволяет «метить» обратно-рассеянные гамма-кванты, определяя их начальную энергию в экспериментах при взаимодействии с внешней мишенью.

Во всех случаях подразумевается, что длина волны первичных фотонов хорошо известна.



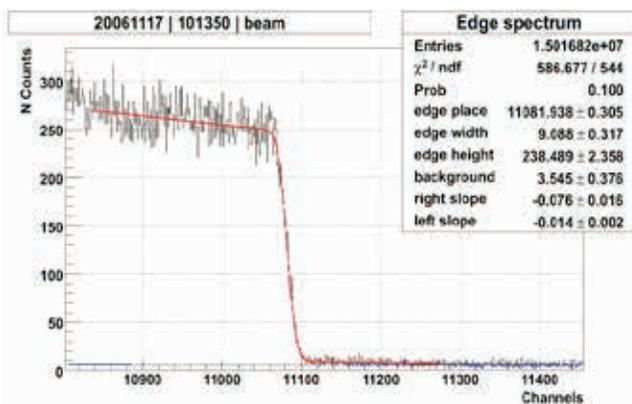
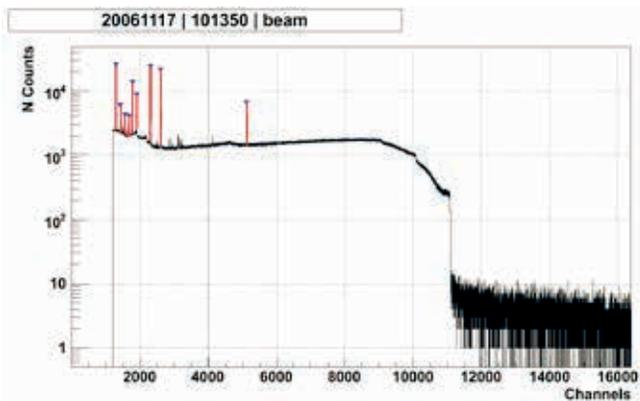
**Рис. 32.** Новая схема экспериментального промежутка с системой регистрации рассеянных электронов (позитронов) детектора КЕДР и с мониторами светимости. TS – координатные счетчики для регистрации рассеянных электронов (позитронов), LM – мониторы светимости, BGO – детекторы для регистрации комптоновских гамма-квантов

Спектр этих гамма-квантов легко изменяется перестройкой энергии пучка и выбором лазера. Следует отметить, что эти гамма-кванты поляризованы. Поток их при наличии нескольких сгустков может составлять  $10^7$  в секунду. Такая возможность установки уже позволила и обеспечит в будущем решение других задач, как прикладных, так и физических.

Первыми прикладными задачами были калибровка криптонового калориметра детектора КЕДР и калибровка свыше 8000 кристаллов CsI(Tl) детектора BELLE для коллайдера KEK (Япония).

На установке могут быть продолжены эксперименты, начатые на ВЭПП-4 до пожара. К ним относятся: 1) эксперименты по фотоядерной физике; 2) изучение нелинейных явлений в КЭД, включая: а) процесс расщепления фотона в сильном кулоновском поле ядра (был зарегистрирован в ИЯФ впервые в мире); б) изучение дельбрукковского рассеяния фотона.

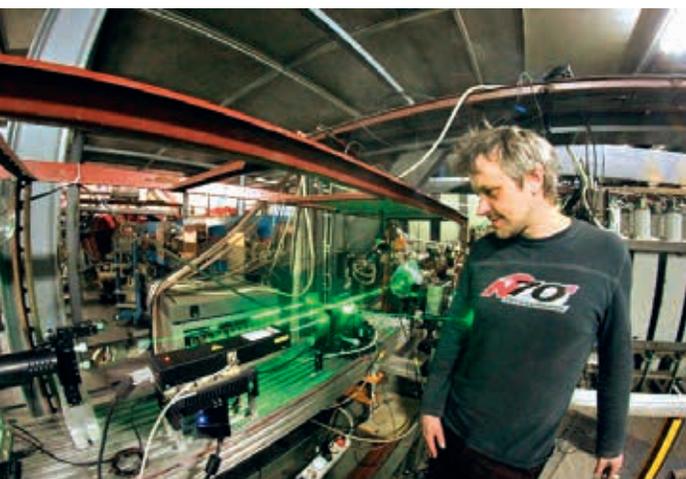
В связи с проведением программы прецизионных экспериментов по измерению масс была реализована возможность использования ОКР для определения энергии пучка по измерению энергии края спектра обратно-рассеянных квантов, которая однозначно определяется энергией пучка и длиной волны лазерного излучения. Специально для этих экспериментов была организована еще одна область взаимодействия лазерного пучка с электронным на прямолинейном участке между магнитами NEM1 и NEM2. Это позволило исключить фон от однократного тормозного излучения из места встречи и вести непрерывное мониторирование энергии электронного пучка. Достигнутая точность опреде-



**Рис. 33.** Спектр комптоновских  $\gamma$ -квантов с калибровкой изотопами и его край (сверху)

ления энергии в области 1,5-2 ГэВ составила  $(2-3) \times 10^{-5}$ , что было проверено методом резонансной деполяризации.

Эта методика сыграла решающую роль в эксперименте по измерению массы тау-лептона, так как в этой области пучок быстро деполяризуется из-за близости к целому спиновому резонансу, и поэтому применение метода резонансной деполяризации вызвало определенные сложности. В области высоких энергий для проведения такой калибровки энергии требуются лазеры с большей длиной волны, что ограничивает применение метода. Поэтому подготовлен лазерный поляриметр, основанный на измерении асимметрии ОКР с использованием резонансной деполяризации, как это было организовано ранее в 80-е годы на ВЭПП-4.



**Рис. 34.** Н.Ю. Мучной на установке РОКК-1М

## 7. ВЭПП-4М – ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(подготовлено К.В. Золотаревым)

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М также используется как источник синхротронного излучения (СИ) для проведения исследований в различных научных направлениях для реализации современных аналитических методик.

Для размещения исследовательских станций на северном полукольце коллайдера построено специализированное здание с большим экспериментальным залом (площадью около 800 кв. м), куда выводятся каналы транспортировки СИ (рис. 35).

**Рис. 35.** Экспериментальный зал для работы с СИ на ВЭПП-4М



Используются два режима работы: низкоэнергетичный с энергией 1,9 ГэВ и высокоэнергетичный с энергией свыше 4 ГэВ. Максимальный ток до 20 мА. Используются одногустковый и многугустковый режимы и общим током до 20 мА.

Низкоэнергетичный режим предназначен для проведения работ на станции метрологии для спектральной калибровки различных детекторов и регистраторов в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах.

Высокоэнергетичный режим ВЭПП-4М предназначен для реализации методик, требующих высокоинтенсивных пучков СИ в жестком рентгеновском диапазоне (энергия квантов 40-120 кэВ). Возможна работа с 1, 2, 4, 8 и 16 густками. В данном режиме работы для генерации СИ используются как поворотные магниты, так и специализированный девятиполюсный вигглер с пиковым значением поля 1,9 Тл. В настоящее время на канале вывода СИ из вигглера организовано три исследовательские станции: станция фазоконтрастной рентгеноסקопии и рентгенофлуоресцентного анализа тяжелых элементов, станция изучения быстрых динамических процессов и станция исследования материалов для термоядерных реакторов. На станции фазоконтрастной рентгеноסקопии также проводятся работы по микропучковой терапии раковых опухолей.

Станция изучения быстрых динамических процессов оборудована взрывной камерой и быстрым однокоординатным детектором. Взрыв-



**Рис. 36.** 9-полюсный вигглер и его создатель П.Д. Воблый

ная камера обеспечивает безопасную возможность для детонации зарядов весом до 200 г, что позволяет изучать различные эффекты детонации и взаимодействия ударных волн с различными материалами и конструкциями с временным разрешением около 100 пкс.

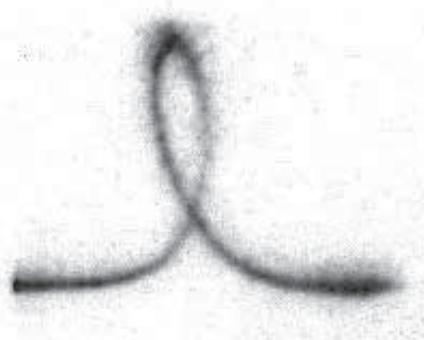
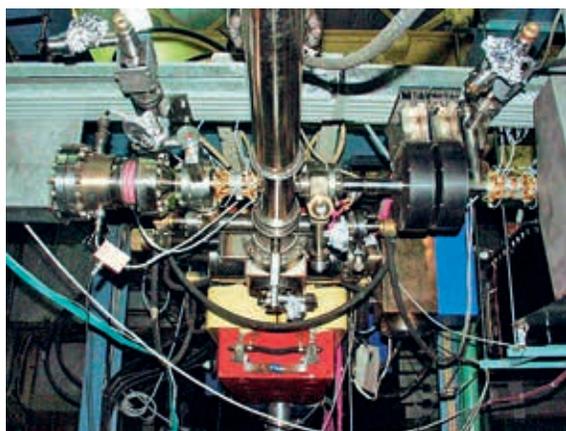
На станции исследования материалов для термоядерных реакторов установлен мощный лазер (100 Дж) для моделирования интенсивных импульсных нагрузок на материалы с регистрацией дифракционного сигнала, описывающего структурные перестройки материалов под действием таких нагрузок. Результаты данных работ предполагается использовать при проектировании диверторов в международном проекте ITER.

К этому надо добавить, что основная часть экспериментов на пучках СИ ведется на ВЭПП-3, где имеется 7 каналов вывода пучков и 10 экспериментальных станций.

## **8. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

### **8.1. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ КОРОТКИХ СГУСТКОВ**

Среди ускорительных экспериментов следует отметить методические работы, выполненные П.В. Логачевым, А.А. Старостенко и др. Авторами была предложена и опробована оригинальная неразрушающая диагностика параметров коротких сгустков заряженных частиц электронным пучком низкой энергии [41, 42]. Эта методика позволяет исследовать временную и пространственную структуру коротких сгустков, их взаимное расположение и интенсивность. В циклических ускорителях и коллайдерах этот метод может также применяться для наблюдения разного рода микроволновых неустойчивостей. Типичное изображение поперечной развертки электронного пучка после пересечения с диагностируемым пучком приведено на рис. 37. Разработано программное обеспечение, дающее информацию о параметрах диагностируемого сгустка на основе анализа этой развертки. Эксперименты были выполнены на установках ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

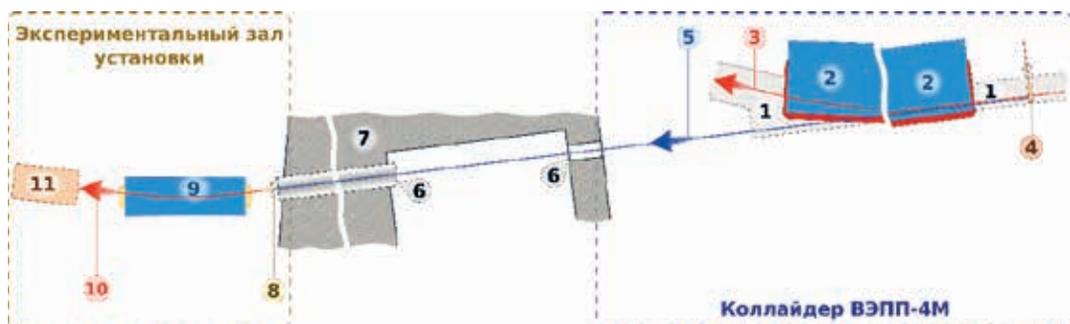


**Рис. 37.** Устройство для диагностики сгустков на ВЭПП-4М и проекция развертки электронного пучка (справа)

## 8.2. ТЕСТОВЫЙ ПУЧОК ЭЛЕКТРОНОВ КОМПЛЕКСА ВЭПП-4 (подготовлено В.С. Бобровниковым)

Потребность в специализированной установке для получения тестового пучка электронов обусловлена рядом проводимых в ИЯФ СО РАН методических работ по разработке перспективных детекторов для физики высоких энергий и ядерных исследований. Измерения прототипом детектора сигналов от реальных частиц позволяют экспериментально проверить заложенные при конструировании детектора принципиальные решения и при необходимости внести необходимые правки в конструкцию.

Метод получения тестового пучка электронов заключается в следующем. В гало пучка электронов коллайдера ВЭПП-4М вводится подвижной конвертор 4 (рис. 38), в котором образуются тормозные



**Рис. 38.** Схема получения тестового пучка электронов: 1 – вакуумная камера, 2 – дипольные магниты коллайдера ВЭПП-4М, 3 – первичные электроны, 4 – подвижной конвертор, 5 – тормозные гамма-кванты, 6 – каналы, 7 – бетонная стена (радиационная защита), 8 – конверсионная мишень, 9 – поворотный магнит, 10 – тестовые электроны, 11 – прототип детектора

γ-кванты. Обратная конверсия тормозных гамма-квантов в электрон – позитронные пары производится в экспериментальном зале установки на конверсионной мишени. Для отбора электронов с определенным импульсом используется дипольный поворотный магнит.

Тестовый пучок электронов имеет следующие параметры: диапазон энергий от 100 МэВ до 3500 МэВ, энергетический разброс равен 7,8% для энергии 100 МэВ и 2,6% для энергии 3000 МэВ, средняя скорость счета 50 Гц. Установка оснащена всем необходимым оборудованием для организации триггерного сигнала, измерения координат треков и энергии тестового пучка. Используемая для этого система сбора данных обеспечивает также регистрацию данных с измеряемых прототипов детекторов. Полученные параметры тестового пучка на комплексе ВЭПП–4 сравнимы с параметрами тестовых пучков в таких международных центрах, как Frascati (Италия), IHEP Beijing (Китай) и Tohoku (Япония).

Начиная с 2011 года на тестовом пучке электронов проводятся измерения со следующими прототипами детекторов:

- детекторов для регистрации черенковских колец – ФАРИЧ (от англ. FARICH – Focusing Aerogel Ring Image Cherenkov), который является перспективной системой идентификации частиц для проекта Супер Чарм-Тау фабрики (г. Новосибирск), переднего спектрометра детектора PANDA (Германия) и детектора HMPID (High Momentum Particle Identification) для ALICE (Швейцария);

- приборов на основе микроканальных пластин для времяпролетных систем с предельным временным разрешением, эти приборы планируется использовать для идентификации частиц и подавления наложения событий в калориметрах в условиях большой светимости, например, на большом адронном коллайдере;

- координатных детекторов на основе газовых электронных умножителей, данные детекторы активно применяются в экспериментах, проводимых в ИЯФ СО РАН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модернизация ВЭПП–4 с установкой нового детектора с продольным полем, обеспечившая увеличение светимости и новые экспериментальные возможности.

Проведена серия экспериментов, связанных, прежде всего, с прецизионными измерениями масс [43].

Осуществлен переход на новый инжекционный комплекс, обеспечивающий более чем на порядок увеличение скорости накопления позитронов.

Разработаны новые методики и аппаратура для диагностики пучков, выполнены интересные ускорительные эксперименты.

С целью получения и ускорения больших токов проведены разработки современных систем обратных связей. Это дает возможность увеличения светимости в области высоких энергий, где имеется интересная физическая программа, в частности, по двухфотонной физике.

ВЭПП–4 является уникальным полигоном для разработки новых

методик и проведения ускорительных экспериментов, в частности, с поляризованными пучками. Это важно для подготовки специалистов для будущих проектов, таких как Супер Чарм-Тау Фабрика.

ВЭПП-4 является единственным в России источником синхротронного излучения на энергию пучка свыше 5 ГэВ и активно используется для постановки экспериментов с жестким рентгеновским излучением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Анашин, О.В. Анчугов, А.Е. Бондарь, М.М. Бровин, А.М. Власов, П.Д. Воблый, А.Н. Ворошилов, Ю.М. Глуховченко, Э.И. Горникер, А.А. Диденко, П.А. Дурнов, А.А. Жоленц, Э.И. Зинин, А.С. Калинин, С.Е. Карнаев, Г.Я. Кезерашвили, В.А. Киселев, В.А. Корчагин, Э.А. Купер, Ю.И. Левашев, Ю.Г. Матвеев, А.С. Медведко, Л.А. Мироненко, С.И. Мишнев, С.Ф. Михайлов, А.И. Науменков, В.С. Ненюков, А.П. Онучин, В.Е. Пелеганчук, В.В. Петров, В.М. Петров, С.П. Петров, В.Г. Попов, И.Я. Протопопов, Ю.А. Пупков, А.Н. Скринский, Б.М. Смирнов, А.Б. Темных, Э.М. Трахтенберг, Г.М. Тумайкин, А.В. Филипченко, Ю.И. Эйдельман, В.Е. Якименко. Состояние работ на комплексе ВЭПП-4М. Труды XII Всесоюзного совещ. по ускор. зар. частиц. Дубна, 1992, т. 1, с. 295-300.

2. А.Е. Бондарь. Система рассеянных электронов детекторов МД-1 и КЕДР. Диссертация к. ф.-м. н. ИЯФ, Новосибирск, 1994 г.

3. А.Е. Бондарь, Г.Я. Кезерашвили, А.А. Жоленц, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Установка для калибровки детектора КЕДР на накопителе ВЭПП-4М по обратному комптоновскому рассеянию. Труды XII Всесоюзного совещ. по ускор. зар. частиц. Дубна, 1992, т. 1 с. 309-312.

4. В.А. Киселев. Разработка и создание систем транспортировки пучков ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М. Диссертация к.т.н., Новосибирск, 1997 г.

5. О.В. Анчугов. Высоковольтные устройства для управления пучками в ускорителях заряженных частиц. Дисс. к.т.н., ИЯФ. Новосибирск, 2009 г.

6. В.П. Черепанов. Управление параметрами пучков в ионных синхротронах и каналах транспортировки. Дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2000 г.

7. П.Ю. Абрамский, В.С. Арбузов, А.Н. Белов, С.А. Беломестных, А.А. Бушуев, В.Г. Вещеревич, Э.Н. Горникер, С.А. Крутихин, И.Б. Купцов, Г.Я. Куркин, С.А. Лабуцкий, Н.Н. Лебедев, В.М. Меджидзаде, П.Д. Нейгель, В.М. Петров, А.М. Пилан, И.К. Седляров, М.Ю. Фомин, С.В. Якубов. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-4М (проект). Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям зар. частиц., т. 1, с. 223-226, Дубна, 1989 г.

8. П.Ю. Абрамский, В.С. Арбузов, А.А. Бушуев, В.Г. Вещеревич, В.Н. Волков, Н.Г. Гаврилов, Э.И. Горникер, В.Н. Ерохов, М.М. Карлинер, Е.К. Кенжебулатов. Мощные высокочастотные системы ИЯФ СО РАН. Труды XVI совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.

9. В.С. Арбузов, А.Н. Белов, С.А. Беломестных, С.И. Бибко, А.А. Бушуев, В.Г. Вещеревич, В.Н. Волков, Э.И. Горникер, С.А. Крутихин, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, Н.Н. Лебедев, В.М. Меджидзаде, В.М. Петров, А.М. Пилан, И.К. Седляров. Новая высокочастотная система накопителя ВЭПП-3. Труды X Всесоюзного совещ. по ускор. зар. частиц., т. 1, Дубна, 1987, с. 171-173.

10. В.Ф. Веремеенко. Прецизионные элементы системы питания магнитных структур накопителей заряженных частиц. Дисс. к.т.н., ИЯФ, Новосибирск, 1989 г.

11. A. Pavlenko, A. Batrakov, G. Karpov, V. Svishchev. Method of broadband stabilization of the VEPP-4 main field. Proc. Of RuPAC 2014, Obninsk, Russia, pp.100-102.

12. В.И. Каплин, О.А. Плотникова. Система прецизионного измерения температуры и термоконтроля на ускорительном комплексе ВЭПП-4. ПТЭ. 2017. № 1. С. 45-51.

13. E. Miginskaja, I. Morozov, V. Tsukanov, A. Volkov. Temperature stabilization of RF-cavities of VEPP-4M Electron-Positron Facility. Proc. of RUPAC 2006, Novosibirsk.

14. Ю.И. Левашов. Критерии и технология прецизионной установки магнитов ВЭПП-4М методом сглаживания. Дисс. к.т.н., ИЯФ, Новосибирск, 1999.

15. А.В. Полянский. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа. Дисс. к.т.н., СГУ Г и Т, Новосибирск, 2015.

16. E.A. Bektenev, G.V. Karpov. Upgrade of BPM System of the VEPP-4M Collider. Proc. Of RuPAC 2014, Obninsk, Russia, pp.368-370.

17. А.Н. Журавлев. Развитие оптической диагностики пучков заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4М. Дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2009 г.

18. О.И. Мешков. Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильноточным электронным пучком. Дисс. д.ф.-м.н., Новосибирск, 2010 г.

19. С.Е. Карнаев. Разработка и реализация системы управления ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-4М. Диссертация к.т.н., ИЯФ, Новосибирск, 1996 г.

20. В.Р. Козак. Распределенные системы управления и контроля ускорительными комплексами ИЯФ СО РАН. Дисс. д.т.н., ИЯФ, Новосибирск, 2012 г.

21. А.Н. Алешаев. Базовое программное обеспечение систем управления ускорительно-накопительными комплексами. Дисс. к.т.н., Новосибирск, 1995 г.

22. Е.Б. Левичев. Влияние нелинейностей магнитного поля на динамическую апертуру циклических ускорителей. Дисс. д.ф.-м.н., Новосибирск, 2004 г.

23. П.А. Пиминов. Численное моделирование и оптимизация параметров нелинейного движения частиц в циклическом ускорителе. Дисс.

к. ф.-м.н., Новосибирск, 2010 г.

24. В.А. Киселев, В.В. Смалюк. Экспериментальное изучение импедансов связи электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4М. ЖТФ, т. 80, вып. 7, 2010.

25. В.В. Смалюк. Диагностика поперечного движения пучка в накопителе: разработка и развитие методов, их практическая реализация на ВЭПП-4М. Дисс. к. ф.-м.н., Новосибирск, 1999 г.

26. Karliner M, Popov K. Theory of a Feedback to Cure Transverse Mode Coupling Instability. Nucl. Instr. and Meth. A 537(2005), p. 481-500.

27. V.V. Oreshonok, V.P. Cherepanov, V.V. Smaluk, D.P. Sukhanov. Broadband Digital Feedback System for the VEPP-4M Electron-Positron Collider. Proc. of DIPAC-2011, Hamburg, 2011.

28. В.В. Смалюк. Подавление коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях. Дисс. д. ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2010 г.

29. E.N. Dementev, S.E. Karnaeв, S.A. Krutikhin, G.Ya. Kurkin, A.S. Medvedko, S.V. Motygin, V.V. Oreshonok, V.N. Osipov, V.M. Petrov, E.A. Rotov, V.V. Smaluk, D.P. Sukhanov and V.P. Cherepanov. Commissioning Feedback Systems at VEPP-4M Electron-Positron Collider. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 7, № 7, p. 466-472.

30. Д.Н. Шатилов. Моделирование эффектов встречи в циклических коллайдерах. Дисс. к.ф.-м. н., Новосибирск, 2013.

31. С.А. Никитин. Поляризованные пучки в прецизионных экспериментах на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 2011 г.

32. И.Б. Николаев. Измерение энергии пучка ускорителя ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации. Дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2012 г.

33. A.V. Bogomyagkov, S.A. Nikitin, A.G. Shamov. RUPAC 2006 Proc., <http://arxiv.org/abs/1801.01227>

34. А.В. Богомягков. Определение энергии центра масс в прецизионных экспериментах на ВЭПП-4М. Диссертация к.ф.-м.н. Новосибирск, 2007 г.

35. A.V. Bogomyagkov, S.A. Nikitin, V.I. Telnov, G.M. Tumaikin. Estimation of errors in definition of central mass energy in high precision experiments on colliding beams. Proceedings of 3rd Asian Particle Accelerators conference (APAC 2004), TUP-11002.

36. A. Bogomyagkov, S. Nikitin, I. Nikolaev, A. Shamov, A. Skrinsky, G. Tumaikin. Central Mass Energy Determination in High Energy Experiments on VEPP-4M. Proceedings of 22nd PAC (PAC 2007).

37. V. Blinov, A. Bogomyagkov, G. Karpov, V. Kiselev, E. Levichev, S. Nikitin, I. Nikolaev, E. Shubin, G. Tumaikin. Study of the possibility of increasing the accuracy of CPT invariance test at electron-positron storage rings. ICFA Beam Dynamics Newsletter, № 48, April 2009, 207-217.

38. Г.Я. Кезерашвили. Обратный комптон-эффект на электрон-позитронных пучках в накопителях (методика, эксперименты, новые воз-

возможности). Диссертация д.ф.-м.н., Новосибирск, 1994 г.

39. Н.Ю. Мучной. Комптоновское рассеяние в прецизионных экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах. Диссертация д.ф.-м.н., Новосибирск, 2011 г.

40. В.В. Каминский. Комптоновская калибровка системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР. Дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2017.

41. П.В. Логачев, Д.А. Малютин, А.А. Старостенко. Применение электронного пучка низкой энергии как средства неразрушающей диагностики интенсивных пучков заряженных частиц. Приборы и техника эксперимента. №1- 2008. С. 5-33.

42. П.В. Логачев. Неразрушающая диагностика интенсивных сгустков заряженных частиц электронным пучком низкой энергии. Диссертация д. ф.-м. н., Новосибирск, 2009 г.

43. Е.Б. Левичев, А.Н. Скринский, Ю.А. Тихонов, К.Ю. Тодышев. Прецизионное измерение масс элементарных частиц на коллайдере ВЭПП-4М с детектором «КЕДР». УФН, т. 184, № 1, 2014 г.

ГЛАВА 8  
Ю.М. Шатунов

## ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ПУЧКИ В ИЯФ\*

Среди длинного списка тем, которые, не побоимся этих слов, принесли ИЯФ мировую известность, отдельное место занимает тематика поляризованных частиц и пучков. Изначальная программа института даже не содержала таких слов. Хотя к этому времени уравнение движения спина было хорошо известно, и в ряде лабораторий уже предпринимались попытки ускорения поляризованных частиц. Первый интерес в ИЯФ к проблеме поляризации пробудило предсказание группы теоретиков МГУ во главе с А.А. Соколовым и И.М. Терновым в 1963 г. радиационной самополяризации электронов и позитронов [1]. Они показали, что электроны и позитроны с энергией  $E$  при длительном движении в однородном магнитном поле  $B$  самополяризуются к степени

$\zeta_{ST} = \frac{8}{5\sqrt{3}} = 0,924$  с постоянной времени:

$$\tau_p(\text{ч}) \approx \frac{R/\rho}{[B(\text{Тл})]^3 [E(\text{ГэВ})]^2}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус накопителя,  $\rho$  – радиус кривизны.

Простой арифметический расчет показал, что уже в строящемся в ИЯФ накопителе ВЭПП-2 эффект поляризации электронов и позитронов может быть обнаружен. Для ВЭПП-2 на энергии 700 МэВ время поляризации  $\tau_p$  составляло порядка одного часа, а время жизни пучка при ожидаемом вакууме ( $10^{-9}$  Торр) должно быть не хуже 2–3 часов.

Практически сразу возник ряд вопросов о влиянии реальных условий движения частиц в накопителе на процесс самополяризации. Магнитное поле, в котором частицы движутся, совершая при этом продольные и поперечные колебания, принципиально неоднородно.

К этому времени во Франции (Сакле) и в США (Аргон) уже имелся некоторый опыт по ускорению поляризованных протонов, где были обнаружены спин-орбитальные резонансы, разрушающие поляризацию частиц частично или полностью в соответствии с формулой М. Фруассар и Р. Стора [2]. Уже в первой в ИЯФ работе (Ю.Ф. Орлов и В.Н. Байер [3]) было обнаружено резкое усиление деполаризующего действия спиновых резонансов для электронов из-за возникающей диффузии от квантовых флуктуаций синхротронного излучения. Этот эффект, получивший название «спиновой диффузии», практически исключил получение поляризованных электронов высоких энергий путем ускорения в синхротронах.

Однако при радиационной поляризации возможно избежать процесса ускорения, так как частицы поляризуются при той энергии, которая

\*Автор описывает только ту часть поляризационных экспериментов, где он принимал непосредственное участие.



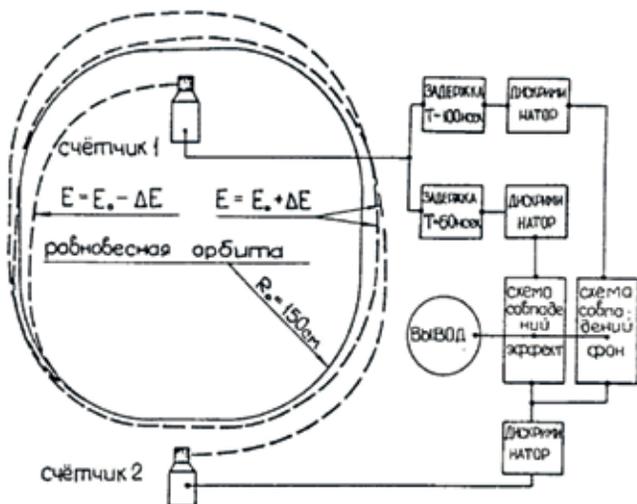
вам нужна. Теоретическое исследование практически необходимых условий для радиационной поляризации потребовало усилий нескольких групп и достаточно много времени. Только в 1973 г. теория, учитывающая реальности движения частиц и их спинов в накопителях, была создана А.Н. Скринским, Я.С. Дербеневым и А.М. Кодратенко [4]. Впоследствии правильность этой теории была проверена на всех работавших до сих пор электрон-позитронных накопителях. Однако существование эффекта радиационной поляризации было экспериментально подтверждено практически одновременно на накопителях ВЭПП-2 и АСО (Орсе, Франция) на несколько лет раньше появления полной теории.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ НА ВЭПП-2

Как известно, установка ВЭПП-2 изначально строилась для доказательства возможности встречных электрон-позитронных пучков, что еще в начале 60-х годов казалось не очень реальным делом. Ввиду серьезности задачи, ВЭПП-2 создавался в режиме «военного коммунизма», и все посторонние занятия и разговоры на пульте строго пресекались. В результате уже в 1967 г. на ВЭПП-2 были проведены реальные измерения рождения пар  $\mu^+\mu^-$  при  $e^+e^-$  - аннигиляции.

После такого успеха изменилось и отношение к поискам радиационной поляризации. К этому времени В.Н. Байер и В.И. Хоже [5, 6] по просьбе А.Н. Скринского сделали теоретический обзор процессов с участием поляризованных частиц, которые можно было применить для поиска радиационной поляризации. Для электронного накопителя наиболее простым и естественным оказалось использование зависимости от поляризации упругого рассеяния электронов при движении внутри сгустка (ЭВР). Очевидная простота этого предложения вдохновила группу энтузиастов из разных лабораторий (А.Н. Скринский, Ю.М. Шатунов, Г.М. Тумайкин, С.И. Середняков, М.Н. Егорычев) искать возможные пути его реализации. Засечь малые медленные изменения

времени жизни от ЭВР, как предлагали теоретики, на фоне многих других процессов, приводящих к гибели частиц, не представлялось возможным. Поэтому был выбран путь регистрации на совпадение рассеянных частиц с помощью двух сцинтилляционных счетчиков.



**Рис. 1.** Регистрация ЭВР на ВЭПП-2

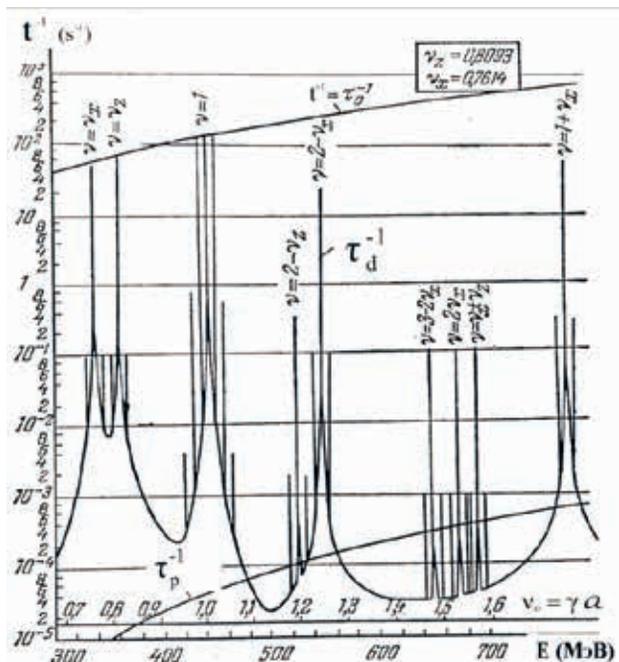
К счастью, для регистрации событий ЭВР на ВЭПП-2 не потребовалось даже устройства специальных счетчиков. На рис. 1 показана схема регистрации, для которой использовались два сцинтилляционных счетчика, расположенных в противоположных промежутках. Обычно эти счетчики применялись для измерения светимости по упругому рассеянию электронов и позитронов на малые углы.

Геометрическое расположение счетчиков обеспечивало регистрацию рассеянных электронов с отклонением по импульсу  $\Delta P/P = \eta \geq 0,02$ . Если один электрон вскоре после рассеяния попадал на внутренний счетчик, то второй, вследствие набега бетатронной фазы, достигал наружного счетчика через 1,5 оборота. Скорость счета событий ЭВР дается выражением:

$$\dot{N} \sim \frac{I^2}{V} (1 - \Delta \cdot \zeta^2), \quad (2)$$

здесь  $I$  – ток пучка,  $V$  – объем сгустка,  $\Delta$  – вклад поляризации,  $\zeta$  – её степень.

Более сложным делом оказалась оценка вклада поляризации в ЭВР с учетом деполаризующего влияния спиновых резонансов [7]. Для проведения такой оценки накопитель ВЭПП-2 можно считать круглой машиной с возмущением в виде точечного повернутого квадрупольа  $g(\theta) = g \cdot \delta(\theta=0)$ , приводящего к связи радиальных и вертикальных колебаний. Из измерений размеров электронного сгустка можно найти величину связи и рассчитать силы спиновых резонансов. Затем, опираясь на понятие спиновой диффузии, «нарисовать» полную картину времени поляризации,  $\tau = \tau_p / (\tau_p + \tau_d)$ , которая возникает вследствие равновесия процессов радиационной поляризации с временем  $\tau_p$  и спиновой диффузии с характерным временем  $\tau_d$ .



**Рис. 2.** Спиновые резонансы на ВЭПП-2

На рис. 2 представлены обратные времена  $\tau_p^{-1}$ ,  $\tau_d^{-1}$  и обратное время радиационного затухания  $\tau_0^{-1}$  как функции энергии  $E$ . Рядом с линией энергии проведена линия, проградуированная в единицах приведенной спиновой частоты  $\nu_0 = \Omega/\omega_0 = \gamma a$  (здесь  $\omega_0 = 2\pi f_0$  есть циклическая частота обращения электрона, а коэффициент  $a$  есть его магнитная аномалия).

Как следует из рис. 2, радиационная поляризация на ВЭПП-2 возможна только в области энергии  $E \geq 600$  МэВ. При схеме регистрации, изображенной на рис. 1, расчетный вклад поляризации в ЭВР составлял не более 3–4 процентов.

Первые измерения в 1967 г. показали, что нормированная на квадрат тока пучка величина  $\dot{N}/I^2$  зависит от времени и за время порядка времени поляризации изменяется в несколько раз. В основном это было связано с плохим вакуумом и его зависимостью от тока пучка. Поскольку надеяться на значительное улучшение вакуумных условий на ВЭПП-2 не представлялось возможным, выход был найден в относительно быстром разрушении поляризации во время  $\geq 2\tau_p$ . В качестве примера был взят ядерный магнитный резонанс, где аналогичная операция совершается многократно. Так как частота прецессии спина зависит от энергии частицы  $\Omega = 2\pi f_0 (1 + \gamma a)$ , было осознано, что нам нужен перестраиваемый по частоте ВЧ генератор, который можно применить в качестве деполяризатора на коротком участке орбиты. Тогда резонансная частота  $f_d$ , которая будет совпадать с частотой прецессии спинов, определяется выражением:

$$f_d = f_0 (\gamma a \pm k), \quad k - \text{целое.} \quad (3)$$

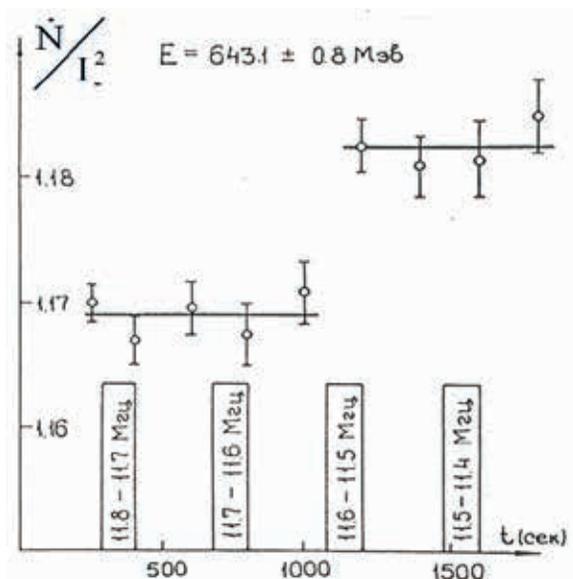
На этой стадии поиск радиационной поляризации был прерван начавшейся (после пожара в ноябре 1967 г.) модернизацией накопителя ВЭПП-2 и установкой нового детектора, которые продолжались почти 2 года. Набор статистики на встречных пучках с новым детектором занял еще 2 года, так что новые попытки увидеть эффект поляризации возобновились только в 1970 г. Одна из успешных попыток изображена на рис. 3, где величина  $\dot{N}/I^2$  измерена в нескольких точках, между которыми включался деполяризатор в указанных диапазонах частот. Измерения были начаты через 2 ч. после инъекции пучка электронов с током  $I \approx 50$  мА. Величина скачка при деполяризации в точке № 6 составляет  $\approx 1,2$  %, что соответствует степени поляризации  $\approx 50$ %.

Такие измерения стали возможными после существенного улучшения вакуума за счет новых магниторазрядных насосов в камере накопителя.

Поскольку частота спиновой прецессии зависит от энергии (3), то измерение спиновой частоты есть одновременно абсолютное измерение энергии частиц, так как магнитная аномалия электрона уже в те годы была известна с точностью  $\approx 10^{-6}$ . Этот метод получил название «резонансной деполяризации» и после ряда усовершенствований положил начало большому количеству прецизионных измерений на накопителях ИЯФ [8].

Аналогичные измерения были сделаны при нескольких энергиях ВЭПП-2. Измеренные значения частот деполяризации в основном изменялись линейно с энергией, однако при некоторых энергиях деполяризация происходила статистически достоверно в стороне от линейной зависимости. Такие измерения вполне могли быть объяснены деполяризацией на боковых резонансах  $f_d = f_0 (\gamma a \pm k) \pm f_s$ , где  $f_s$  – частота син-

**Рис. 3.** Одна из первых деполяризаций на ВЭПП-2



хротронных колебаний энергии, вполне допустимых при большой мощности генератора, питающего петлю деполяризатора. К сожалению, проверить это предположение не удалось в связи с очередной закороткой обмотки магнита ВЭПП-2. Надо сказать, что в это

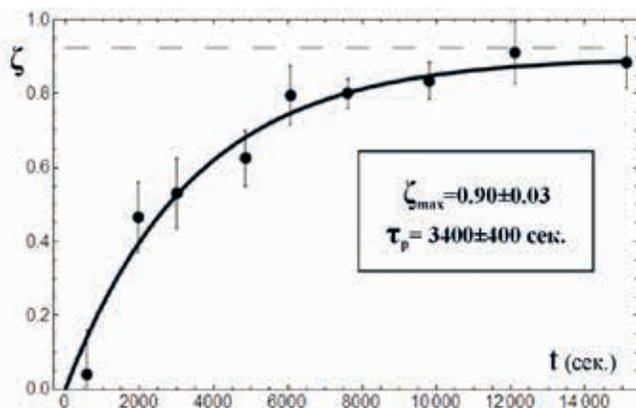
время в ЭП уже вовсю разворачивались работы по новому накопителю ВЭПП-2М, и было вполне резонно отложить дальнейшее разбирательство с радиационной поляризацией до запуска ВЭПП-2М. Так оно и произошло пять лет спустя.

Подготовленный к печати препринт о результатах ВЭПП-2 из-за «недоверия авторов» самим себе в итоге не увидел свет. Вернее сказать, был доложен в неизменном виде нашими теоретиками: В.А. Хозе в 1971 г. на зимней школе ЛИЯФ и В.Н. Байером в том же году во Фраскатти [9]. Таким образом, участники работ на ВЭПП-2 при необходимости вынуждены ссылаться на опубликованные доклады наших теоретиков.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ НА ВЭПП-2М

Новый накопитель ВЭПП-2М [10] быстро достиг уровня светимости в 100 раз большей, чем имел ВЭПП-2. Естественно, новый накопитель был заранее приготовлен для работы с поляризованными пучками. Первый поляриметр на ВЭПП-2М прослеживал трек частицы с энергией  $E_0 + \Delta E$  после внутрисгусткового рассеяния в одном из экспериментальных промежутков с помощью включенных на совпадение трех сцинтилляционных счетчиков и «сэндвича», который выделял частицы с энергией  $(1,17 \div 1,27) E_0$ . С этим поляриметром был наблюден процесс самополяризации пучка электронов по скачку нормированной скорости счета ЭВР при резонансной деполяризации в различные моменты времени [11]. Степень поляризации определялась по расчетной формуле:

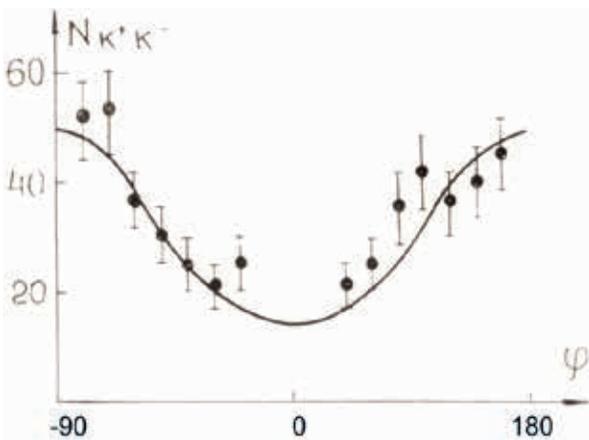
$$\dot{N} = 0,05 I_{-}^2 (1 - 0,25 \zeta^2) \quad (4)$$



**Рис. 4.** Процесс самополяризации на ВЭПП-2М

Предельная степень и время радиационной поляризации близки к расчетным по формуле (1), что свидетельствует о малости спиновой диффузии, связанной с наличием спиновых резонансов.

Произведение степеней поляризации пучков  $\zeta^+ \cdot \zeta^-$  может быть измерено в основных экспериментах на встречных пучках, поскольку сечения рождения (рассеяния) зависят от взаимных ориентаций спинов электрона и позитрона. На ВЭПП-2М детектором ОЛЯ в 1975 г. была измерена вертикальная асимметрия рождения мюонов [12]. Этот способ особенно привлекателен в области энергий рождения векторных мезонов, где сечения резко нарастают. Так, например, азимутальная асимметрия рождения  $K^+K^-$  пар наблюдалась на  $\phi$ -мезонном резонансе, что позволило определить поляризацию встречных пучков:  $\zeta^+ \approx \zeta^- = 0,8 \pm 0,1$  [11].



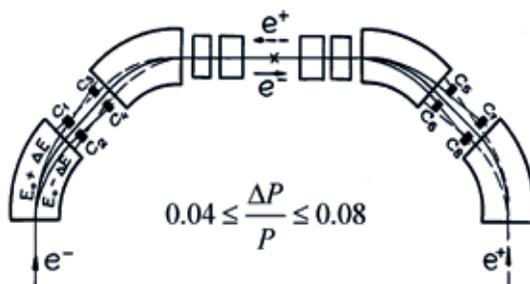
**Рис. 5** Азимутальная угловая зависимость образования пар  $K^+K^-$

Результаты измерения предельной степени поляризации как на одном пучке, так и встречных пучках показали низкий уровень влияния деполаризующих спиновых резонансов. Однако проблема этих резонансов в принципе интересна сама по себе.

Для расчета силы линейных резонансов был написан (с помощью Н.А. Винокурова) компьютерный код.

Измерения силы спиновых резонансов с помощью описанного выше поляриметра показали, что его точность недостаточна для численного сравнения с расчетом. Кроме того, на накопителе с двумя пучками лучше иметь поляриметр для каждого пучка. Схема такого симме-

тричного поляриметра показана на рис. 6, который затем применялся на ВЭПП-2М до конца его дней.



**Рис. 6.** Расположение счетчиков ( $C_1 - C_8$ ) нового поляриметра ВЭПП-2М

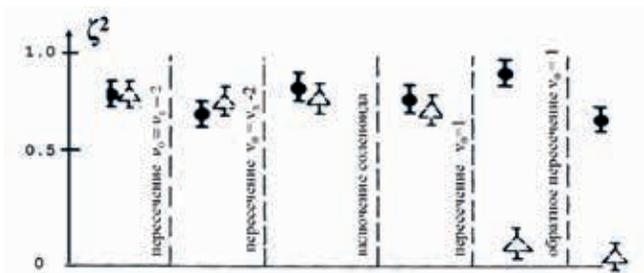
С правильной привязкой к фазе ускоряющего ВЧ поляриметр способен регистрировать одновременно события ЭВР с двух промежутков для электронов и позитронов. Кроме того, он мог измерять ЭВР из нескольких банчей, что позволяло нормировать события из поляризованного сгустка на неполяризованный пучок. Этот прием, конечно, в  $\sqrt{2}$  раз увеличивает статистическую ошибку, но зато во много раз подавляет систематические паразитные эффекты. Первый раз этот прием был использован на ВЭПП-2М в 1975 г. при изучении способов пересечения спиновых резонансов [13].

Поскольку время поляризации  $\tau_p \sim \gamma^{-5}$ , то при желании работать с поляризованным пучком при низких энергиях возникает необходимость поляризовать частицы на большой энергии, а затем пересечь все или некоторые из резонансов, которые «преграждают путь» к низким энергиям.

Как известно из работы [2], степень поляризации при пересечении резонанса силы  $w$  со скоростью  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  связана с начальной поляризацией  $\zeta_0$  формулой  $\zeta = \zeta_0 [2e^{-a} - 1]$ , где  $a = \pi w / 2\dot{\epsilon}$  – параметр Фруассар-Стора. Отсюда видно, что при быстром пересечении ( $a \gg 1$ ) поляризация сохраняется, тогда как в обратном случае ( $a \ll 1$ ),  $\zeta = -\zeta_0$ .

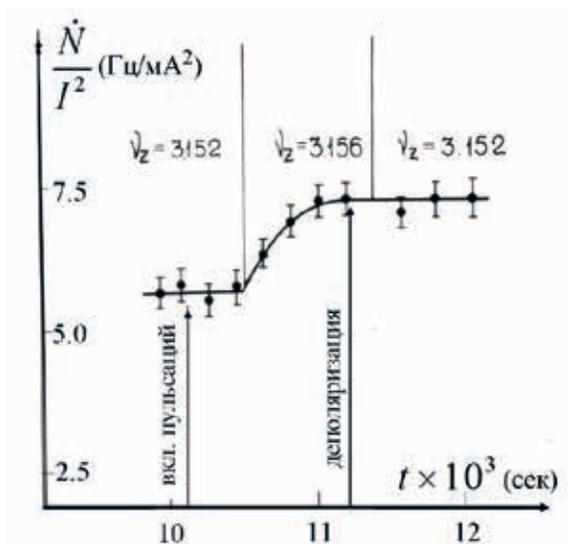
В эксперименте на ВЭПП-2М к пучку поляризованных позитронов на энергии  $E = 650$  МэВ из ВЭПП-2 добавлялся сдвинутый на пол-оборота неполяризованный сгусток. Затем энергия снижалась с выполнением условия быстрого прохождения ( $a \gg 1$ ). Первые на пути «вниз» два резонанса с бетатронными частотами  $\nu_0 = \nu_z - 2$  и  $\nu_0 = \nu_x - 2$  пересекались без видимых потерь поляризации [14]. Однако следующий «целый» резонанс  $\nu_0 = 1$  на энергии 440 МэВ приводил к полной деполяризации, как это и ожидалось из расчетов. Для его безопасного пересечения был приготовлен 0,5 м соленоид с полем 4 кГс, который генерировал искусственный резонанс с  $|w| = 4 \cdot 10^{-2}$ . Сложность такого приема связана с тем, что одновременно с целым резонансом генерируется целый ряд убывающих по силе боковых резонансов ( $\nu_0 = 1 \pm k\nu_s$ ) с частотой синхротронных колебаний энергии ( $\nu_s = 0,07$ ). Правильный выбор поля в соленоиде должен обеспечить медленное (адиабатическое) прохождение центрального резонанса и быстрое первого из возможных боковых ( $k=6$ ).

Вся описанная процедура демонстрируется на рис. 7. Треугольные точки соответствуют измерению поляризации в заходе без включения соленоида; черные точки получены с включением продольного поля перед прохождением вниз и обратно энергии 440 МэВ.



**Рис. 7.** Прохождение спиновых резонансов на ВЭПП-2М

Двадцать лет спустя прием искусственного усиления силы целых резонансов получил название «частичная Сибирская змейка» после его успешного применения на протонном синхротроне AGS, правда, без ссылки на результат ВЭПП-2М. На ВЭПП-2М после установки детектора КМД (впоследствии и КМД-2) этот метод рутинно применялся для доставки поляризованных пучков на энергию ниже 440 МэВ. Для создания нужной силы целого резонанса снижалось поле в компенсирующих катушках детектора.



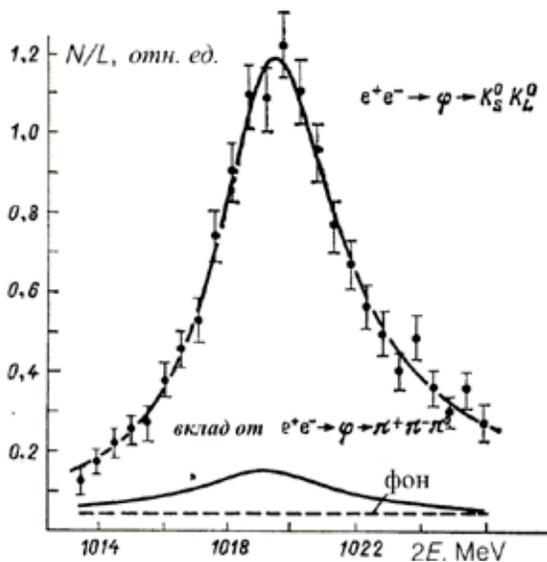
**Рис. 8.** Измерение силы резонанса  $\nu_0 = \nu_z - 2$

Более точное количественное измерение резонансной гармоники и ее сравнение с расчетным значением было проведено на резонансе  $\nu_0 = \nu_z - 2$ , который на энергии  $E = 509,6$  МэВ должен наблюдаться при частоте вертикальных колебаний  $\nu_z = 3,1565$ . На рис. 8. показано поведение скорости счета ЭВР вблизи этого резонанса. При частоте  $\nu_z = 3,152$  поляризация сохраняется достаточно долгое время. Затем включаются шумовые пульсации тока в основных магнитах накопителя на уровне  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ , что приводит к модуляции спиновой частоты и к уширению резонанса. Скорость счета поляриметра не изменяется. Однако быстрое изменение частоты вертикальных колебаний до  $\nu_z = 3,156$  приводит к полной деполяризации пучка за время  $\Delta t \sim 400$  с. Полную деполяризацию подтверждают включение деполяризатора и возвращение к начальной бетатронной частоте. Из этих данных получаем силу резонанса  $|w| \approx 4 \cdot 10^{-6}$ , что близко к компьютерным расчетам.

Преодоление спиновых резонансов открыло путь к осуществлению мечты, о которой говорили еще во времена ВЭПП-2, а именно – применение резонансной деполяризации для измерения масс векторных мезонов. Первым таким экспериментом было измерение массы  $\phi$ -мезона в 1975 г. [12]. Вначале была проведена калибровка шкалы энергии накопителя по резонансной деполяризации с привязкой к измерителю магнитного поля по ЯМР. Кривая возбуждения  $\phi$ -мезона измерялась детектором ОЛЯ в двух каналах  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  в интервале энергий от  $2 \times 507$  до  $2 \times 513$  МэВ с шагом 0,25 МэВ.

**Рис. 9.** Кривая возбуждения  $\phi$ -мезонного резонанса

Оптимальная кривая проведена с учетом радиационных поправок и интерференции  $\phi$ - и  $\omega$ -мезонов и соответствует значению массы  $\phi$ -мезона  $M_\phi = 1019,52 \pm 0,13$  МэВ.

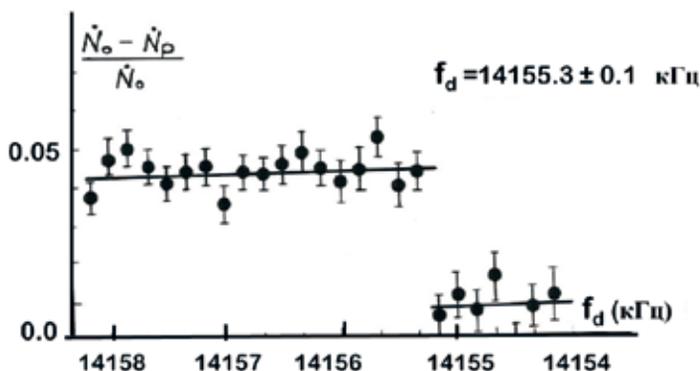


Впоследствии масса  $\phi$ -мезона уточнялась в эксперименте на ВЭПП-2М с детектором КМД-2, где была достигнута точность  $\Delta M_\phi / M_\phi = 6 \cdot 10^{-5}$ . Это уточнение массы  $M_\phi$  было достигнуто за счет большей статистики распадов  $\phi$ -мезона и за счет большей долговременной стабильности энергии накопителя. Еще в первом измерении оказалось, что калибровки энергии по резонансной деполяризации, сделанные в разное время, разбросаны на два порядка хуже точности отдельного измерения. Поляризация пучка производится в течение двух часов на большой энергии с мощностью питания магнитов около 1 МВт, что приводит к нагреву железа магнитов и охлаждающего их дистиллята.

Чтобы избежать температурных уходов энергии была предпринята попытка поляризации пучка прямо на  $\phi$ -мезонном резонансе. Согласно формуле (1), время поляризации на этой энергии составляет примерно 3 ч. Время жизни пучка в рабочей точке (плоский пучок) определяется ЭВР и при токе  $I=10$  мА не превышает 0,5 ч. Кроме того, нельзя забывать о линейных спин-бетатронных резонансах, которые при столь долгом времени поляризации могут снизить конечную степень поляризации. Выход был найден в выборе рабочей точки для поляризации на резонансе связи  $\nu_z = \nu_x = 3,21$ , где время жизни в 5–6 раз больше. В ре-

зультате через 3 ч. оставалось 5 мА позитронов с поляризацией  $\zeta=60\%$ . Резонансная деполяризация производилась в обычной рабочей точке с нормировкой на неполяризованный сгусток, инжектированный после всех перестроек частот.

Такая калибровка проводилась ежедневно в разное время суток. Показанная стабильность энергии лучше 15 кэВ была достаточна для измерения массы  $K^0$ -мезонов. Однако, очевидно, необходимо было более общее решение проблемы стабильности энергии пучков в ВЭПП-2М.



**Рис. 10.** Резонансная деполяризация с нормировкой на неполяризованный пучок

Естественно предположить, что температурные изменения приводят к сдвигу положения магнитных элементов, что, в свою очередь, сдвигает энергию на величину:

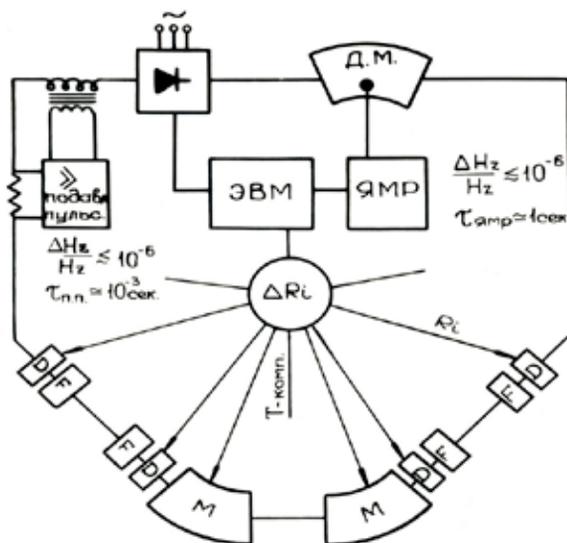
$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{k}{n} \sum_i^n \frac{\Delta R_i}{R_i}, \quad (5)$$

где  $R_i$  – радиус орбиты в  $i$ -м магните из  $n$  элементов. Коэффициент  $k$  из общих соображений имеет порядок  $k \sim 1/\alpha$ , где  $\alpha$  – параметр пространственного расширения орбит, который для ВЭПП-2М равен 0,16.

Для устранения температурного дрейфа энергии была создана система относительного измерения положения магнитов и линз с помощью механических штанг из специальной стали с малым коэффициентом температурного расширения. Один конец каждой штанги фиксировался в геодезическом знаке элемента; другой конец заканчивался магнитным сердечником, который при сдвиге изменял индуктивность катушки резонансного контура. Каждый контур настраивался на боковую линейную часть резонансной кривой. Разрешающая способность всей системы оказалась  $\sim 1$  мкм. Все изменения среднего радиуса составили  $\approx \pm 60$  мкм.

Данные об изменении положений магнитов использовались через ЭВМ как сигнал обратной связи для системы стабилизации тока выпрямителя с током 10 кА, питающего основные магниты кольца и дополнительный опорный магнит с задающим нутовым ЯМР. Кроме того, была разработана система подавления пульсаций тока выпрямителя  $\Delta I/I=10^{-6}$  в диапазоне частот от 10 до 100 Гц [15]. В целом, как показали

**Рис. 11.** Схема стабилизации энергии пучка в накопителе ВЭПП-2М (разработчики – Ю.А. Пупков, В.Ф. Веремеенко)



калибровки энергии по резонансной деполяризации, стабильность энергии пучков на ВЭПП-2М была не хуже  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$  в течение 2–3 месяцев.

В результате принятых мер и оптимальной настройки деполяризатора точность определения частоты спиновой прецессии достигла уровня  $\Delta\Omega/\Omega = 5 \cdot 10^{-7}$  при резонансной гармонике деполяризатора  $w = (2 \div 3) \cdot 10^{-8}$ . Следует заметить, что масса электрона в то время была известна с точностью  $\Delta m_e / m_e = 2,7 \cdot 10^{-6}$ .

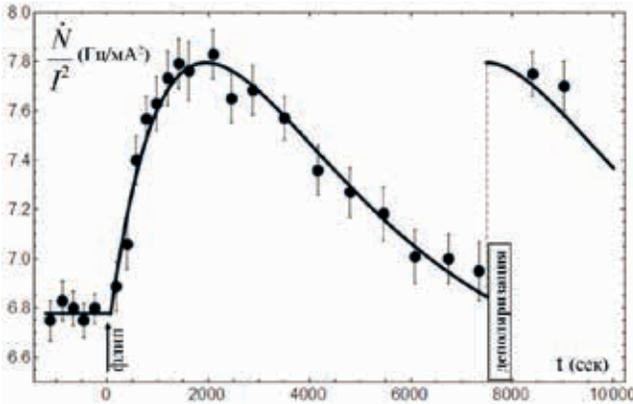
Система стабилизации энергии в дальнейшем регулярно использовалась для проведения всех экспериментов. В частности, была измерена масса  $\omega$ -мезона [16] и проведено сравнение магнитных моментов электронов и позитронов. Однако при модернизации детекторов в 1990 г. дальнейшее использование штанг оказалось невозможным. Пришлось вместо прямых измерений положения магнитов контролировать температуру железного яра магнитов. С таким контролем и с калибровкой по резонансной деполяризации стабильность энергии значительно ухудшилась, но оставалась еще вполне приемлемой  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ .

### 3. РАЗВИТИЕ МЕТОДИК. ФЛИППЕР. СПИРАЛЬНЫЙ ОНДУЛЯТОР

Одним из оригинальных изобретений на ВЭПП-2М явился высокочастотный флиппер для контроля за направлением поляризации пучков. Если частота флиппера выбирается по тому же принципу, что и для деполяризатора (ур. (3)), то можно создать искусственный спиновый резонанс достаточно большой мощности для адиабатического поворота спинов на любой энергии. При этом выполнение условия Фруассар-Стора  $a = \pi w^2 / 2\varepsilon \ll 1$  находится полностью в наших руках за счет контроля амплитуды ВЧ  $w$  и скорости изменения расстройки от резонанса  $\varepsilon$  (в отличие от пересечения целого резонанса, когда  $\varepsilon$  определяется

скоростью изменения энергии пучка). Другим существенным отличием является возможность избежать пересечения всех боковых резонансов при включении ВЧ между центральным и первым боковым резонансами. Оценки показывают, что при амплитуде резонанса  $\sim 10^{-4} \omega_0$  такое устройство является быстрым и удобным способом поворота поляризации на произвольный угол.

На ВЭПП-2М флиппер состоял из двух 30-сантиметровых охлаждаемых 5-витковых катушек, изготовленных из нержавеющей стали и помещенных в вакуум накопителя. Снаружи к катушкам присоединялся перестраиваемый конденсатор [17]. Образовавшийся контур с добротностью порядка 200 являлся нагрузкой ВЧ генератора мощностью 5 кВт, перестраиваемого в диапазоне 5–10 МГц. ВЧ продольное магнитное поле, создаваемое катушками на оси пучка, составляло 100 Гс. На рис. 12 приведена демонстрация одного адиабатического переворота поляризации на энергии  $E=652$  МэВ [18].



**Рис. 12.** Демонстрация работы флиппера

Первоначально пучок поляризовался в течение 2 ч. За это время степень поляризации достигала значения  $\zeta=0,85$  и начиналось измерение скорости счета ЭВР. В момент  $t=0$  на 2 сек. включался флиппер, частота которого за это время перестраивалась от 7990 до 8100 кГц. После этого измерения продолжались еще 20 000 сек. Поскольку вклад поляризации в ЭВР зависит как  $\zeta^2$  (2), ЭВР не различает изменение знака в точке  $t=0$ . Однако дальнейшее поведение скорости счета прекрасно отражает процесс радиационной поляризации, который начался с начальным значением  $\zeta(t=0)=\zeta_1$  и далее изменяется по закону:

$$\zeta = \zeta_0 - (\zeta_0 - \zeta_1)e^{-\frac{t}{\tau_p}}. \quad (6)$$

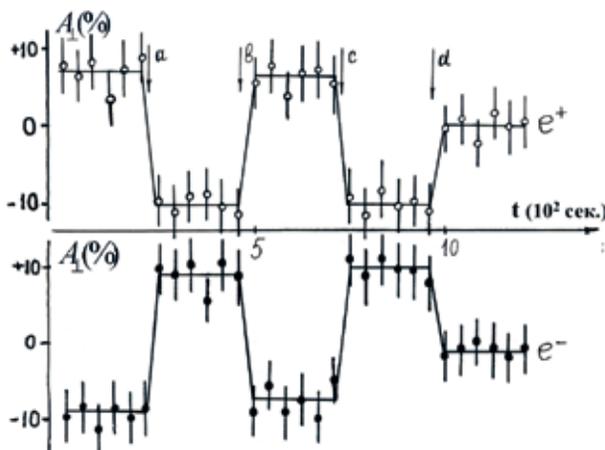
Обработка экспериментальных данных с такой аналитической зависимостью дает следующий результат:  $\zeta_1=-0,85\pm 0,02$ ,  $\tau_p=3000\pm 200$  сек.

В момент  $t=8000$  сек. производится резонансная деполяризация, в результате чего нормированная скорость счета прыгает на уровень, соответствующий неполяризованному пучку.

Данное ВЧ-устройство было изобретено для проведения прецизионного сравнения магнитных моментов электрона и позитрона. Специ-

ально для этого же эксперимента был предложен комптоновский поляриметр на основе спирального ондулятора.

Сверхпроводящий спиральный ондулятор с полем 5 кГс был установлен в одном из экспериментальных промежутков. Для достижения максимальной чувствительности к поляризации был выбран период магнитного поля  $\lambda=2,5$  см, длина –  $l=20$  см [19]. Максимальная энергия фотонов при  $E=650$  МэВ достигала 200 эВ. Вторичные гамма-кванты имели энергию  $E_{\gamma}\leq 400$  МэВ. Расчетная асимметрия в области спектра  $100 \text{ МэВ} \leq \omega_2 \leq 350 \text{ МэВ}$  составляла  $\overline{A_{\perp}} = 12\%$ ; скорость счета вторичных гамма-квантов при встречных токах  $6 \times 6 \text{ МА}^2$  была  $\approx 1$  кГц. Два детектора  $\gamma$ -квантов были установлены по обе стороны от промежутка. Каждый детектор имел два сцинтилляционных счетчика  $N_{1,2}$  с конвертором  $2X_0$  для измерения асимметрии «вверх-вниз»  $A_{\perp}=(N_1-N_2)/(N_1+N_2)$ , индукционную пропорциональную камеру, измеряющую координатные распределения  $\gamma$ -квантов и счетчик полного поглощения из кристалла  $\text{NaI(Tl)} - 20X_0$ . На рис. 13 приведены результаты одного измерения поляризации  $e^+ e^-$  пучков на энергии 650 МэВ. Время набора событий в каждой точке – 45 сек. Перед измерением пучки поляризовались в течение времени  $t=2\tau_p$ . В точках «а», «b», «с» производился переворот поляризации с помощью флиппера, а в точке «d» происходила полная деполяризация.



**Рис. 13.** Асимметрия «вверх-вниз», измеренная поляриметром на основе спирального ондулятора

#### 4. СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНА И ПОЗИТРОНА

В отсутствии электрического поля частоты прецессии спинов электрона и позитрона  $\Omega^{\pm}=\omega_0 (1+\gamma\mu^{\pm} / \mu_0)$  не должны различаться, если справедлива СРТ теорема, предсказывающая равенство по абсолютной величине свойств частицы и античастицы ( $m, e, \mu_0, \mu^{\pm}$ ). Электрон-позитронный накопитель, где частица и античастица и их спины вращаются одновременно в одном и том же магнитном поле, наилучшим образом соответствует задаче сравнения свойств магнитных моментов электрона и позитрона [20]. Первая реализация этой идеи на установке ВЭПП-2М в 1976 г. показала, что относительная разница частот спиновой прецессии при одновременной резонансной деполяризации частиц не превышает уровень  $10^{-5}$  [21].

Следующий сравнительный эксперимент был проведен после введения в строй системы стабилизации энергии, благодаря чему точность сравнения  $\Omega^{\pm}$  возросла на два порядка. При новой точности была обнаружена разность частот прецессии  $\Omega^+ - \Omega^- = 2\pi (45 \pm 5)$  Гц, которая была объяснена присутствием в камере накопителя электрического поля магниторазрядных насосов. Несколько измерений с выключением без этих насосов дали результат  $(\Omega^+ - \Omega^-) / \Omega \leq 1,2 \cdot 10^{-7}$  [22].

Для дальнейшего улучшения точности требовалось еще большая стабильность магнитного поля. Изобретение флиппера позволило улучшить точность сравнения при новой постановке эксперимента. Идея состояла в том, чтобы измерять не разность частот, а разность фаз  $\Delta\phi = \int_0^T (\Omega^+ - \Omega^-) dt$ , набранных спинами электрона и позитрона за фиксированный промежуток времени  $T$  при вращении вокруг направления магнитного поля. Поворот спинов от естественного вертикального направления в горизонтальную плоскость осуществляется флиппером при его быстром включении вне резонанса, адиабатической перестройкой и выключением в резонансе. При амплитуде флиппера  $\approx 10^{-4}$  требуемая точность знания резонансной частоты должна быть на уровне лучше  $10^{-5}$ . После выключения флиппера спины совершают «свободную» прецессию. Поскольку нас интересует только разность фаз, то через время  $T$  флиппер включается снова, и его частота изменяется в обратном порядке. Однако если за время «свободной» прецессии число оборотов спинов превышает величину  $10^6$ , то фаза ВЧ поля будет случайной по отношению к направлению спинов. В этом случае «восстановленная» поляризация будет отличаться от первоначальной. В такой схеме эксперимента, получившей название «спиновая гимнастика», достаточно времени для измерения начальной и конечной степени поляризации [23].

Решающим фактором для достижения высокой точности сравнения магнитных моментов является разброс спиновых частот. Перед началом эксперимента с флиппером теоретически и экспериментально было показано, что минимум разброса зависит от хроматизма радиальных бетатронных колебаний  $\chi = \delta v_x / \delta A_x^2$  и достигает  $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-7}$  при  $\chi = 0$ . При условии  $T \geq \tau_0$  конечный разброс с учетом спиновой диффузии будет равен  $(\delta\phi^2) = \sigma^2 T \tau_0$ .

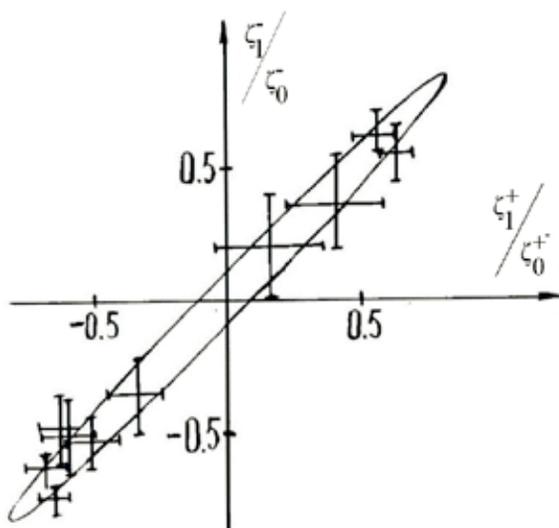
В эксперименте флиппер с амплитудой  $w = 6 \cdot 10^{-5}$  включался с расстройкой 15 кГц ( $\varepsilon = 10^{-3}$ ), которая затем уменьшалась со скоростью 50 Гц/с. Время «свободной» прецессии последовательно уменьшалось и в последних заходах составляло 0,3 сек., в течение которых спины совершали около 8 миллионов оборотов. Конечная поляризация  $\zeta_1$  связана с начальной  $\zeta_0$  соотношением:

$$\zeta_1 = \zeta_0 \left( \cos^2 \theta + \sin^2 \theta - \cos \bar{\phi} \cdot e^{-\frac{(\delta\phi)^2}{2}} \right). \quad (7)$$

Здесь  $\theta$  – угол поворота спинов от вертикали. Экспериментальные данные нескольких измерений, в которых  $\theta \leq 75^\circ$ , собраны на рис. 14.

Были также проведены измерения с искусственным сдвигом частот прецессии фиксированным электрическим полем. Суммарная обработ-

**Рис. 14.** Измерение разности фаз спинов электронов и позитронов за 8 000 000 вращений



ка всех данных позволяет заключить, что разность аномальных магнитных электрона и позитрона не превышает  $\Delta\mu^+/\mu^+ \leq 10^{-8}$ . Однако поскольку частота прецессии содержит массу, заряд и аномальный магнитный момент частиц, то данный результат на то время (1987 г.) был лучшей проверкой СРТ теоремы для лептонов. Подробное описание этого эксперимента можно найти в [27].

## 5. ВЭПП-3

Как известно, в 1974 г. был открыт  $J/\psi$ -мезон. Это событие всколыхнуло коллектив ВЭПП-3, захотелось увидеть эту новую частицу. Поскольку было известно, что частица имеет очень малую ширину, то появилось желание применить резонансную деполяризацию для калибровки энергии накопителя. Для этих целей были быстро организованы два счетчика для регистрации рассеянных при ЭВР электронов.

В качестве деполяризатора были использованы вертикальные пластины, на которые подавалось ВЧ напряжение. Пластины были нагружены на волновое сопротивление («морковка»), которое перетаскивалось туда-сюда с ВЭПП-2М, где одновременно детектором ОЛЯ измерялась масса  $\phi$ -мезона. Энергия на ВЭПП-3 в итоге была откалибрована с точностью  $\sim 10^{-5}$ , но  $J/\psi$ -мезон обнаружить не удалось по многим другим причинам.

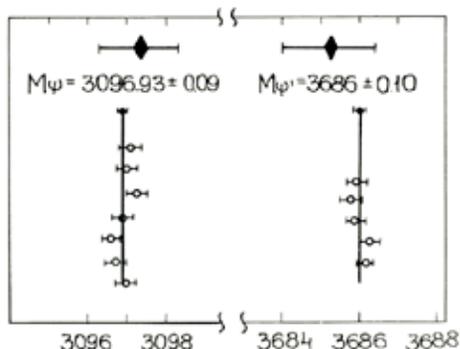
Однако измерение по резонансной поляризации пригодились вскоре Г.Н. Кулипанову и Н.А. Мезенцеву для проверки их метода измерения энергии по жесткой области СИ [24].

## 6. ВЭПП-4. ИЗМЕРЕНИЕ МАСС $\Psi$ - И $\Psi'$ -МЕЗОНОВ

Следующее применение поляризации было связано с поисками  $J/\psi$ -мезона в 1979 г., но теперь уже на ВЭПП-4 с детектором ОЛЯ, закончившим свою программу на ВЭПП-2М [25]. Наличие бустерного накопителя позволяло поляризовать пучок в ВЭПП-3 ( $\tau_p \approx 40$  мин.) и затем переводить его в ВЭПП-4. Потеря поляризации при переводе пучка не превышала 10%. Сразу после инжекции поляризованного пучка инжектировался сдвинутый по фазе неполяризованный сгусток примерно равной интенсивности и измерялось отношение скоростей счета ЭВР из двух сгустков. Сканирование частотой деполяризатора проводилось поочередно с двух сторон от резонансной частоты.

На  $\psi$ -резонансе (современное название  $J/\psi$ ) было проведено семь циклов сканирования, на  $\psi'$  ( $\psi(2S)$ ) – пять. В начале и в конце каждого цикла проводилась калибровка энергии накопителя. В ходе эксперимента и обработки данных были учтены следующие систематические ошибки: суточные колебания температуры в туннеле накопителя; несимметричное расположение детектора относительно резонатора (давало разницу энергий пучков около 2 кэВ); наличие в кольце электрических полей; точность измерения светимости (с учетом вклада поляризации вакуума в сечение мониторирующего процесса). В итоге калибровка энергии по резонансной деполаризации позволила детектору ОЛЯ измерить массы  $\psi$ -мезонов с существенно лучшей точностью, чем была раньше.

Наблюдаемая форма резонансной кривой определялась разбросом энергии частиц и радиационными поправками. Масса резонанса измерялась независимо в каждом сканировании. Данные всех измерений приведены на рис. 15 вместе с результатами предыдущих экспериментов (показаны точками вверх) [25].

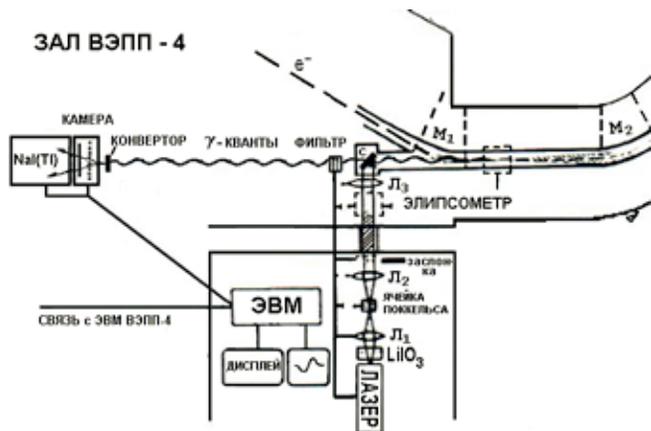


**Рис. 15.** Измерение масс  $\psi$ -,  $\psi'$ -мезонов

## 7. ЛАЗЕРНЫЙ ПОЛЯРИМЕТР

Переход ВЭПП-4 к измерению масс семейства  $\Upsilon$ -резонансов поставил вопрос о разработке нового поляриметра, поскольку метод ЭВР становится совершенно неэффективным ( $dN_{\text{ЭВР}}/dt \sim \gamma^{-7}$ ) и вклад поляризации линейно падает. В отличие от области  $\psi$ -резонансов время поляризации пучков в самом ВЭПП-4 оказалось вполне приемлемо для получения поляризованных пучков.

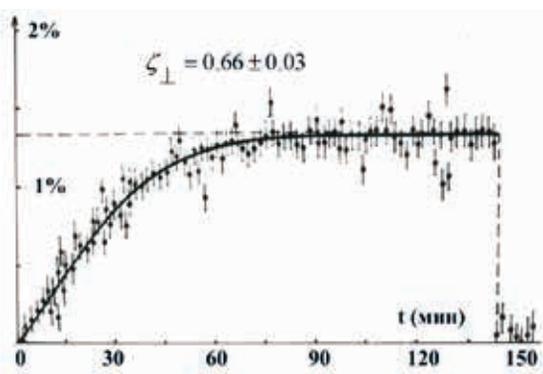
Комптоновское рассеяние циркулярно-поляризованных лазерных фотонов на электронах оказалось очень удобным и достаточно чувствительным методом для измерения вертикальной поляризации пучка.



**Рис. 16.** Схема лазерного поляриметра на ВЭПП-4 [26]

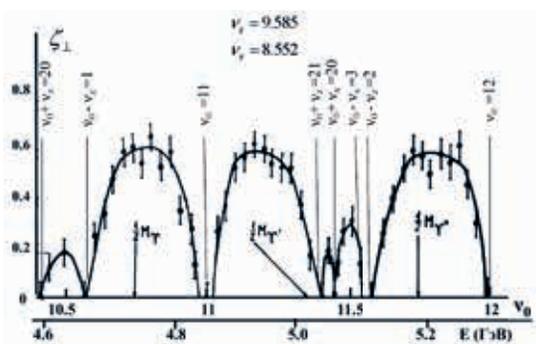
Импульсный твердотельный YAG лазер ЛТИ-502 с удвоением частоты излучения в монокристалле йодата лития  $\text{LiIO}_3$  генерирует фотоны  $\lambda=5320 \text{ \AA}$  со средней мощностью 3,5 Вт. Частота повторения – 5–20 кГц, длительность светового импульса – 70 нс. Лазерный свет фокусируется тремя линзами «Л1», «Л2», «Л3» и через вакуумное окно и подвижное зеркало «С» направляется в место встречи с электронным пучком. Первоначальная линейная поляризация фотонов преобразуется поочередно в правую или левую круговую с помощью термостабилизированной ячейки Поккельса. Вторичные  $\gamma$ -кванты с максимальной энергией 900 МэВ регистрируются детектором, состоящим из счетчика полного поглощения из кристалла  $\text{NaI(Tl)}$ . Детектор расположен в 20 м от точки взаимодействия. Поперечное распределение вторичных  $\gamma$ -квантов измеряется «слоистой» из пяти индукционных пропорциональных камер с разрешением 200 мкм отдельно для каждой круговой поляризации. Скорость счета комптоновских рассеяний составляла  $\approx 10^4$  Гц на 1 мА пучка, обеспечивая 10% точность измерения степени поляризации за 100 с. Впоследствии с лазером «INNOVA» фирмы COHERENT RADIATION скорость счета возросла в 5 раз. На рис. 17 приведен процесс радиационной поляризации на ВЭПП-4 на энергии  $E=4,7$  ГэВ.

**Рис. 17.** Радиационная поляризация на ВЭПП-4



Максимальная поляризация 66% свидетельствует о большом вкладе деполаризующих резонансов. Разрешение этой загадки ждет будущих поколений экспериментаторов. Общая картина со спиновыми резонансами, измеренная лазерным поляриметром, представлена на рис. 18.

**Рис. 18.** Спиновые резонансы в области семейства  $\Upsilon$ -мезонов



## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной исходной задачей начала экспериментов с поляризованными пучками было прецизионное измерение массы  $\phi$ -мезона, что было голубой мечтой пионеров поляризационных экспериментов. А в итоге это привело к рождению целого направления как в ускорительной физике, так и в физике элементарных частиц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А.А., Тернов И.М. О поляризационных и спиновых эффектах в теории синхротронного излучения. Докл. АН СССР, т. 153, № 5, 1963. С. 1052–1054.
2. Froissart M., Stora R. Depolarization of a beam of polarized protons in a synchrotron. Nucl. Instrum. Meth., Vol. 7, No. 3, 1960. pp. 297–305.
3. Байер В.Н., Орлов Ю.Ф. Квантовая деполяризация электронов в магнитном поле. Докл. АН СССР, т. 165, № 4, 1965. С. 783–785.
4. Дербенев Я.С., Кондратенко А.М. Кинетика поляризации частиц в накопителях. ЖЭТФ, т. 64, № 6, 1973. С. 1918–1929.
5. Байер В.Н., Хозе В.А. Эффекты рассеяния частиц внутри пучков поляризованных электронов в накопителях. Атом. энергия, т. 25, № 5, 1968. С. 440.
6. Байер В.Н., Хозе В.А. Об определении поперечной поляризации электронов большой энергии. ЯФ, т. 9, 1969. С. 409–412.
7. Шатунов Ю.М. Экспериментальное изучение радиационной поляризации: дис. канд. физ.-мат. наук. ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 1976.
8. Скринский А.Н., Шатунов Ю.М. Прецизионные измерения масс элементарных частиц на накопителях с поляризованными пучками. УФН, т. 158, № 6, 1989. С. 315–326.
9. Байер В.Н. Радиационная поляризация электронов в накопителях. УФН, т. 105, № 11, 1971. С. 441–478.
10. Будкер Г.И., Балакин В.Е., Баклаков Л.М., Боровиков В.Н., Вассерман И.Б., Зинин Э.И., Карлинер М.М., Кооп И.А., Лифшиц А.А., Лысенко А.П., Мишнев С.И., Сидоров В.А., Скринский А.Н., Трахтенбер Э.М., Тумайкин Г.М., Шатунов Ю.М. Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М Новосибирского института ядерной физики. Тр. III Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М. 1972. Т. 1. С. 318–323.
11. Середняков С.И., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Шатунов Ю.М. Изучение радиационной поляризации пучков в накопителе ВЭПП-2М. ЖЭТФ, т. 71, № 6, 1976. С. 2025–2032.
12. Букин А.Д., Дербенев Я.С., Кондратенко А.М., Курдадзе Л.М., Середняков С.И., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Шатунов Ю.М. Метод абсолютной калибровки энергии пучков в накопителе. Измерение массы ф-мезона. Тр. 5-го Межд. симп. по физике высоких энергий. Варшава. 1975. С. 138.
13. Шатунов Ю.М. Прецизионные эксперименты с поляризованными пучками в накопителях. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1987.
14. Derbenev Y.S., Kondratenko A.M., Skrinsky A.N., Shatunov Y.M. Conservation of electron polarization in storage rings while crossing spin resonances. Proc. of 10th Int. conf. on High-energy accelerators. Serpukhov, USSR. 1977. Vol. 2. pp. 76–80.

15. Баклаков Б.А., Вассерман И.Б., Вемеенко В.Ф., Карлинер М.М., Кезерашвили Г.Я., Петров С.П., Потапов Н.Г., Пупков Ю.А., Шатунов Ю.М. Стабилизация средней энергии пучков в накопителе ВЭПП-2М при проведении прецизионных экспериментов. Тр. 7-го Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, СССР. 1980. Т. 1. С. 338–340.

16. Барков Л.М., Вассерман И.Б., Воробьев П.В., Иванов П.М., Кезерашвили Г.Я., Кооп И.А., Лысенко А.П., Охупкин В.С., Михайличенко А.А., Переведенцев Е.А., Полунин А.А., Редин С.И., Рыскулов Н.М., Скринский А.Н., Смахтин В.П., Солодов Е.П., Хазин Б.И., Шатунов Ю.М., Шехтман А.И. Измерение параметров  $\omega$ -мезона с помощью криогенного магнитного детектора. Письма в ЖЭТФ, т. 46, № 4, 1987. С. 132–134.

17. Полунин А.А. Спиновый резонанс с радиочастотным полем в прецизионных экспериментах с поляризованными пучками на накопителе ВЭПП-2М. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1989.

18. Lysenko A.P., Polunin A.A., Shatunov Y.M. Spin-Frequency Spread Measurements in a Storage Ring. Part. Accel., Vol. 18, 1986. pp. 215–222.

19. Kezerashvili G.Y., Lysenko A.P., Shatunov Y.M., Vorobev P.V. Colliding beam polarization measurement using superconducting helical undulator at the VEPP-2M storage ring. Nucl. Instrum. Meth., Vol. A314, No. 1, 1992. pp. 15–20.

20. Середняков С.И. Прецизионное сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1977.

21. Serednyakov S.I., Sidorov V.A., Skrinsky A.N., Tumaikin G.M., Shatunov Y.M. High Accuracy Comparison of the Electron and Positron Magnetic Moments. Phys. Lett., Vol. 66B, 1977. pp. 102–104.

22. Vasserman I.B., Vorobev P.V., Gluskin E.S., Ivanov P.M., Kezerashvili G.Ya., Koop I.A., Lysenko A.P., Mikhailichenko A.A., Nesterenko I.N., Perevedentsev E.A., Polunin A.A., Serednyakov S.I., Skrinsky A.N., Shatunov Yu.M. New Experiments on the Precise Comparison of the Anomalous Magnetic Moments of Relativistic Electrons and Positrons. Phys. Lett., Vol. B187, 1987. pp. 172–174.

23. Vasserman I.B., Vorobyov P.V., Gluskin E.S., Ivanov P.M., Kezerashvili G.Ya., Koop I.A., Lysenko A.P., Mikhailichenko A.A., Nesterenko I.N., Perevedentsev E.A., Polunin A.A., Serednyakov S.I., Skrinsky A.N., Shatunov Yu.M. Comparison of the Electron and Positron Anomalous Magnetic Moments: Experiment 1987. Phys. Lett., Vol. B198, 1987. pp. 302–306.

24. Корчуганов В.Н., Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Салдин Е.Л., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения для оперативного измерения абсолютной энергии электронов в накопителе, Новосибирск, Препр. ИЯФ 1977-083, 1977.

25. Жоленц А.А., Курдадзе Л.М., Лельчук М.Ю., Мишнев С.И., Никитин С.А., Пахтусова Е.В., Петров В.В., Протопопов И.Я., Салдин Е.Л., Сидоров В.А., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Чилингаров А.Г., Шатунов Ю.М., Шварц Б.А., Эйдельман С.И., Эйдельман Ю.И. Абсолютная калибровка энергии ВЭПП-4М и прецизионное измерение масс  $\psi$ - и  $\psi'$ -мезонов. ЯФ, Т. 34, 1981. С. 1471–1481.

26. Воробьев П.В., Казаков А.А., Кезерашвили Г.Я., Курдадзе Л.М., Петров В.В., Никитин С.А., Скринский А.Н., Тумайкин Г.М., Шатунов Ю.М. Измерение поляризации электронов на накопителе ВЭПП-4 лазерным поляриметром. Тр. 8-го Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, СССР. 1982. Т. 2. С. 272–276.

27. Шатунов Ю.М. Пучки поляризованных частиц в ускорителях и накопителях. Новосибирск. Издательство СО РАН. 2015 г.

# ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

## Глава 1. Детекторы и эксперименты на ВЭП-1 и ВЭПП-2

А.П. Онучин

### 1.1. ПЕРВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ В ИЯФ

В этой статье автор вспоминает о первых экспериментах на встречных пучках в ИЯФ и о становлении школы физиков-экспериментаторов в объединенной лаборатории № 3 Вениамина Александровича Сидорова.

#### 1. СЕМИНАР АНДРЕЯ МИХАЙЛОВИЧА БУДКЕРА

Зимой 1957/58 учебного года в Московском университете на физическом факультете появилось объявление о семинаре Будкера, посвященном релятивистскому стабилизированному пучку. Я в то время учился на пятом курсе. От своих друзей, которые были на практике у Будкера, я слышал об организации им Института ядерной физики в Сибири, о том, что в этом институте будут заниматься экспериментами на встречных пучках. Эксперименты на встречных пучках – это фантастика! Я с нетерпением ждал семинар Будкера, хотел составить о нем свое представление. Каков директор нового института, стоит ли связываться с ним свое будущее?

Большая физическая аудитория была переполнена. Вошел Будкер, молодой, энергичный. Произнес несколько фраз, аудитория затихла. Сразу же приковал наше внимание. Он четко, предельно ясно и с большим увлечением рассказывал о релятивистском стабилизированном пучке. Конец его доклада был посвящен организации нового института в Сибири, проблемам и возможностям работы физиков в нем. Была масса вопросов, на которые Будкер отвечал увлеченно и с интересом. Доклад и личность Будкера покорили меня, появилось желание работать у него в институте.

В это время широко обсуждались результаты эксперимента Хофштадтера по рассеянию электронов на протонах, где было обнаружено отклонение от квантовой электродинамики. Тогда обсуждались три возможные причины такого результата:

1. Есть размер у электрона. 2. Есть размер у протона. 3. Квантовая электродинамика на малых расстояниях не работает. Для исследования причин требовалось резкое увеличение энергии, метод встречных пучков открывал такие возможности. Я отправился на собеседование. Со мной разговаривали Б.В. Чириков и Б.Г. Ерозолимский. Когда они

Коллайдеры и детекторы

выяснили, что тема моей дипломной работы – черенковские счетчики, то сказали, что им как раз такие специалисты и нужны. Вопрос о приеме был решен.

1 марта 1959 года я впервые вошел в Институт ядерной физики, который в то время находился в Москве на территории современного Курчатовского института. На проходной меня встретил Борис Григорьевич Ерозолимский, он рассказал о статусе ВЭП-1. В это время шло изготовление накопителя в Новосибирске. Система регистрации (так называли тогда детектор) была в производстве на заводе в Москве. Он также рассказал, что у нас очень сильный конкурент в США, поэтому работы на ускорителе – инжекторе для ВЭП-1 – идут почти круглые сутки. Тогда же состоялась моя первая встреча с А.М. Будкером и А.А. Наумовым.

## 2. ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ ДЕТЕКТОРА

Я начал изучать проект детектора для ВЭП-1. Он состоял из парциллиндрических черенковских счетчиков, включенных на совпадение. Детектор был предназначен для измерения углового распределения электрон-электронного рассеяния в интервале 40–90 градусов.

Я написал формулу, по которой можно рассчитать скорость счета событий. Встал вопрос, какой будет ток. Я спросил Бориса Григорьевича. Он отправил меня к Будкеру. Подумав, Андрей Михайлович сказал, что может быть ток 100 ампер. Я до сих пор храню журнал с этими расчетами.

## 3. РОЖДЕНИЕ ПРОЕКТА ВСТРЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПУЧКОВ

Через несколько месяцев произошло важное событие – рождение проекта встречных электрон-позитронных пучков. Я в то время сидел в одной комнате с В.Н. Байером.

Однажды Андрей Михайлович показывал Померанчуку институт, потом он зашел к нам и сказал, что Померанчука не заинтересовала наша программа экспериментов на встречных пучках. На что Байер сказал, что на электрон-электронных пучках можно только электродинамику проверять, а вот если бы были электрон-позитронные пучки...

Вот с этого все и началось. Появился физический проект, который И.В. Курчатов послал на экспертизу трем ведущим физикам страны. Все трое дали отрицательные отзывы. Это фантастика – нет еще встречных электрон-электронных пучков. Но идея важная. Курчатов принял решение в поддержку проекта. Началась бурная работа по созданию комплекса ВЭПП-2. В нее активно включились физики, радиосектор В.С. Панасюка, конструкторский отдел И.Е. Бендера.

## 4. ВТОРОЙ ВАРИАНТ ДЕТЕКТОРА

Следующий вопрос, над которым я начал работать, был связан с точностью измерения углового распределения электронов. Поперечный размер счетчиков был равен двум сантиметрам, а место встречи имело длину около трех сантиметров. Поэтому результаты измерения углово-

го распределения будут содержать большие систематические ошибки. Я рассказал об этом Борису Григорьевичу. Необходимо было с этим разбираться.

В это время у нас появился Алексей Георгиевич Хабахпашев. Он участвовал в Великой Отечественной войне, был уже кандидатом наук, старше нас и выглядел очень респектабельно в нашей мальчишеской команде. Он сказал, что о встречных пучках ничего не знает и попросил меня ввести его в курс работ. У нас установились очень приятные отношения. Алексей Георгиевич вел разговор так, что я чувствовал себя с ним на равных.

Мы стали работать вместе над проблемой, связанной с размерами счетчиков. Появился такой вариант: у одного счетчика размер 6 см, а у другого – 9 см. Это были черенковские счетчики из оргстекла (пластические сцинтилляторы тогда еще не производились). Прототип счетчиков мы испытали в лаборатории, где я готовил дипломную работу. По результатам расчетов и испытаний была опубликована статья.

Конструкторское бюро разработало проект детектора. Он представлял собой круговой рельс, на котором устанавливались счетчики. Схемы совпадений и электронику сбора информации сделали на заводе в Москве. Так появился второй вариант детектора. Он был изготовлен и собран на ВЭП-1 в Москве, а позже перевезен в Новосибирск.

При изготовлении детектора с нами вместе начали работать лаборанты В. Баев, А. Рощин, В. Ободзинский и В. Целуйкин.

## 5. ПЕРЕЕЗД В НОВОСИБИРСК

В начале 1961 г. общая ситуация складывалась следующим образом. В Новосибирске шла отделка главного здания института и вот-вот должны были появиться квартиры. В Москве ВЭП-1 уже стоял в яме, и началось изготовление ВЭПП-2 в Новосибирске. Было принято решение о том, что Алексей Георгиевич остается в Москве и занимается детектором для ВЭП-1, а я еду в Новосибирск и занимаюсь детектором для ВЭПП-2.

12 апреля 1961 года, когда Гагарин полетел в космос, я вместе с семьей приехал в Новосибирск. На вокзале нас встретил начальник отдела кадров И.А. Ядров. Такой прием нам был очень приятен – я был совсем молодой, прошло всего два года после окончания университета. Меня тогда называли «детекторщик № 1». Для работы был подготовлен кабинет в бытовках около мастерской. Через несколько дней приехал с женой лаборант Владимир Ободзинский.

Моим руководителем был Борис Валерьянович Чириков. Он переехал сюда годом раньше, читал



**Рис. 1.** Борис Валерьянович Чириков – заведующий экспериментальной лабораторией. 1962 г.

оригинальный курс физики в НГУ. Мы вместе с ним занимались схемой расположения установки ВЭПП-2 в защищенном зале. Он несколько раз мне говорил, что ему не хочется заниматься ВЭПП-2 – это большое, сложное инженерное сооружение.

Вскоре приехал «детекторщик № 2» – Кушниренко Женя, появились радиоинженер Мелехов Герман, лаборанты Яковлев Володя и Белавин Аркадий.

Андрей Михайлович часто приезжал в Новосибирск. В один из таких приездов он сказал, что нашел для меня заведующего лабораторией. Речь шла о Вениамине Александровиче Сидорове. Он получил хорошие результаты по спектроскопии нейтронов. Работал в Институте имени Нильса Бора в Копенгагене. Скоро защитит кандидатскую диссертацию. Через несколько месяцев Сидоров приехал, все посмотрел, сказал, что ему здесь нравится... и уехал.

Потом была целая эпопея с перевозом ВЭП-1 в Новосибирск.

В начале 1962 года ИЯФ полностью переехал в Новосибирск. Были созданы лаборатория № 14 Скринского для работ по коллайдерам ВЭП-1 и ВЭПП-2 и лаборатория № 3 Сидорова для работ по детекторам для ВЭП-1 и ВЭПП-2. В это время переехали А.М. Будкер, А.Н. Скринский, В.А. Сидоров, А.Г. Хабахпашев, Ю.Н. Пестов, В.Н. Баев, В.А. Целуйкин и многие другие.

Много времени и сил отдавал Андрей Михайлович подготовке физиков в Новосибирском университете. Он был одним из организаторов олимпиад школьников в городах и районных центрах Сибири. Первый тур проводился заочно. Вспоминаю его напутствие нам, молодым физикам, когда мы отправлялись на проведение второго тура олимпиады. Нам предстояло отобрать лучших ребят для третьего тура. Андрей Михайлович говорил: «Вы можете встретиться с фактами слабой подготовки ребят. Постарайтесь отделить способность от подготовки. И ни в коем

случае не уроните авторитет учителя. Помните, учитель делает великое дело – он просвещает, он поднимает уровень знаний...»

Памятны также его напутствия перед приемными экзаменами в университет членам приемной комиссии по физике. Опять главное внимание он обращал на то, чтобы отделить способности от подготовки. Уровень подготовки в разных школах и в разных семьях сильно различается. Нам нужно отобрать способных физиков. «Постарайтесь, чтобы на вас ни в ту, ни в другую сторону не действовал внешний вид молодого человека, его манера держаться и разговаривать. Постарайтесь давать задачи, на которых можно проверить физическое мышление, а не вычурные, в которых проявляются способности разгадывать головоломки...»



**Рис. 2.** Валентин Николаевич Баев

Андрей Михайлович считал, что институт должен быть организован так, чтобы физик в нем был главной фигурой. Этому принципу должна быть подчинена вся структура института. Хорошо известен будкеровский круглый стол – Ученый совет института.

На нем решались практически все важные вопросы жизни института – планы научных работ, распределение квартир, прием на работу, состояние работ на установках, новые идеи, работа служб, премии и выговоры, кадры, финансы, результаты экспериментов и т.д. В ученый совет входили ведущие физики института и руководители основных служб.

Силу круглого стола Андрей Михайлович видел в том, что в Институте созданы условия, где самые сложные вопросы обсуждаются гласно. Директор в любом случае принимает решение. Но при отсутствии круглого стола он получает информацию в разговорах с отдельными сотрудниками или от аппарата. А в этом случае информация сильно искажена активностью или пассивностью сотрудников. Особенно опасны «активные» сотрудники, поскольку они не только сами зайдут к директору, но еще попросят зайти к нему «случайно» других сотрудников, чтобы повлиять на мнение директора.

Андрей Михайлович непрерывно боролся за то, чтобы вспомогательные службы института были минимальными. Они должны делать только то, что жизненно необходимо физикам. Отдел кадров, бухгалтерия, канцелярия, аппарат ученого секретаря, если они будут большими, создадут такую систему учета, контроля, приемных часов и т. д., то есть такую бюрократию, что физик в своем институте перестанет чувствовать себя главным лицом, будет тратить массу времени впустую.

Но совсем другое отношение было у Андрея Михайловича к экспериментальному производству, к мастерским. Он считал, что экспериментальное производство в институте должно быть мощным. Количество хороших идей, если собран коллектив способных физиков, практически не ограничено. Основным ограничением в работах являются возможности экспериментального производства. С самого начала организации института и до последних дней своей жизни Андрей Михайлович очень много занимался экспериментальным производством. Каким-то образом он уговорил директора крупного новосибирского завода Александра Абрамовича Нежевенко перейти работать в наш институт заместителем директора. Надо сказать, что это была действительно уникальная находка. А.А. Нежевенко организовал мощное производство в институте. Но самым удивительным было то, что Александр Абрамович прекрасно почувствовал специфику производства в научном институте. Например, идет изготовление какой-то установки, идет уже давно, и физики, и директор явно недовольны – хочется иметь быстрее. Александр Абрамович прикладывает массу усилий, чтобы ускорить. Вдруг ученый совет и директор принимают решение остановить эту установку, так как найдено другое решение – более интересное и перспективное. И Александр Абрамович останавливает производство старой установки и начинает энергично заниматься новой. Причем именно энергично, без обиды и даже не задав глупого вопроса: «А вы достаточно подумали?»



**Рис. 3.** Александр Абрамович Неженко

Александр Абрамович имел богатый жизненный опыт, и физикам было с ним тепло и уютно. Мы его иногда называли «мамой». По любому вопросу с ним можно было не только посоветоваться, но и получить реальную помощь. Такое отношение Александра Абрамовича к институту – безусловно результат большой и деликатной работы Андрея Михайловича.

Основное здание института еще строилось, физики работали в корпусе цеха, было много проблем. И вот в этой трудной обстановке Андрей Михайлович завел прекрасный порядок общения отдела снабжения с физиками. Каждое утро сотрудница отдела снабжения обходила нас и спрашивала, что нам нужно. А на следующий день приносила необходимое или звонила нам и просила забрать, если заказанное было слишком тяжелым. Если необходимого не было на складе, она делала заявку и следила за ней.

А насколько важной была для физиков организация экспресс-участка в цеху! По простейшим эскизам заказ трудоемкостью до 20 часов выполнял экспресс-участок за срок не более двух суток. При этом достаточно было только подписи руководителя группы.

## **6. ТРЕТИЙ ВАРИАНТ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ВЭП-1**

Сразу же по приезду в Новосибирск Сидоров сделал очень важное предложение – в детекторах необходимо использовать искровые камеры. Они были открыты в 1959 году и начали входить в эксперименты во многих лабораториях. Кушниренко и Пестов стали заниматься искровыми камерами, сделали прототип искровой камеры, на которой очень эффективно регистрировались космические частицы. Лаборантом у них был Владимир Шохин.

Алексей Георгиевич и я занялись пластическими сцинтилляционными счетчиками больших размеров. С нами стали работать лаборанты

Валентин Баев, Владимир Яковлев и Аркадий Белавин. По договору с Московским электроламповым заводом разработали ФЭУ с торовидными динодами ФЭУ-30, ФЭУ-60 и ФЭУ-65 с диаметром фотокатода 5, 10 и 15 см. Сделали счетчики с размером сцинтиллятора 20х20 см. Было принято решение, что для ВЭПП-2 триггером занимается Хабахпашев, искровыми камерами – Пестов, а для ВЭП-1 триггером занимаюсь я, искровыми камерами – Кушниренко. Так появился третий вариант детектора для ВЭП-1, с которым и был проведен эксперимент по проверке КЭД.

Особо хочу отметить, что с самого начала Сидоров стремился к тому, чтобы в лаборатории была мощная радиогруппа. Из Москвы переехали Ю.В. Коршунов и В. Степанов. Здесь появились Н.П. Тумайкина, позже – С.Е. Бару, В.И. Фоминых, В.М. Аульченко, Г.А. Савинов и другие.

## 7. КУРС ЛЕКЦИЙ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ»

В это время в ИЯФ обсуждались проблемы подготовки кадров для института.

В НГУ на физическом факультете прошли первые наборы студентов. А.М. Будкер и Б.В. Чириков читали курс лекций по общей физике. Началось активное обсуждение с ректоратом НЭТИ возможности подготовки студентов для работы в ИЯФ. В результате было принято решение организовать специальную кафедру. Студенты на эту кафедру набираются по конкурсу, слушают лекции по спецкурсам, которые читают физики и инженеры ИЯФ, и работают в лабораториях института. Вениамин Александрович Сидоров, Алексей Георгиевич Хабахпашев и я стали обсуждать проблемы организации лекций по экспериментальной ядерной физике в НГУ и НЭТИ. Было решено, что лекции в НГУ будет читать Хабахпашев, а в НЭТИ буду читать я. Практикум в ИЯФ для студентов НГУ и НЭТИ было решено организовать общий, этой работой начал заниматься И.Г. Фельдман.

Опыта преподавательской работы у меня не было. Были лишь воспоминания о лекциях в МГУ и три солидные монографии. Вопросов возникало очень много: с чего начинать, какому курсу читать, один или два семестра? После долгих обсуждений было принято решение, что это будет годовой курс «Экспериментальные методы ядерной физики» для студентов 4-го курса. Он будет посвящен теории прохождения частиц через вещество, приборам для регистрации частиц, законам статистики в ядерных экспериментах и экспериментам на встречных пучках. Главная цель курса – научить слушателей понимать основные явления, делать оценку эффектов, получать данные, используя монографии и справочники. Подготовка лекций потребовала от меня много времени. Необходимо было среди большого количества материала выбрать наиболее важное. И вот в сентябре 1964 года состоялась моя первая лекция. Несмотря на большое волнение, я остался доволен. Первый учебный год прошел успешно.

В 1966 году в НЭТИ был создан физико-технический факультет и кафедра электрофизических установок и ускорителей. Деканом факуль-

тата стал Е.М. Самойлов, заведующим кафедрой – Евгений Арамович Абрамян, секретарем кафедры – Светлана Степановна Дербенева. Через несколько лет кафедру возглавил Вадим Иванович Волосов, обязанности секретаря кафедры начала выполнять Татьяна Васильевна Кучина. В это время лекции читали И.А. Шехтман, В.Г. Зелевинский, В.В. Соколов, В.С. Сынах и другие. Мы проводили конкурсы по набору студентов на кафедру, в среднем кафедра выпускала двадцать пять человек в год.

## 8. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭП-1

Работы по монтажу и запуску ВЭП-1 велись в высоком темпе. Начались эксперименты по инжекции в ВЭП-1. В этих работах участвовали Александр Скринский, Станислав Попов, Герман Тумайкин, Геннадий Кулипанов, Эдуард Зинин. Работы по запуску велись круглосуточно. Эти эксперименты привели нашу команду в уныние. Особенно неожиданным оказался эффект гибели пучков при их сведении. Появился загадочный термин «эффекты встречи». Даже стали высказываться мысли, что основные работы на встречных пучках будут посвящены исследованию неустойчивостей аналогично тому, как это было в термояде.

Каждое утро заходил Алексей Александрович Наумов.

Часто заходил Андрей Михайлович Будкер, иногда он приходил с высокими гостями.

Почти каждый день приходил Вениамин Александрович Сидоров.

Помню, какую большую радость у всех нас вызвал результат, что при малых токах пучки не гибнут.



Сложная серия экспериментов показала, что можно иметь токи примерно до 100 мА, когда эффекты встречи еще не работают. Да... Это не 100 А, что было в оценках в Москве. Это означало, что светимость будет в миллион раз меньше. Однако оценки показали, что и при такой светимости в эксперименте по проверке квантовой электродинамики можно получить значимый результат. Это заключение прибавило энтузиазма в команде.

**Рис. 4.** А.П. Онучин и В.А. Сидоров обрабатывают результаты эксперимента на ВЭП-1: делят число событий рассеяния на малые углы на куламы (кулон-амперы)

Нужно было понять, каким образом настраивать положение пучков по радиусу, по вертикали и по фазе, выбирать оптимальные токи. Необходим был монитор с большой скоростью счета. И тогда родилась идея – поставить счетчики около орбиты в вакуумную камеру (счетчики под малыми углами). У этих счетчиков скорость счета по сравнению с основным детектором будет в тысячу раз больше. Был изготовлен один счетчик, измерения с которым показали обнадеживающий уровень фона. Быстро были изготовлены все счетчики, схемы совпадений и электроника сбора данных. Началась круглосуточная работа с пучками. И вот в ночную смену 19 мая 1964 года была зарегистрирована первая светимость!!! Это был триумфальный этап большой работы ИЯФ!

В 1965 году у нас произошло редкое в отечественной науке событие – по работам на ВЭП-1 и ВЭПП-2 А.Н. Скринский защитил докторскую диссертацию без защиты кандидатской диссертации!

На ВЭП-1 начались физические эксперименты с искровыми камерами. Именно тогда мы впервые наблюдали двойное тормозное излучение. С помощью этого процесса и рассеяния на малые углы стали надежно измерять светимость. По результатам этих экспериментов в 1966 г. я защитил кандидатскую диссертацию. На защите Сидоров сказал, что это первая диссертация по физике частиц, выполненная методом встречных пучков.

Затем была проверена справедливость квантовой электродинамики. В экспериментах с искровыми камерами были проведены измерения электрон-электронного рассеяния при энергии 43, 135 и 160 МэВ в пучке. Было получено, что КЭД справедлива до расстояния  $5 \cdot 10^{-14}$  см. На основе этих экспериментов в 1967 г. Кушниренко защитил кандидатскую диссертацию.

Одновременно с экспериментом на искровых камерах был впервые исследован подробно процесс двойного тормозного излучения и впервые исследован процесс однократного тормозного излучения с регистрацией рассеянных электронов на малый или на большой угол. Для сравнения экспериментального спектра гамма-квантов с теоретическим на ВЭП-1 в месте встречи был получен пучок меченых монохроматических гамма-квантов.

Результаты экспериментов подтвердили теорию Байера-Фадина-Хозе.

В 1967 г. за успехи, достигнутые в работах на ВЭП-1 и ВЭПП-2, А.М. Будкер, А.А. Наумов, В.С. Панасюк, В.А. Сидоров и А.Н. Скринский были награждены Ленинской премией. Это был период мирового признания наших работ. В 1968 году В.А. Сидоров и А.Н. Скринский избираются членами-корреспондентами АН СССР.

## 9. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭПП-2

В 1967 году, когда успешно заканчивались эксперименты на ВЭП-1, на ВЭПП-2 впервые в мире на встречных пучках был исследован процесс сильного взаимодействия – зарегистрирован  $\rho$ -мезон и измерены его параметры!

Детектор на ВЭПП-2 был сложной установкой, предназначенной для регистрации и идентификации частиц. Снизу и сверху от места встречи стояли координатные, ливневые и пробегные оптические искровые камеры. На основе экспериментов, выполненных на ВЭП-1 и ВЭПП-2, В.А. Сидоров в 1967 году защитил докторскую диссертацию. Результаты эксперимента по  $\rho$ -мезону составили основу кандидатской диссертации Ю.Н. Пестова.

В 1968 году у наших французских коллег в Орсе заработал коллайдер АКО, и они исследовали распад  $\phi$ -мезона на две моды – пару нейтральных каонов и три пиона. В 1969 году на ВЭПП-2 был проведен эксперимент в области энергии  $\phi$ -мезона. К этому эксперименту были заметно улучшены коллайдер ВЭПП-2 и детектор. Наш детектор позволил регистрировать, кроме этих двух процессов, еще распад на пару заряженных каонов. Эту моду французы исследовали также в 1969 году. В результате работ двух лабораторий были получены наиболее точные параметры  $\phi$ -мезона. Результаты исследования  $\phi$ -мезона легли в основу докторской диссертации А.Г. Хабахпашева.

На ВЭПП-2 после окончания набора статистики для изучения  $\phi$ -мезона были поставлены свинцовые пластины перед координатными камерами и проведен эксперимент по проверке квантовой электродинамики в процессе аннигиляции в два гамма-кванта.

На результатах этого эксперимента В.Е. Балакин защитил кандидатскую диссертацию.

Приятно вспомнить, что при обработке эксперимента по изучению  $\phi$ -мезона Е.В. Пахтусова и А.Г. Хабахпашев обнаружили события, состоящие из двух частиц с малой энергией. Это вызвало большой интерес. Объяснение этому процессу предложил В.Е. Балакин, указав на работу Ландау, в которой рассматривался процесс двухфотонного рождения электрон-позитронной пары. Это было первое наблюдение данного процесса. Фактически оно явилось началом эры двухфотонной физики на встречных пучках. Материал этого эксперимента стал основой кандидатской диссертации Е.В. Пахтусовой.

В 1970 году был проведен эксперимент при энергии выше  $\phi$ -мезона. Удалось поднять энергию ВЭПП-2 до 670 МэВ в пучке. В этой области энергии еще никто не работал. К данному эксперименту в детекторе оптические искровые камеры были заменены на проволочные искровые камеры и поставлены водяные черенковские счетчики.

В 1968 году у нас появилась машина «Минск-22», которую мы использовали в первых экспериментах в режиме онлайн. Надежную работу машины обеспечивал В.М. Попов.

Проволочными искровыми камерами занимались Лери Курдадзе, который закончил НГУ в 1967 г., и Владимир Грошев, который закончил университет в 1970 г. Электронику для этих камер сделал Семен Ефимович Бару. Водяными черенковскими счетчиками занимался Сергей Середняков, который закончил университет в 1968 г. Проволочные камеры существенно сократили время от набора статистики до получения результата. Черенковские счетчики позволили разделить пионы и каоны

и идентифицировать электроны в событиях двухфотонного рождения электрон-позитронных пар. Замечу, что в этом детекторе впервые на встречных пучках использовались и проволочные камеры, и черенковские счетчики.

Самым важным результатом этого эксперимента было открытие многоадронных событий.

Число событий существенно превышало теоретические оценки. Набор статистики закончился в мае. Был подготовлен препринт, и в августе 1970 года эти результаты были представлены на Рочестерской конференции в Киеве. Туда поехали В.А. Сидоров и я, с докладом было поручено выступить мне. Важным событием на этой конференции было то, что итальянцы на установке ADONE обнаружили аналогичные многоадронные события, но при более высокой энергии. Вокруг этих результатов была бурная дискуссия. Природа их осталась загадочной.

Обработка эксперимента продолжалась еще два года. В заключительной публикации было сказано, что не существует теории, которая бы объясняла природу многоадронных событий. Лишь позже, когда восторжествовала кварковая модель, стало ясно, что это было одно из первых наблюдений образования адронов из легких кварков.

Кроме открытия многоадронных событий, в этом эксперименте был получен еще один неожиданный результат – сечение рождения пар пионов и каонов превышает расчет по модели векторной доминантности. Позже в этой области энергии были открыты тяжелые векторные мезоны ( $\rho'$ ,  $\phi'$  и другие). В этом эксперименте были изучены еще два процесса – рождение пар мюонов и двухфотонное рождение электрон-позитронных пар.

Результаты эксперимента 1970 года легли в основу кандидатской диссертации Л.М. Курдадзе и моей докторской. После киевской конференции в ИЯФ было принято два важных решения.

Первое – построить коллайдер ВЭПП-2М на ту же энергию, что у ВЭПП-2, но увеличить светимость на два порядка, и иметь два места встречи. Началась разработка коллайдера и детекторов ОЛЯ и КМД. И второе решение – форсировать работы с целью перехода в область более высоких энергий, чем достигнуты в Италии. Возросла активность работ на ВЭПП-3. Для этого коллайдера группа Балакина начала разрабатывать детектор на основе оптических искровых камер.

Наша группа начала разрабатывать большой магнитный детектор МД-1 на основе многопроволочных пропорциональных камер. С методом многопроволочных пропорциональных камер я познакомился в 1968 г., когда был в ЦЕРН. Там я познакомился с автором этих камер Шарпаком. Впоследствии Шарпак получил за разработку этих камер Нобелевскую премию.

Мы развернули работы по изучению многопроволочных пропорциональных камер. В этих работах принимали участие Владимир Грошев, Валерий Тельнов, Юрий Тихонов, Владимир Панин, Александр Бондарь и Виктор Жилич. Семен Ефимович Бару организовал производство гибридной схемы усилителя-формирователя на заводе в Подмосковье.

Сцинтилляционными счетчиками занимался Анатолий Воробьев, а газовыми черенковскими счетчиками занимались Воробьев и Шамов. Радиоэлектронику для детектора разрабатывали С.Е. Бару, В.М. Аульченко и Г.А. Савинов.

В это же время СЛАК принял решение строить коллайдер СПИР.

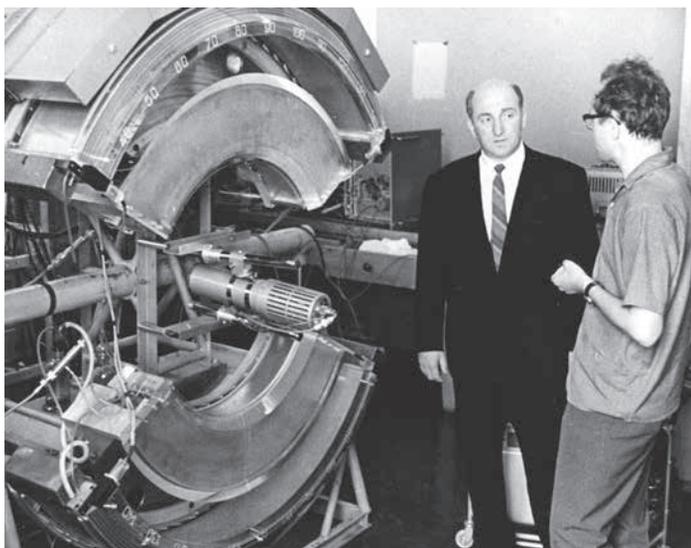
Помню обсуждение в коттедже у Андрея Михайловича проекта нашего детектора МД-1.

По тем временам это был громадный детектор – вес 500 тонн, объем магнитного поля 10 кубических метров, напряженность поля 16 килогаусс, 300 пропорциональных камер размером до 2 метров, 16 тысяч каналов электроники, полмиллиона проволочек диаметром 30–100 микрон, большие газовые черенковские счетчики с этиленом под давлением 25 атмосфер, потребляемая мощность 4 мегаватта. По сложности и стоимости он отличался на порядок от предыдущего поколения детекторов. После моего короткого рассказа о детекторе Буднер спросил: «Скажите, что здесь заложено нового, необычного?» «Много нового, – ответил Сидоров, – поле направлено перпендикулярно орбите пучка, а у всех оно параллельно. Громадное количество пропорциональных камер, эту методику только начали осваивать физики. Большие черенковские счетчики со взрывоопасным газом – таких нет ни у кого. В детекторе слишком много заложено нового, и есть риск, заработает ли он вообще». Буднеру это понравилось. Он спросил Л.М. Баркова о возможности изготовления сверхпроводящей обмотки для детектора. Тот ответил: «Правильно, что выбран «теплый» вариант». После этого Андрей Михайлович еще раз напутствовал нас примерно так: «Имейте в виду, что вы идете в новую, неизвестную область энергии, там могут быть неожиданные явления. Постарайтесь выбрать детектор достаточно мощным и эффективным. Выберите хороший вариант – институт будет получать много интересно, необычного. Работа будет на долгие годы. Не забывайте о физиках за рубежом, они скоро включатся в эти проблемы. Ищите и закладывайте новые подходы».

## 1.2. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭП-1

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты на ВЭП-1 проводились под руководством В.А. Сидорова. На ВЭП-1 были исследованы следующие процессы: рассеяние электронов на большие и малые углы, двойное тормозное излучение, однократное тормозное излучение, а также получен пучок монохроматических гамма-квантов, изучен режим сверхтонкой мишени в накопителе, исследованы параметры счетчика полного поглощения типа сэндвич, создан магнитный парный спектрометр высокой эффективности.



**Рис. 1.** А.М. Буднер и В.А. Сидоров рядом с детектором для ВЭП-1

Эксперименты проводились при трех значениях энергии коллайдера ВЭП-1: 43, 135 и 160 МэВ. Типичные значения токов были 50-100 мА, светимость –  $(1-5) \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Поперечные размеры пучков были 1 мм и 3 мм в вертикальном и радиальном направлении соответственно. Продольный размер был около 5 см. Время жизни составляло 5-10 минут, частота обращения пучков – 116 МГц.

### 2. РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА БОЛЬШИЕ УГЛЫ

Главной целью экспериментов на ВЭП-1, кроме реализации метода встречных пучков, была проверка квантовой электродинамики при больших передачах импульса,  $\sim 0,2 \text{ ГэВ/с}$ . Классически это соответствовало проверке закона Кулона на расстоянии менее  $10^{-13} \text{ см}$ , то есть меньше размера нуклона. Сечение  $e^-e^-$  рассеяния на большие углы в квантовой электродинамике (КЭД) описывается формулой Мёллера. При расчете сечения модифицируется фотонный пропагатор  $1/q^2 \rightarrow 1/q^2 \cdot 1/(1-\Lambda^2 \cdot q^2)$ , что позволяет установить верхний предел на параметр нарушения  $\Lambda$ , который является мерой чувствительности эксперимента к возможному нарушению КЭД.

Вспоминает Е.В. Пахтусова:

– Вглядываясь во времена начала экспериментов на встречных пучках в нашем институте, понимаешь, как давно все это было, как сильно изменилась среда физического эксперимента, как сейчас трудно понять молодым, в каких условиях проводились исследования, и как было сложно получать результаты мирового значения при таком низком уровне автоматизации, при практическом отсутствии математического обеспечения и весьма ограниченных компьютерных мощностях.

Подготовку и проведение экспериментов возглавил В.А. Сидоров, которому едва исполнилось 30 лет. С самого начала было принято направление на максимальную автоматизацию эксперимента, позволяющую получать надежные результаты. Для этой цели В.А. Сидоровым была создана в лаборатории группа радиоинженеров, обеспечивающая эксперименты необходимой электроникой, был построен свой вычислительный центр. Следует отметить, что принципы и подходы, заложенные В.А. Сидоровым в те времена при проведении экспериментов, в основном остались те же, что и сейчас, но сейчас это, естественно, осуществляется на более высоком технологическом уровне.

В проведении экспериментов участвовало большое количество техников и лаборантов, инженеров и физиков. Перечислить всех здесь невозможно, можно лишь выразить благодарность всем этим людям за их труд, принеший нашему институту славу первопроходцев на трудном пути освоения тайн мироздания.

Уже много написано о технической стороне проведенных экспериментов, поэтому здесь мне хочется вспомнить о людях, с которыми мне довелось работать в те давние времена и результаты труда которых сейчас составляют историю и гордость нашего института.

Еще будучи студенткой, однажды я пришла в институт и увидела в комнате стоящего у доски улыбающегося высокого красивого молодого человека. Рядом с ним, у стенки, стояли рюкзак и гитара. Это был Кушниренко Женя, выпускник МИФИ. Он, еще не определившись с местом жительства, только что с вокзала, появился в институте, полный желания включиться в работу.

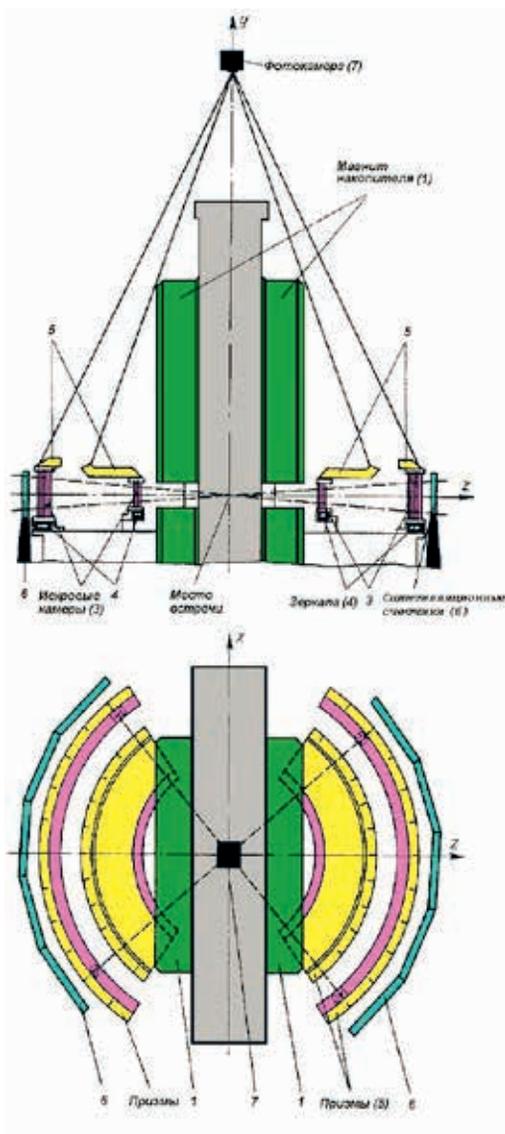
Первым экспериментом в институте на установке ВЭП-1 была проверка квантовой электродинамики на малых расстояниях. Эта работа требовала новых подходов в проведении эксперимента, и ее возглавил Женя Кушниренко. Успешное проведение этого эксперимента и аналогичных экспериментов в США положили начало эпохе встречных пучков, приведших к глобальным изменениям наших знаний о физике элементарных частиц.

Детектор представлял собой несколько цилиндрических секторов оптических искровых камер и сцинтилляционных счетчиков, расположенных в горизонтальной плоскости (рис. 2). Сцинтиллятор в счетчиках был на основе полистирола. В качестве фотодетектора исполь-

**Рис. 2.** Детектор для ВЭП-1:  
 1 – магнит накопителя;  
 2 – место встречи;  
 3 – искровые камеры;  
 4 – зеркала;  
 5 – призмы;  
 6 – сцинтилляционные счетчики;  
 7 – фотокамера

зовался ФЭУ-30, разработанный совместно ИЯФом и МЭЛЗом. Искровая камера представляла собой плоский или цилиндрический зазор, заполненный гелием. Во время прохождения частицы сцинтилляционные счетчики давали сигнал триггера. Последующий генератор вырабатывал высоковольтный импульс амплитудой в десятки киловольт, который подавался на пластины камеры. Пробой в виде яркой искры наблюдался вдоль трека частицы и с помощью сложной системы зеркал передавался на фотокамеру РФК-5, расположенную сверху над всей системой. Оптическая система позволяла получать информацию об азимутальной и вертикальной координате искры и, соответственно, рассеянного электрона. Скорость счета запусков составляла около 0,1 Гц. Всего было записано около 100 тыс. событий.

Фоновые условия на ВЭП-1 были достаточно тяжелыми и по современным меркам. Частота обращения пучков составляла 116 МГц, загрузки систем детектора были до ста килогерц, поэтому электроника должна была быть достаточно быстродействующей. В то время в жизнь широко входили транзисторы, но было также достаточно много громоздких ламповых приборов. Стоит упомянуть знаменитый в то время одноканальный амплитудный анализатор АИ-100 («Радуга») высотой 2 метра и шириной 1 метр. Очень красиво выглядели пересчетки на детекторах («Волна»). Широко использовались высоковольтные источники для питания ФЭУ ВС-22. Такие устройства, как дискриминаторы,



схемы совпадений, пересчетки, уже разрабатывались радиогруппой в лаб. 3 и производились в ИЯФ. Для их производства применялись высокочастотные транзисторы, поэтому быстродействие зачастую составляло уже сотни мегагерц.

Пленки с записями искр в камерах после проявления просматривались на специальном просмотрном аппарате, и данные о треках переносились на перфоленту. Это делало возможным извлечение координат и углов треков рассеянных электронов и обработку информации на компьютере сначала на вычислительном центре (ВЦ СО АН), а в дальнейшем на ЭВМ МИНСК-22 в ИЯФ. При обработке снимков выделялись коллинеарные  $e^+e^-$  события (условия отбора показаны на рис. 3).

Эффект  
1109 случаев

Фон  
66 случаев

Космика  
18 случаев

100

-10 0 10

-10 0 10

-10 0 10

$\Delta\theta$ , градусы

**Рис. 3.** Распределение по расколлинеарности  $e^+e^-$  событий на ВЭП-1

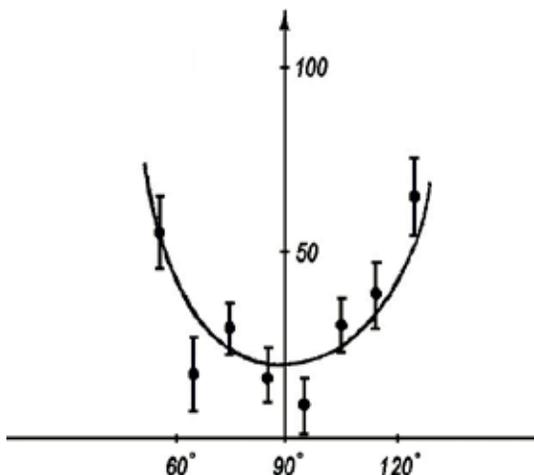
Обработкой эксперимента занимались В.А. Сидоров, Е.В. Пахтусова и Е.А. Кушниренко. По отобранным событиям было получено угловое распределение по полярному углу (рис. 4), из которого и был получен предел  $1/\Lambda > 0,4$  ГэВ/с. Таким образом, квантовая электродинамика была проверена до расстояний 0,5 ферми. В Стэнфорде при энергии  $E_{\text{CM}}=600$  МэВ одновременно с нашим результатом был получен предел 0,26 ферми. Отметим, что ВЭП-1 и коллайдер в Стэнфорде были первыми установками, на которых проводились эксперименты по проверке квантовой электродинамики. Эти работы в Стэнфорде и Новосибирске внесли определяющий вклад как в развитие метода встречных пучков, так и в методику проведения физических экспериментов.

### 3. РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА МАЛЫЕ УГЛЫ

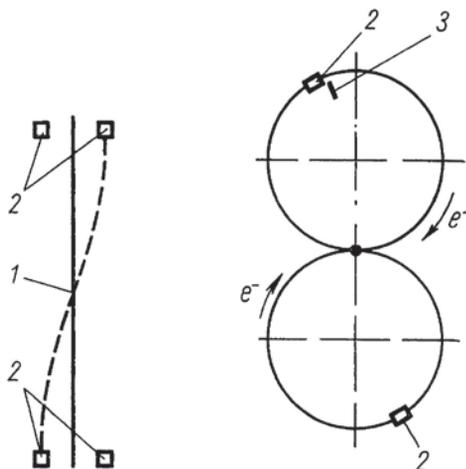
Для мониторинга светимости использовался процесс  $e^+e^-$  рассеяния на малые углы. Система малых углов представляла собой ма-

ленькие сцинтилляционные счетчики, установленные очень близко к орбите электронов на расстоянии  $1/4$  длины бетатронных колебаний от места встречи и регистрировавшие процесс упругого электрон-электронного рассеяния на угол порядка  $1,5^\circ$  (рис. 5). Скорость счета процесса составляла около 10 Гц. Систематическая ошибка измерения светимости оценивалась на уровне 10-20%.

**Рис. 4.** Угловое распределение по полярному углу  $e^-e^-$  событий на ВЭП-1



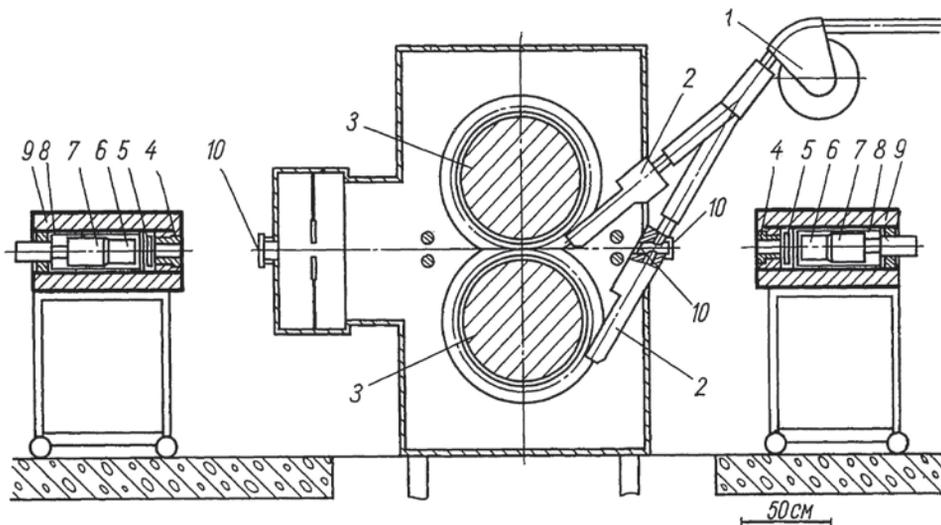
**Рис. 5.** Расположение счетчиков под малыми углами на ВЭП-1:  
1 – траектория пучков;  
2 – счетчики;  
3 – защита от фона



Сечение регистрации событий  $e^-e^-$  рассеяния в системе малых углов было в 2 тысячи раз больше, чем в системе регистрации рассеяния на большие углы. Система малых углов использовалась для настройки оптимального положения пучков в радиальном и аксиальном направлениях, а также положения пучков по фазе. Измерения показали, что основным фоновым процессом является рассеяние электронов на остаточном газе. Фон вычитался по методу задержанных совпадений. Разрешающее время схем совпадений составляло 3 нсек. Отношение эффект-фон было около 0,5. С помощью этой системы 19 мая 1964 года впервые была зарегистрирована светимость на ВЭП-1. В дальнейшем этот процесс использовался для измерения светимости в экспериментах по рассеянию на большие углы, двойному тормозному и однократному тормозному излучению. Отметим, что метод измерения светимости по рассеянию на малые углы впервые был применен на ВЭП-1 и в дальнейшем использовался на многих коллайдерах.

#### 4. ДВОЙНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

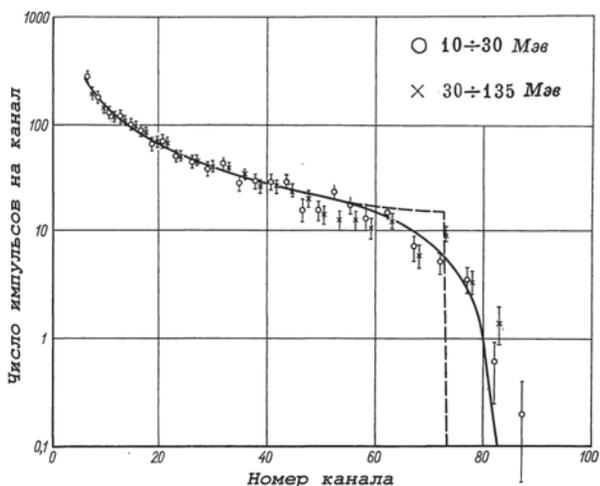
На ВЭП-1 впервые изучался процесс двойного тормозного излучения (ДТИ). Детектор состоял из двух сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) диаметром и высотой 15 см, расположенных по касательной к пучкам в месте встречи с противоположных сторон (рис. 6).



**Рис. 6.** Система счётчиков для двойного тормозного излучения на ВЭП-1: 1-3, 10 – элементы ускорителя, 4-9 – элементы счётчиков с кристаллами NaI(Tl)

Фон случайных совпадений определялся процессами однократно-го тормозного излучения (ОТИ) и тормозного излучения на остаточном газе. Фон вычитался методом задержанных совпадений. Были измерены энергетические спектры обоих фотонов в процессе ДТИ (рис. 7).

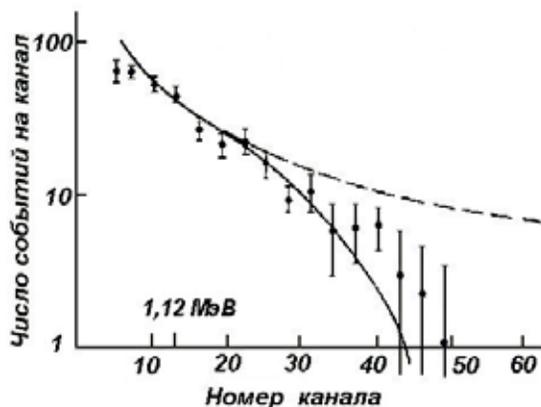
Было измерено полное сечение, нормировка делалась по событиям рассеяния на большие углы. Результаты измерений находятся в согласии с теорией Байера-Фадина-Хозе.



**Рис. 7.** Спектр двойного тормозного излучения на ВЭП-1

## 5. ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РАССЕЯНИИ ЭЛЕКТРОНОВ

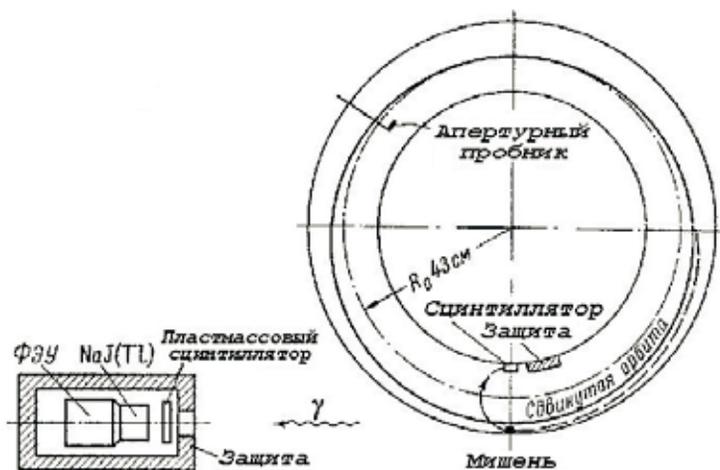
Стоит также отметить специальное измерение энергии радиационного фотона в  $e^-e^-$  рассеянии на малые или на большие углы (рис. 8). Этот фотон регистрировался счетчиками NaI(Tl) под нулевыми углами, предназначенными для измерения светимости по тормозному излучению.



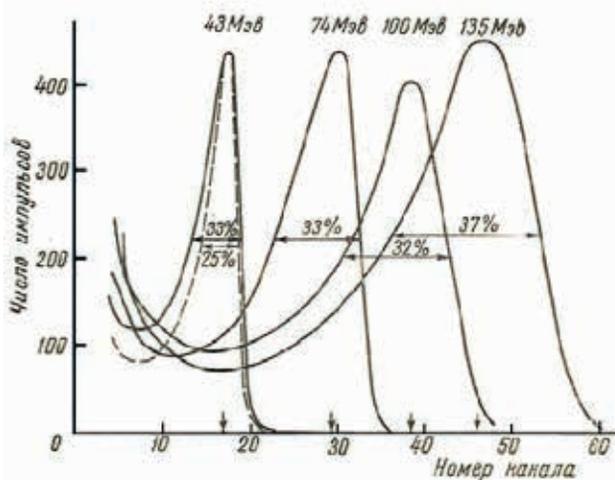
**Рис. 8.** Спектр мягких фотонов при  $e^-e^-$  рассеянии на ВЭП-1

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Отметим ряд методических работ, выполненных на ВЭП-1 и имеющих важное значение и сегодня. Так, на ВЭП-1 было осуществлено получение меченых фотонов. Для этого во внутренней части орбиты устанавливался сцинтилляционный счетчик для регистрации электрона отдачи в процессе тормозного излучения (см. рис. 9). Энергия квазимонохроматического фотона определялась радиусом орбиты электрона отдачи в магнитном поле. Мишенью для тормозного излучения была тонкая 5 мкм кварцевая нить, которая вводилась в вакуумную камеру. Орбита искажалась так, чтобы пучок гораздо большего размера проходил через нить. Расчетная ширина линии  $\gamma$ -квантов была менее 1%. Спектры фотонов (рис. 10) измерялись счетчиками NaI(Tl) под нулевыми углами. Измеренное разрешение и форма линии ограничивались размерами счетчика NaI(Tl). Время жизни пучка в такой геометрии было велико – около 2 минут. В современной терминологии это близко к режиму сверхтонкой мишени, который впервые был предложен и опробован на ВЭП-1.

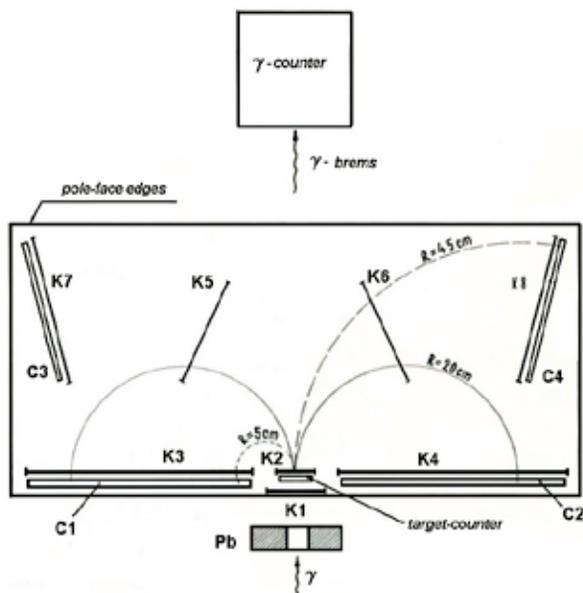


**Рис. 9.** Конфигурация установки для получения пучка монохроматических фотонов на ВЭП-1



**Рис. 10.** Спектры монохроматических фотонов на ВЭП-1. Цифры на кривых указывают энергию  $\gamma$ -квантов

Для более точного измерения энергии меченых фотонов был предложен и реализован парный магнитный спектрометр (рис. 11). Это был магнит размерами около 2 метров с большим зазором, более 5 см, и полем более 10 кГс. Фотоны конвертировались на входе спектрометра в пару электрон-позитрон. Энергия каждой частицы пары измерялась по кривизне трека в магнитном поле с помощью проволочных искровых камер, расположенных внутри магнита. Для улучшения разрешения в качестве конвертера использовался тонкий кристалл NaI(Tl). Кроме того, в прямом направлении также был установлен кристалл NaI(Tl) для измерения энергии дополнительных фотонов из конвертера. Эти меры позволили улучшить разрешение спектрометра до 1,5% при толщине мишени  $0,014 X_0$  и 2,3% при  $0,1 X_0$ . Таким образом, на ВЭП-1 в реальном эксперименте были впервые опробованы проволочные камеры. Для регистрации и измерения энергии фотонов в широком диапазоне углов был предложен и изготовлен многослойный сэндвич, состоящий из более 10 слоев сцинтиллятора и металла – меди, свинца. Была оптимизирована его структура, что позволило измерять энергии фотонов низких энергий. Техника сэндвичей получила дальнейшее развитие в детекторах на ВЭПП-2 и ВЭПП-2М.



**Рис. 11.** Схема магнитного спектрометра на ВЭП-1: К1-К7 – проволочные камеры; С1-С4 – сцинтилляционные счетчики

По результатам экспериментов на ВЭП-1 были защищены кандидатские диссертации А.П. Онучиным, Е.А. Кушниренко. Часть материалов ВЭП-1 вошла в докторскую диссертацию В.А. Сидорова.

#### **Некоторые из участников экспериментов на ВЭП-1.**

Команда физиков-экспериментаторов на ВЭП-1 включала в себя следующих основных сотрудников: В.А. Сидоров, Г.И. Будкер, А.П. Онучин, А.Н. Скринский, Е.А. Кушниренко, Ю.Н. Пестов, С.Г. Попов, Е.В. Пахтусова (аспирант), П.П. Голубничий (аспирант), Л.М. Курдадзе (студент), Д.М. Николенко (студент), В.Е. Балакин (студент) и другие. Инженерное обеспечение по электронике и вычислительной технике поддерживали Ю.В. Коршунов, Г.Г. Мелехов, К.Ф. Олзоев, Р. Фиштейн, Н. Тумайкина, В.М. Попов, А. Романов, С.Е. Бару, И.Г. Фельдман, Х. Протопопов, Р. Лебедев и другие. Конструкторами были Г.М. Колачев, А.И. Романчук, В. Зайцев. В команде лаборантов и механиков были В.Н. Баев, В. Целуйкин, А. Живалев, А.А. Белавин, В.А. Яковлев, Г.А. Савинов, В. Шохин, Г.Д. Минаков, М.Д. Минаков, А. Богатырев, А.Чуев, А.Е. Волков и другие. Просмотр фотопленок производился Г.Н. Бойко (Хлестовой), В.Г. Шленкиной, Г.Т. Шепель, Г.В. Щенниковой.

Результаты экспериментов на ВЭП-1 были опубликованы в журналах и в виде препринтов. Многие методики, впервые примененные на ВЭП-1, были использованы на ВЭПП-2 и следующих коллайдерах ИЯФ. А есть и такие, которые применяются и сегодня. К ним относятся: 1 – измерение светимости с помощью малоугловых процессов – рассеяния на малые углы, однократного тормозного излучения, двойного тормозного излучения, 2 – сверхтонкая мишень, 3 – методика проволочных камер (парный спектрометр), 4 – методика проволочных камер и сэндвичей.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Б.Г. Ерозолимский, А.П. Онучин, А.Г. Хабахпашев. Система регистрации ВЭП-1. Представлено на совещании по встречным пучкам. Харьков, 1962. 4.2, с. 79-90.

2. Б.Г. Ерозолимский, А.П. Онучин, А.Г. Хабахпашев. О методических погрешностях в эксперименте на встречных пучках. ПТЭ, 1964, № 1, с. 23.

3. В.Н. Байер, Г.А. Блинов, Г. А. Бондаренко, Г.И. Будкер, Б.Г. Ерозолимский, Л.С. Коробейников, Е.С. Миронов, А.А. Наумов, А.П. Онучин, В.С. Панасюк, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963 г., Атомиздат, 1964, с. 275.

4. А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский. Фоновые условия наблюдения рассеяния на малый угол на установке ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения, Новосибирск, 1964.

5. А.Г. Берковский, В.Г. Гусельников, А.П. Онучин. Фотоэлектронный умножитель с тороидальными эмиттерами. ПТЭ, 1965, № 5, с. 201.

6. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. По-

пов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Состояние работ на электронном накопителе ВЭП-1. Атомная энергия, 1965, 19, № 6, с. 498.

7. П.П. Голубничий, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров. Двойное тормозное излучение в рассеянии электронов при энергии  $2 \times 160$  МэВ. Атомная энергия, 1967, 22, с. 168.

8. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Рассеяние электронов на электронах при энергии  $2 \times 135$  МэВ. Атомная энергия, 1967, 22, с. 164.

9. В.Л. Ауслендер, С.И. Мишнев, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев. Контроль светимости установок со встречными пучками по рассеянию на малые углы. Атомная энергия, 1967, 22, с. 176.

10. Л.С. Коробейников, Л.М. Курдадзе, А.П. Онучин, С.Г. Попов, Г.М. Тумайкин. Получение монохроматических  $\gamma$ -квантов на электронном накопителе. Ядерная физика, 1967, 6, с. 84.

11. Г.И. Будкер, А.П. Онучин, С.Г. Попов, Г.М. Тумайкин. Эксперименты с мишенью в электронном накопителе. Ядерная физика, 1967, 6, с. 775.

12. П.П. Голубничий, Е.А. Кушниренко, А.П. Онучин. Тормозное излучение в рассеянии электронов на электронах при энергии  $2 \times 160$  МэВ. Ядерная физика, 1968, 7, с. 1240.

13. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, Р.Л. Лебедев, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Проверка квантовой электродинамики в рассеянии электронов на электронах. Ядерная физика, 1967, 6, с. 1221.

14. P.I. Golubnichy, L.M. Kurdadze, D.M. Nikolenko, A.P. Onuchin, S.G. Popov, V.A. Sidorov. High efficiency pair magnetic spectrometer. Nucl. Instr. Meth., 1969, 67, p. 22.

#### **ДИССЕРТАЦИИ**

1. Алексей Павлович Онучин. Измерение светимости установки со встречными электронными пучками. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1965 г.

2. Евгений Андреевич Кушниренко. Проверка применимости квантовой электродинамики в экспериментах по рассеянию электронов на электронах. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1967 г.

А.П. Онучин, С.И. Середняков, Е.В. Пахтусова

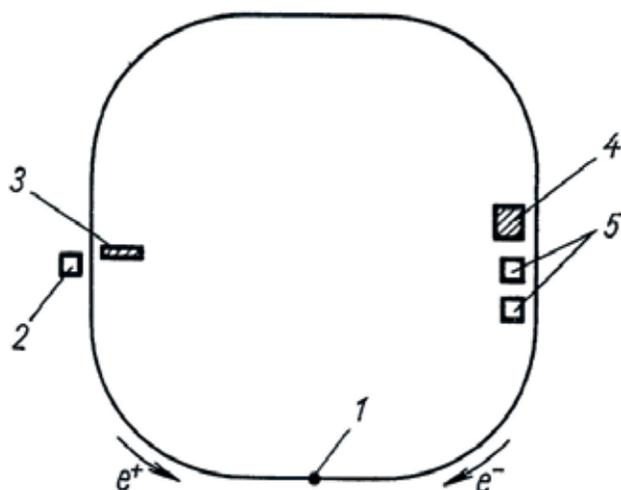
## 1.3. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭПП-2

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Первоначально целью физических экспериментов на ВЭПП-2 было изучение рождения векторных мезонов  $\rho(770)$ ,  $\omega(783)$  и  $\phi(1020)$  и проверка квантовой электродинамики. В дальнейшем, к 1970 году, в программу было дополнительно включено изучение форм-факторов  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в зависимости от энергии и процессы множественного рождения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов при полной энергии выше 1 ГэВ. Во время экспериментов основные параметры коллайдера ВЭПП-2 были следующие: средние токи электронов и позитронов составляли, соответственно, 50 и 20 мА, время жизни пучков – около 1 часа, светимость –  $10^{28}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, диапазон энергии – 290–670 МэВ в пучке, частота обращения составляла 25 МГц (период – 40 нс). Максимальная энергия ВЭПП-2 была выше энергии нашего ближайшего конкурента – французского накопителя АСО (550 МэВ в пучке) в лаборатории ОРСЭ. Название «коллайдер» появилось намного позже, и наши установки назывались накопителями встречных пучков.

Эксперименты на ВЭПП-2 начались в 1966 году. Это было на год раньше, чем на накопителе АСО. В период 1966–1970 годов на ВЭПП-2 было проведено три эксперимента. В то время детекторы не имели названий, а назывались «системами регистрации» и были как бы частью накопительного комплекса. Базовая конфигурация детектора была неизменной во всех трех экспериментах, менялись лишь элементы детектора, ближайшие к месту встречи.

Контроль светимости проводился по процессу  $e^+e^-$  рассеяния на малые углы. Для этого на четверти оборота от места встречи, вблизи орбиты, были установлены счетчики, регистрирующие в совпадениях этот процесс (рис. 1). Для уменьшения фона счетчики были прикрыты экранами. Три эксперимента на ВЭПП-2 проводились под руководством В.А. Сидорова. Первый



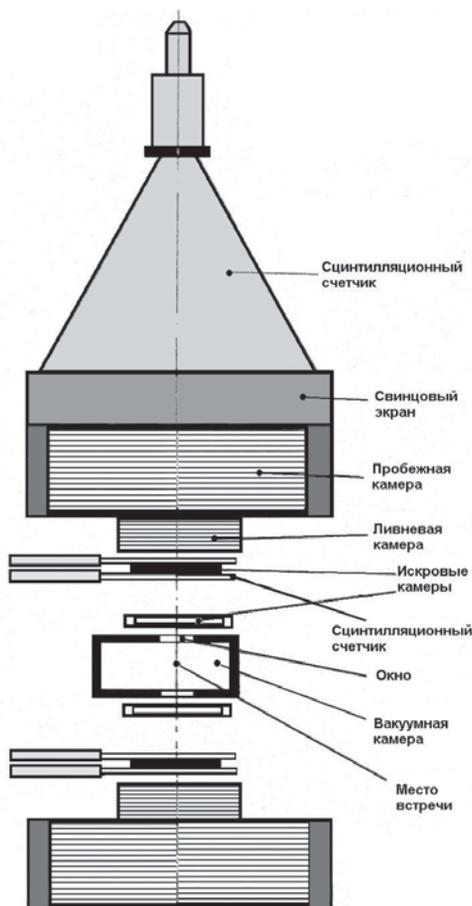
**Рис. 1.** Расположение счетчиков для регистрации  $e^+e^-$  рассеяния под малыми углами на ВЭПП-2:  
1 – область встречи;  
2, 5 – счетчики;  
3, 4 – элементы защиты

эксперимент проводился в области  $\rho$ -мезона (1966-1967 гг.), второй в области  $\phi$ -мезона (1968-1969 гг.) и третий – многоадронный эксперимент – проводился в области выше  $\phi$ -мезона (1969-1970 гг.).

## 2. $\rho$ -МЕЗОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

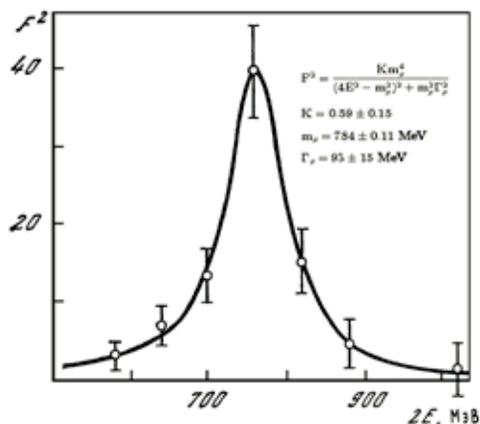
Первые эксперименты на ВЭПП-2 были нацелены на регистрацию коллинеарных событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Поэтому детектор (рис. 2) состоял из двух «коллинеарных башен», расположенных в вертикальном направлении. Каждая башня содержала пару сцинтилляционных счетчиков, оптические искровые камеры – трековые, «ливневые» и «пробежные», сверху башен располагался сцинтилляционный счетчик антисовпадений. Телесный угол детектора был невелик,  $\sim 10\%$  от  $4\pi$ . Запуск триггера осуществлялся двумя парами сцинтилляционных счетчиков в обеих «башнях». Точность трековой системы составляла 1 мм. В «ливневых» камерах толщиной около  $4,5 X_0$  наблюдалась первая фаза размножения частиц в ливнях от электронов и фотонов. С их помощью выделялись события процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . В «пробежной» камере по длине пробега разделялись  $\pi^-$  и  $\mu^-$ -мезоны. Космический фон подавлялся счетчиком антисовпадений.

Положение искр в камерах с помощью довольно сложной системы зеркал сводилось на один кадр фотокамеры. Пленки просматривались на аппарате ПУОС, где проводилась их оцифровка и запись результата на перфоленту. Перфолента считывалась на ЭВМ Минск-22 для дальнейшей обработки. Скорость счета фона, в основном космического, составляла около 0,03 Гц. Скорость триггера была 0,1 Гц. Время блокировки – 0,3 сек. Всего было записано 45 тыс. событий процессов с рождением коллинеарных пар частиц в районе массы  $\rho$ -мезона. Понятием интегральной светимости в то время не пользовались, но по числу  $e^+e^-$  событий можно оценить, что интеграл све-

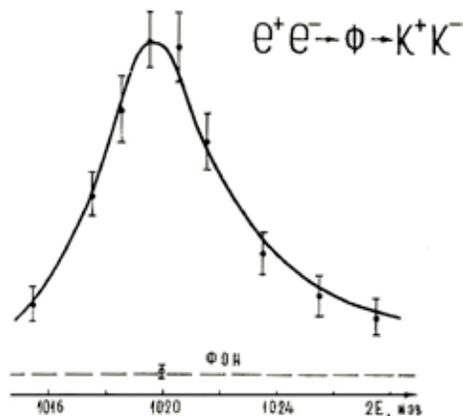


**Рис. 2.** Схема детектора на ВЭПП-2 в эксперименте 1967 г.

тимости был несколько обратных нанобарн. В результате эксперимента было идентифицировано более 100  $\pi^+\pi^-$ -событий, распределение по энергии которых имело явно резонансный характер (рис. 3). При дальнейшей аппроксимации данных формулой Брейта-Вигнера были получены параметры  $\rho$ -мезона, неплохо согласующиеся с современными значениями.



**Рис. 3.** Первый  $\rho$ -мезон на встречных пучках, измеренный на ВЭПП-2 в 1967 г.



**Рис. 4.** Первый  $\phi$ -резонанс на ВЭПП-2 в эксперименте 1969 г.

Вспоминает Е.В. Пахтусова:

– Первый эксперимент на ВЭПП-2 по исследованию  $\rho$ -мезона проводил Пестов Юра, развивавший и использующий в эксперименте в нашем Институте методику искровых камер. Юра удивлял широтой своих познаний: от тонкостей экспериментальной методики до теоретических основ физики частиц. Пестовым, в основном, был создан новый модифицированный детектор для экспериментов на ВЭПП-2, но эксперименты на нем проводились уже под руководством Алексея Георгиевича Хабахпашева.

Алексей Георгиевич был одним из старейшин института, ведь ему недавно уже исполнилось 40(!) лет. Ветеран ВОВ, опытный и мудрый, специалист в области экспериментальной физики, Алексей Георгиевич обладал способностью осваивать новые методы в технике эксперимента и обработки экспериментальных данных. В результате экспериментов на ВЭПП-2 под его руководством были получены данные, вошедшие в таблицы свойств элементарных частиц.

Эти люди стояли у истоков создания того, что называется школой эксперимента, и в основном формировали те правила и подходы, которые в настоящее время обеспечивают эффективность проводимых на установках института экспериментов по физике элементарных частиц.

Этот эксперимент вошел в историю развития метода встречных пучков как первый эксперимент на встречных электрон-позитронных пучках по рождению адронов. Работа получила большой резонанс в мире, она включалась в обзоры, цитировалась, докладывалась на конференциях. Измеренные параметры  $\rho$ -мезона вошли в таблицы Розенфельда, так в то время назывались таблицы частиц PDG.

### 3. $\phi$ -МЕЗОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В 1968 году во Франции в Орсэ заработал коллайдер АСО в области  $\phi$ -мезонного резонанса. В дальнейшем наши эксперименты проходили параллельно с экспериментами в Орсэ.

Ко второму эксперименту на ВЭПП-2 была проведена значительная модернизация. Резонатор был перестроен на третью гармонику частоты обращения 75 МГц, что дало сокращение длины области встречи. Был улучшен вакуум, и время жизни пучков увеличилось до 4-5 часов. Были сделаны отверстия в магнитах для вывода пучка двойного тормозного излучения и установлены счетчики с кристаллами NaI(Tl). После реконструкции промежутка встречи элементы детектора были придвинуты к пучку и телесный угол координатной системы увеличился в 1,5 раза.

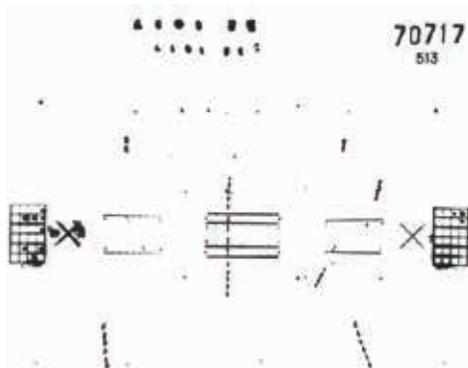
Целью эксперимента было измерение параметров  $\phi$ -мезонного резонанса. Для регистрации заряженных  $K$ -мезонов были установлены предельно тонкие вакуумная камера и первая по ходу частиц искровая камера. Заряженные  $K$ -мезоны пересекали эту камеру и останавливались в сцинтилляционном счетчике, давая большое энерговыделение. Остальные частицы – электроны, пионы, мюоны – регистрировались так же, как и в  $\rho$ -мезонном эксперименте.

Эксперимент продолжался 40 дней, было сделано около 100 тыс. кадров, из которых в процессе обработки было отобрано 1600 событий  $e^+e^-$  взаимодействия. Полный интеграл светимости составил 8,5 обратных нанобарн. На рис. 4 показано наблюдаемое сечение рождения  $\phi$ -мезонов, распадающихся по каналу  $\phi \rightarrow K^+K^-$ .

Было измерено более 10 основных параметров  $\phi$ -мезона. Сюда входят вероятности распада по основным каналам  $\phi \rightarrow K^+K^-$ ,  $K_S^0 K_L^0$ ,  $\pi^+ \pi^- \pi^0$ , сечение в максимуме, масса и полная ширина, константы связи. Полученные результаты были опубликованы в журналах, докладывались на конференциях и вошли в таблицы частиц.

Кроме параметров  $\phi$ -мезона, в данном эксперименте было сделано еще несколько пионерских измерений. Впервые наблюдался процесс 2-квантовой аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ . Для этого между трековыми камерами были установлены конвертеры толщиной 10 мм свинца. Всего было обнаружено примерно 50 событий 2-квантовой аннигиляции, что соответствует расчету по КЭД. В области  $\phi$ -мезона было измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$  и получен форм-фактор  $\pi$ -мезона (снимок события показан на рис. 5). Было измерено сечение важного КЭД процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

**Рис. 5.** Снимок события процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  на ВЭПП-2 в области  $\phi$ -резонанса в 1969 г. Вертикальные линии в центре – треки в координатных камерах

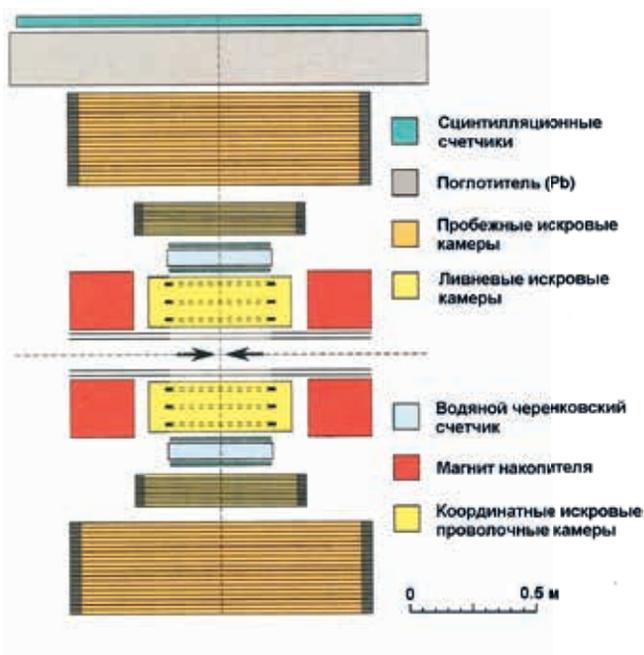


Особо нужно отметить первое наблюдение и измерение сечения процесса двухфотонного рождения  $e^+e^-$  пар. В эксперименте наблюдались «вилки» – пары неколлинеарных короткопробежных частиц, которые в первое время считали фоном, но в дальнейшем эти события были правильно идентифицированы как процесс  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ . Из этого первого измерения выросло новое направление – двухфотонная физика на встречных пучках.

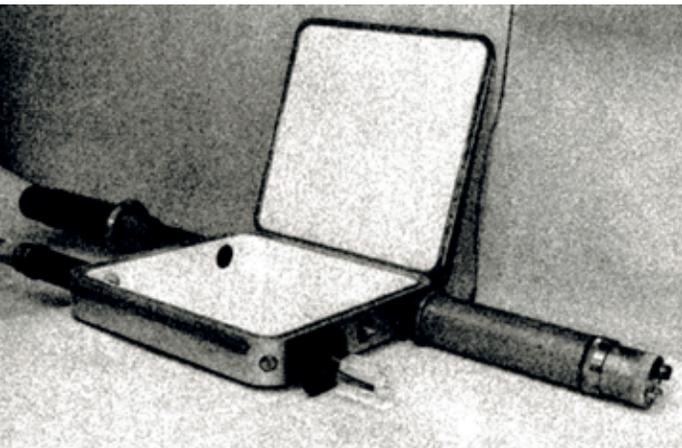
Уже в то время обращалось внимание на возможное влияние поляризации пучков на результаты, что особенно важно было для детектора ВЭПП-2 с малым телесным углом. Позднее, в конце 1970 года, были проведены первые поиски поляризации пучков с использованием счетчиков системы малых углов.

#### 4. МНОГОАДРОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В 1970 году впервые был проведен эксперимент при энергии выше  $\phi$ -мезона. Измерения проводились при трех значениях полной энергии  $2E=1,18, 1,26$  и  $1,34$  ГэВ. Состояние коллайдера во время проведения эксперимента характеризовалось следующими параметрами. Начальный ток позитронов был равен  $40$  мА, электронов –  $70$  мА. Среднее время жизни пучков составляло  $5$  часов. Светимость, усредненная по времени измерений, была равна  $10^{28} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ . Набранный интеграл светимости составил несколько обратных нанобарн.



**Рис. 6.** Модифицированный детектор на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.



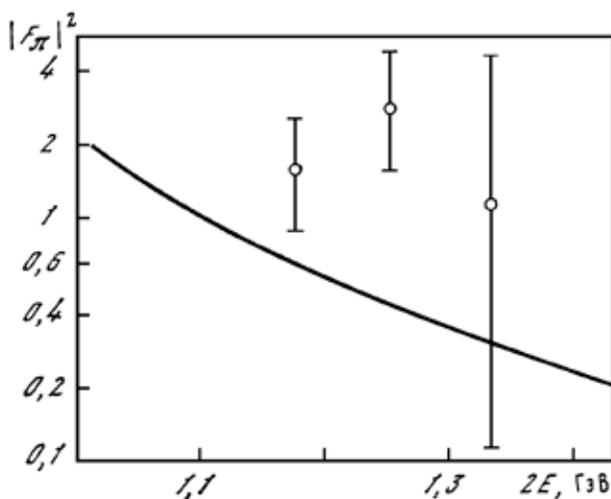
**Рис. 7.** Водяной черенковский счетчик в детекторе для ВЭПП-2 в 1970 г.

Для данного эксперимента в детекторе координатные оптические искровые камеры были заменены на проволочные искровые камеры (рис. 6) и поставлены водяные черенковские счетчики (рис. 7). Телесный угол системы

составлял  $2 \times 0.8$  стерадиана. Геометрические характеристики событий определялись с помощью проволочных камер. С каждой стороны от места встречи находилось по три двухкоординатных камеры с памятью на ферритовых кольцах. Проволочные камеры работали в режиме непосредственной связи с ЭВМ Минск-22, одновременно вся информация записывалась на магнитную ленту. При обработке эксперимента просматривались фотографии с оптических искровых камер событий, отобранные с помощью проволочных камер. Использование проволочных камер позволило существенно сократить время от набора статистики до получения результата.

В черенковских счетчиках в качестве радиатора использовалась вода. Эффективность счетчика, измеренная по событиям упругого позитрон-электронного рассеяния, составила 99%. Расчетное значение эффективности регистрации К-мезонов с полной энергией 670 МэВ было равно 7%, причем при энергии 630 и 590 МэВ эффективность была меньше 1%. Применение черенковских счетчиков обеспечило надежное

разделение процессов рождения пар пионов и каонов, а также дало возможность отделить процесс двойного электророждения позитрон-электронной пары от многочастичных процессов.



**Рис. 8.** Форм-фактор  $\pi$ -мезона на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.

**Рис. 9** Сечение рождения 4 пионов на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.

Заметим, что в этом детекторе впервые на встречных пучках использовались и проволочные камеры, и черенковские счетчики.

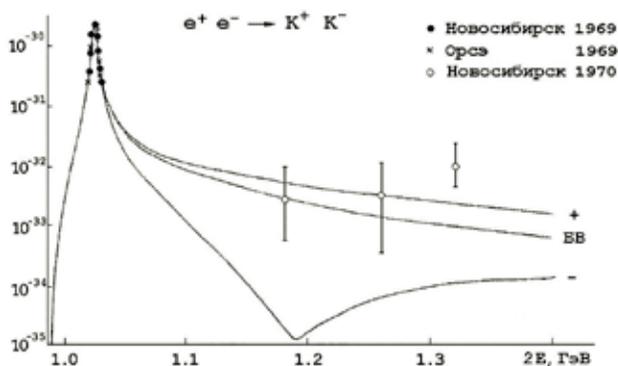
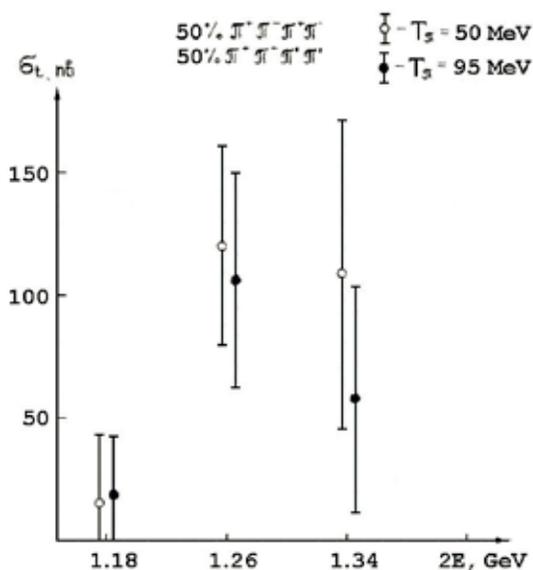
Самым важным результатом этого эксперимента было открытие многоадронных событий (рис. 9). В основном это были двухчастичные неколлинеарные события. Информация с черенковских счетчиков и с оптических камер позво-

ляла заключить, что наблюдаемые частицы являются  $\pi$ -мезонами. Число событий существенно превышало теоретические оценки.

Набор статистики закончился в мае 1970 г. Был подготовлен препринт, и в августе 1970 года эти результаты были представлены на Рочестерской конференции в Киеве. Туда поехали В.А. Сидоров и А.П. Онучин, доклад делал Онучин. Важным событием на этой конференции было то, что итальянские физики на установке ADONE тоже обнаружили и представили аналогичные многоадронные события, но при более высокой энергии. Вокруг этих результатов была бурная дискуссия. Природа их казалась загадочной.

Обработка эксперимента продолжалась еще два года. Изучались различные возможные процессы, которые могли бы дать объяснение полученным результатам. В частности, Алтухов и Хриплович произвели расчеты сечения рождения четырех процессов:  $\rho\pi$ ,  $\omega\pi$ ,  $A_1\pi$ ,  $\rho\rho$ . В заключительной публикации было сказано, что не существует теории, которая бы объясняла природу многоадронных событий. Лишь позже, когда возторжествовала кварковая модель, стало ясно, что это было одно из первых наблюдений образования адронов из легких кварков.

**Рис. 10.** Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.



Кроме открытия многоадронных событий, в этом эксперименте был получен еще один неожиданный результат – сечение рождения пар пионов и каонов превышало расчет по модели векторной доминантности (рис. 8, 10). Позже в этой области энергии были открыты тяжелые векторные мезоны ( $\rho'$ ,  $\omega'$  и другие).

В эксперименте 1970 года были изучены еще два процесса – рождение пар мюонов и двухфотонное рождение электрон-позитронных пар. Для проверки справедливости квантовой электродинамики была проведена совместная обработка экспериментальных данных, полученных в 1969 г. и 1970 г. Ранее, в 1969 году, была набрана статистика в процессе рождения мюонных пар, а также в процессе двухквантовой аннигиляции. В 1970 году набрана статистика по рождению мюонных пар. Был получен верхний предел применимости квантовой электродинамики  $\Lambda < 6 \cdot 10^{-15}$  см.

При изучении двухфотонного рождения электрон-позитронных пар наличие черенковских счетчиков позволило надежно произвести идентификацию событий, в частности, выделять К-мезоны. Результаты эксперимента согласовывались с расчетами сечений, полученными Байером и Фадиным.

После киевской конференции 1970 года в ИЯФе было принято два важных решения. Первое – построить коллайдер ВЭПП-2М на ту же энергию, что у ВЭПП-2, но увеличить светимость на два порядка и иметь два места встречи. Началась разработка коллайдера и детекторов. Л.М. Курдадзе возглавил разработку детектора ОЛЯ на основе проволочных искровых камер, а Л.М. Барнов – разработку детектора КМД на основе оптических искровых камер.

И второе решение – форсировать работы в области более высоких энергий, чем достигнутые в Италии. Возросла активность работ на ВЭПП-3. Для этого коллайдера группа Балакина начала разрабатывать детектор на основе оптических искровых камер. А.П. Онучин с учениками начал разрабатывать большой магнитный детектор МД-1 на основе многопроволочных пропорциональных камер. В это же время СЛАК принял решение форсировать сооружение коллайдера SPEAR.

#### **Наиболее значительные физические результаты экспериментов на ВЭПП-2.**

1 – первые наблюдения и измерение параметров векторных мезонов на встречных пучках, 2 – проверка квантовой электродинамики, 3 – первое наблюдение процесса двухфотонного рождения  $e^+e^-$ -пар, 4 – первое наблюдение процесса многоадронного рождения, 5 – первое наблюдение превышения форм-факторов  $\pi^-$  и К-мезонов над предсказаниями модели векторной доминантности.

#### **Наиболее важные методические достижения экспериментов на ВЭПП-2.**

1 – первое применение проволочных камер в детекторе на встречных пучках в ИЯФ, 2 – первый эксперимент online – прямая запись данных с детектора на магнитофоны ЭВМ, 3 – впервые на

встречных пучках использовался черенковский счетчик для идентификации частиц.

По материалам экспериментов на ВЭПП-2 были защищены кандидатские диссертации Ю.Н. Пестовым, Е.В. Пахтусовой, Л.М. Курдадзе, В.Е. Балакиным и докторские диссертации В.А. Сидоровым, А.Г. Хабахпашевым и А.П. Онучиным.

**Рис. 11.** Юрий Николаевич Пестов защищает кандидатскую диссертацию. Андрей Михайлович – председатель диссертационного совета. 1967 г.



#### **Некоторые из участников экспериментов на ВЭПП-2**

Физики: В.А. Сидоров, Г.И. Будкер, А.Н. Скринский, Ю.Н. Пестов, А.П. Онучин, В.Е. Балакин, А.Г. Хабахпашев, Л.М. Курдадзе, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков. В дальнейшем к анализу данных подключились А.Д. Букин и С.И. Эйдельман.

Стоит упомянуть теоретиков, которые в те годы активно осуществляли теоретическую поддержку экспериментов, обеспечивали расчеты и обсуждали полученные результаты с экспериментаторами: В.Н. Байер, И.Б. Хриплович, В.С. Фадин, В.А. Хозе. Разработчики электроники: Ю.В. Коршунов, Г.Г. Мелехов, С.Е. Бару, В.И. Фоминых, В.М. Аульченко, Н. Тумайкина, Г.А. Савинов, И.Г. Фельдман, Г.Д. Минаков, М.Д. Минаков.

Участники от ВЦ: В.М. Попов, А.В. Романов.

Участники от КБ: Г.М. Колачев, А.И. Романчук.

Лаборанты и механики: В.Н. Баев, В. Целуйкин, А.А. Живалев, А.А. Белавин, В.А. Яковлев, Г.А. Савинов, В. Шохин, А. Богатырев, А. Чуев, А.Е. Волков и другие.

Просмотр фотопленок производился группой сотрудников лаборатории 3, основное ядро которых составляли В.Г. Шленкина, Г.Т. Шепель, Г.В. Щенникова.

О многих годах совместной работы с физиками-экспериментаторами вспоминает Г.М. Тумаикин:

*– Пройдя длинный путь работы почти на всех коллайдерах ИЯФ, я с благодарностью вспоминаю наше взаимодействие с физиками-экспериментаторами. В начале совместной работы на ВЭП-1 мы столкнулись с другой школой, отличной от школы ускорительщиков. Принципиальное отличие этих школ в том, что задачей ускорительщиков было получение необходимых параметров установки, а детекторщиков – получение надежных физических результатов. На первых этапах совместной работы у нас часто было непонимание, относящееся к их стилю работы. Например, нам жалко было тратить целую смену, чтобы получить десятипроцентное уменьшение фона. Но постепенно эти проблемы утрясались, и мы стали много заимствовать из того, что приходило к нам от школы Сидорова-Онучина. С какого-то момента мы осознали, что получение физических результатов является нашей общей задачей. Несмотря на невысокую светимость наших первых установок, сложные условия работы, малую надежность оборудования, физикам-экспериментаторам удалось выжать все возможное и невозможное из первых детекторов и коллайдеров и получить физические результаты мирового уровня.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.L. Auslender, G.I. Budker, Yu.N. Pestov, V.A. Sidorov, N.A. Skrinsky, A.G. Khabakhpashev. Investigation of  $\rho$ -meson resonance with electron-positron colliding beams. *Physics Letters*, 1967, 25B, p. 433.
2. В.Л. Ауслендер, Г.И. Будкер, Е.В. Пахтусова, Ю.Н. Пестов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахиашев. Исследование  $\rho$ -мезонного резонанса на встречных электрон-позитронных пучках. *Ядерная физика*, 1969, 9, с. 114.
3. V.E. Balakin, G.I. Budker, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Experiment on  $2\gamma$ -quantum annihilation on the VEPP-2. *Physics Letters*, 1971, 34B, p. 99.
4. V.E. Balakin, G.I. Budker, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Investigation of the  $\varphi$ -meson resonance by electron-positron colliding beams. *Physics Letters*, 1971, 34B, p. 328.
5. V.E. Balakin, A.D. Bukin, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Evidence for electron-positron pair electroproduction. *Physics Letters*, 1971, 34B, p. 663.
6. V.E. Balakin, G.I. Budker, L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova, S.I. Serednyakov, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, A.G. Khabakhpashev. *Physics Letters*, 1971, 37B, p. 435.
7. V.E. Balakin, G.I. Budker, L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova, S.I. Serednyakov, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky. Measurement of the electron-positron annihilation cross-section into  $\pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-$ -pairs at the total energy 1.18-1.34 GeV. *Physics Letters*, 1972, 41B, p. 205.

8. L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, S.I. Serednyakov, V.A. Sidorov, S.I. Eidelman. Observation of multihadronic events in  $e^+e^-$  collisions at energy of 1.18-1.34 GeV. *Physics Letters*, 1972, 42B, p. 515.

9. В.Е. Балакин, А.Д. Букин, Л.М. Курдадзе, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков, А.Г. Хабахиашев. Наблюдение двойного электро-рождения  $e^+e^-$  пары. *Ядерная физика*, 1972, 16, с. 729.

10. А.П. Онучин, С.И. Середняков. Пороговый черенковский счетчик. *ПТЭ*, 1972, 6, с. 57.

### КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Юрий Николаевич Пестов. Измерение сечения образования пар  $\pi$ -мезонов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1967 г.

2. Елена Валентиновна Пахтусова. Анализ данных в экспериментах по изучению  $\rho^0$ - и  $\phi$ -резонансов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1971 г.

3. Владимир Егорович Балакин. Исследование двухквантовой аннигиляции электрон-позитронной пары на встречных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1971 г.

4. Лери Михайлович Курдадзе. Исследование электрон-позитронной аннигиляции в пары  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$  при полной энергии 1,18-1,34 ГэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1973 г.

### ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вениамин Александрович Сидоров. Эксперименты на встречных электрон-электронных и электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1967 г.

2. Алексей Георгиевич Хабахпашев. Исследование  $\phi$ -мезонного резонанса на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1970 г.

3. Алексей Павлович Онучин. Рождение заряженных частиц на встречных позитрон-электронных пучках с энергией 1,18-1,34 ГэВ. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1972 г.

## Глава 2. Детекторы и эксперименты на ВЭПП-2М

Б.А. Шварц, С.И. Эйдельман

### 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ ОЛЯ

Решение о строительстве накопителя ВЭПП-2М было принято в ноябре 1970 г., и тогда же началось обсуждение проекта нового детектора. Новый накопитель предоставлял уникальные возможности благодаря высокой светимости (на два порядка выше, чем на ВЭПП-2) и удобному экспериментальному промежутку, который позволял создать детектор с большим телесным углом. Руководителем работ по созданию детектора и проведению экспериментов с ним стал Лери Михайлович Курдадзе. Детектор ОЛЯ был первым детектором в ИЯФ, вся экспериментальная информация с которого регистрировалась и оцифровывалась с помощью электроники детектора и считывалась небольшим компьютером в режиме online. Сейчас такая схема кажется единственно возможной, но в начале 70-х годов это вовсе не было столь очевидно. Здесь нужно отдать должное В.А. Сидорову, который одним из первых в ИЯФ осознал важность применения компьютеров в системах сбора данных экспериментов и обработке экспериментальной информации. Он приложил большие усилия для создания вычислитель-

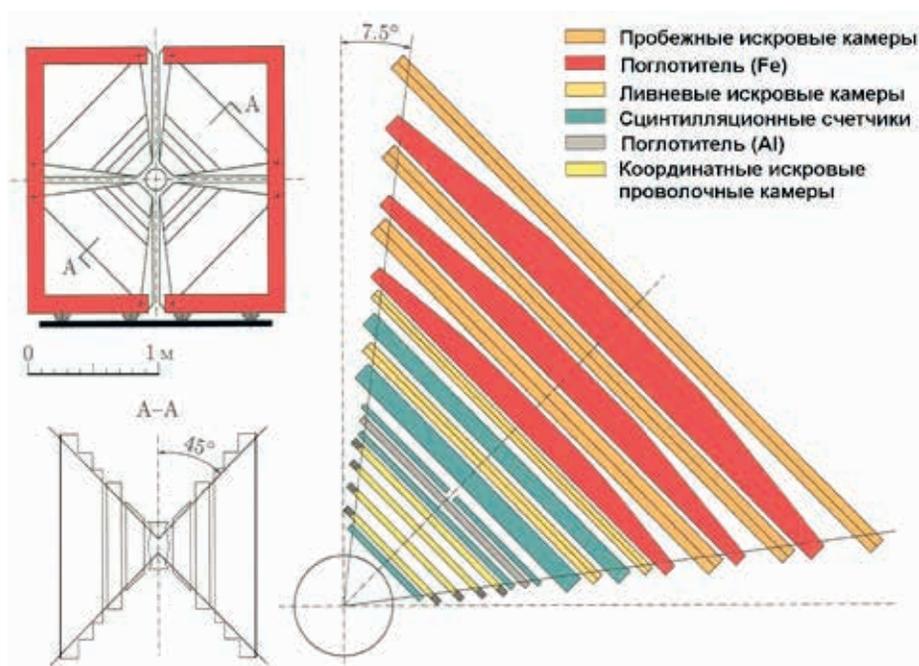


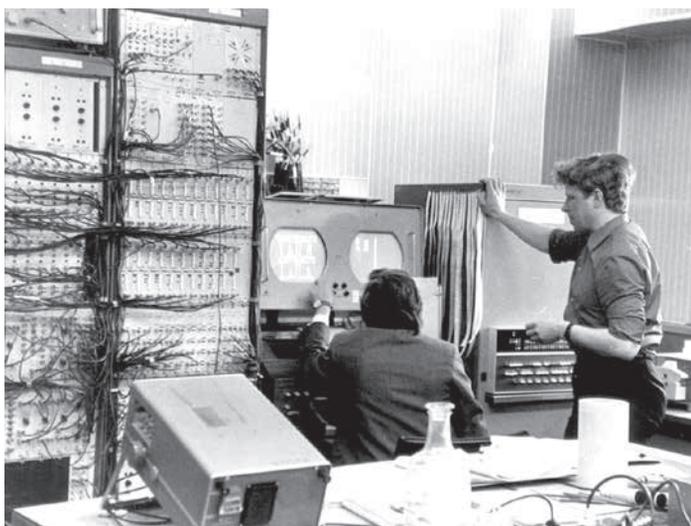
Рис. 1. Схема детектора ОЛЯ [3]

**Рис. 2.** Пультавая детектора ОЛЯ,  
Л.М. Курдадзе, А.Е. Волков

ного центра лаб. № 3 и развития сети малых компьютеров, ориентированных на сбор экспериментальной информации.

Программное обеспечение для системы сбора данных детектора ОЛЯ было создано Б.Л. Сысолетиным и Б.Н. Шуваловым [20]. Название детектора также было предложено В.А. Сидоровым от «online», в произношении В.А. – Он-ЛЯйн. Детектор необходимо было создать в короткие сроки, 2-3 года, поэтому он не должен был быть слишком сложным, однако все необходимые компоненты для решения поставленных физических задач должны были присутствовать. Схема детектора представлена на рисунке 1. Координаты заряженных частиц измерялись с помощью системы проволочных искровых камер. Для измерения координат фотонов и разделения электронов и адронов использовалась система ливневых счетчиков, состоявшая из четырех сцинтилляционных пластин, прослоенных свинцом толщиной примерно  $1X_0$ , и двух двойных слоев полосковых искровых камер с электродами на основе пластин из фольгированного гетинакса. За ливневой системой располагалась пробегная система, состоявшая из трех двойных слоев искровых камер, разделенных толстыми пластинами профилированного железа.

Сигнал запуска детектора формировался системой сцинтилляционных счетчиков, расположенных по три в каждом квадранте перед ливневой системой. Один из трех счетчиков служил для измерения времени пролета частиц и временной привязки события к моменту столкновения пучков. Точность измерения времени составляла около 300 пс. Съём информации в режиме online обеспечивала мини-ЭВМ М-6000, связанная с большим (по тем временам) компьютером Минск-32, на магнитных лентах которого осуществлялась запись информации. При всей своей простоте и минимуме элементов детектор обеспечивал надежное разделение частиц различных типов и выделение событий изучаемых процессов. В этом немалая заслуга А.Г. Хабахпашева, активно участвовавшего в работе над проектом детектора и в его создании. Вся электроника сбора данных детектора была разработана и изготовлена в лаборатории № 3 под руководством Ю.В. Коршунова и активном участии В.М. Аульченко, С.Е. Бару, В.И. Фоминых, Г.Г. Мелехова, В.Н. Баева, В.Д. Кутовенко и других.



В ноябре 1974 г. детектор ОЛЯ был установлен на накопителе. Непосредственно в наборе данных и повседневном обслуживании детектора участвовали всего 4–5 (в разные годы) физиков – Л.М. Курдадзе, А.Г. Чилингаров, Б.А. Шварц, В.Н. Гетманов, М.Ю. Лельчук и лаборанты А.Е. Волков, А.Н. Криницын, Ю.В. Тененев, С.С. Солдатов, А.В. Чегодаев. Для обработки экспериментальной информации и моделирования физических процессов был создан большой пакет программ. В то время еще не существовало универсальных программ для обработки и моделирования данных, поэтому эта огромная работа была выполнена практически с нуля А.Д. Букиным, С.И. Эйдельманом и Е.В. Пахтусовой.

Оперативное измерение светимости производилось по числу событий двойного тормозного излучения, регистрируемых двумя счетчиками на основе кристаллов NaI(Tl). Эта система была создана и поддерживалась С.И. Середняковым.

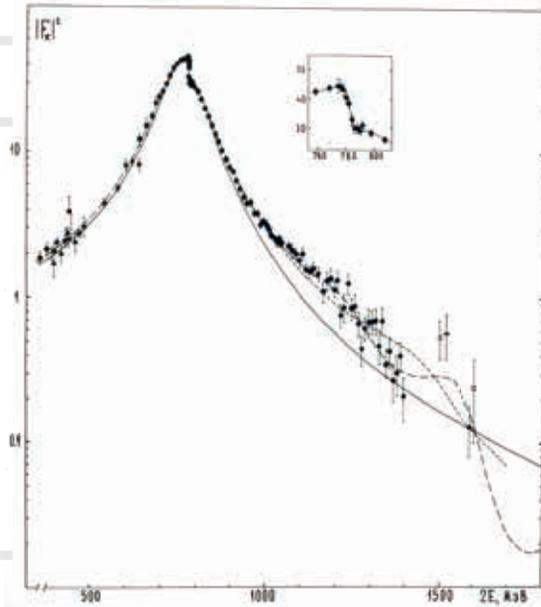


Рис. 3. Наиболее точные значения электромагнитного формфактора  $|F_{\pi^+}|^2$  в зависимости от энергии, полученные в эксперименте с детектором ОЛЯ (круглые темные точки) [6]. Сплошная кривая проведена в соответствии с формулой Гунариса-Сакураи при учете  $\rho$ - $\omega$  интерференции. Узкий пик – аппроксимация с учетом одного  $\rho'$ -мезона; широкий пик – аппроксимация с учетом  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\rho'$  (1250),  $\rho''$  (1600) - мезонов при оптимальных значениях параметров. Для сравнения приведены результаты других экспериментов

Все физики, участвующие в этом эксперименте, вели анализ накопленной информации и получали физические результаты. Первые результаты – прецизионное измерение массы  $\phi$ -мезона и поиск узких резонансов – были доложены уже летом 1975 г. на международной конференции в Варшаве. Эксперименты с детектором ОЛЯ на накопителе ВЭПП-2М продолжались до 1979 г., интеграл светимости составил около  $3 \text{ pb}^{-1}$ . В течение этого времени было проведено изучение всех основных каналов  $e^+e^-$  аннигиляции:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, K^+K^-, K_S^0K_L^0, \eta\gamma$ . С лучшей в мире точностью были измерены параметры  $\rho$ -,  $\omega$ -, и  $\phi$ -резонансов и вероятности различных мод их распада, а также открыт новый канал распада  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Важным физическим результатом явилось измерение электромагнитного формфактора пиона во всем

диапазоне энергии ВЭПП-2М. Совместная с группой КМД статья [20], включающая эти результаты, является наиболее широко цитируемой экспериментальной работой ИЯФ (более 400 ссылок). По окончании экспериментов на накопителе ВЭПП-2М в конце 1979 г. детектор ОЛЯ был перевезен на комплекс ВЭПП-4, где весной 1980 г. было проведено первое прецизионное измерение масс  $J/\psi$  и  $\psi'$ -мезонов.

Большинство участвовавших в экспериментах физиков защитили кандидатские диссертации, а Л.М. Курдадзе – докторскую.

За измерения масс элементарных частиц на накопителях ИЯФ Л. М. Курдадзе в составе группы сотрудников ИЯФ в 1989 г. был удостоен Государственной премии СССР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Аульченко и др. Схема сбора данных детектора ОЛЯ для экспериментов на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М. В кн.: Материалы семинара по обработке физической информации. Ереван, 1976, с. 88-92.

2. В.А.Гусев, Н.Ф. Денисов, Э.Л.Неханевич, В.М. Попов, А.В. Романов, В.А. Сидоров, Б.Л. Сысолетин, Б.Н. Шувалов. Система ЭВМ для автоматизации экспериментов. В кн: Материалы семинара по обработке физической информации. Ереванский физический институт. Ереван 1976, с. 33-39.

3. Л.М. Курдадзе и др. Изучение  $\omega$ -мезона на накопителе ВЭПП-2М. Письма в ЖЭТФ. 1982, т. 36, с. 221-223.

4. А.Д. Букин и др., Измерение формфактора пиона в реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергий  $2E$  от 0,78–1,34 ГэВ. Phys. Lett. 1978, v. 738, p. 226 – 229.

5. Л.М. Курдадзе и др. Измерение формфактора пиона в области от 640 до 1400 МэВ. Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 37, с. 613 – 617.

6. Л.М. Курдадзе и др. Изучение реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергии от 640 до 1400 МэВ. Ядерная физика, 1984. т. 40, с. 451–464.

7. А.Д. Букин и др. Метод абсолютной калибровки энергии пучков в накопителе. Измерение массы  $\phi$ -мезона. В кн.: Труды Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варшава, 1975, Дубна, 1975, с. 138–147.

8. А.Д. Букин и др.  $\phi$ -мезон: прецизионное измерение массы, наблюдение  $\omega$ - $\phi$  интерференции. Ядерная физика, 1978, т. 27, с. 976–984.

9. Л.М. Курдадзе и др. Изучение  $\omega$ -,  $\phi$ -резонансов и  $\omega$ -,  $\phi$ -интерференции. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 84-7, Новосибирск, 1984.

10. А.Д. Букин и др. Поиск распада  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Ядерная физика, 1978, т.27, с. 985–988.

11. С.Б. Вассерман и др. Измерение относительной вероятности распада  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Physics Letters, 1981, v. 99B, p. 62–65.

12. Л.М. Курдадзе и др. Изучение распадов  $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Ядерная физика, 1982, т.35, с. 352-367.

13. Л.М. Курдадзе и др. Измерение относительной вероятности рас-

пада  $\phi \rightarrow \eta\gamma$ . Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 306–309.

14. П.М. Иванов и др. Измерение формфактора заряженного каона в области энергии от 1.06 до 1.40 ГэВ. *Physics Letters*, 1981, v. 107B, p. 297–300.

15. П.М. Иванов и др. Измерение формфактора нейтрального каона в области энергии от 1,06 до 1,40 ГэВ. Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 36, с. 91–94.

16. А.И. Вайнштейн и др.  $e^+e^-$  аннигиляция в адроны при  $\sqrt{s} < 2$  ГэВ. Проверка предсказания КХД. *Physics Letters*, 1979, v. 82B., p. 278–280.

17. В.М. Аульченко и др., Поиск узких резонансов в  $e^+e^-$  аннигиляции в области масс 1,0–1,4 ГэВ. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 79-65, Новосибирск, 1979.

18. А.Е. Бондарь и др. Поиск легких частиц с зарядом  $2/3$  в  $e^+e^-$  аннигиляции. Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 440–442.

19. A.A. Zholents, et al., *Phys. Lett.* v. B96 (1990) 214.

20. L.M. Barkov et al., *Electromagnetic Pion Form-Factor in the Timelike Region*, *Nucl. Phys.* B256 (1985) 365–384.

#### ДИССЕРТАЦИИ

1. Александр Дмитриевич Букин.  $\phi$ -мезон: прецизионное измерение массы, наблюдение  $\omega$ - $\phi$ -интерференции. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1978 г.

2. Семен Исаакович Эйдельман. Исследование реакции  $e^+e^- \rightarrow 4\pi$  при энергии 1,24 ГэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1979 г.

3. Александр Георгиевич Чилингаров. Распад  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1981 г.

4. Михаил Юрьевич Лельчук. Измерение электромагнитных формфакторов заряженного и нейтрального К-мезонов в области энергии 1,0–1,4 ГэВ, Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1982 г.

5. Борис Альбертович Шварц. Изучение реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергии до 1400 МэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1983 г.

6. Лери Михайлович Курдадзе. Исследование  $\rho$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -резонансов и формфакторов пиона и каонов на встречных  $e^+e^-$  пучках. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 1984.



**Рис. 4.** Обработка экспериментальной информации. Б.А. Шварц и Л.М. Букина у пульта ЭВМ Минск-32

**Рис. 5.** Команда детектора ОЛЯ и ее постоянный болельщик А.Г. Хабахпашев. На фото (слева направо): в первом ряду – А.Г. Чилингаров, С.И. Эйдельман, Ю.В. Тенев, А.В. Чегодаев, во втором ряду – А.Г. Хабахпашев, Л.М. Курдадзе, Е.В. Пахтусова, М.Ю. Лельчук, Б.А. Шварц



**Рис. 6.** А.Г. Чилингаров и С.И. Эйдельман решают очередную научную проблему



**Рис. 8.** А.Д. Букин



**Рис. 7.** А.Н. Криницын



**Рис. 9.** Б.Л. Сысолетин, Б.Н. Шувалов, В.Д. Кутовенко, А.Е. Волков. 1979 г.

Е.П. Солодов

## 2.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

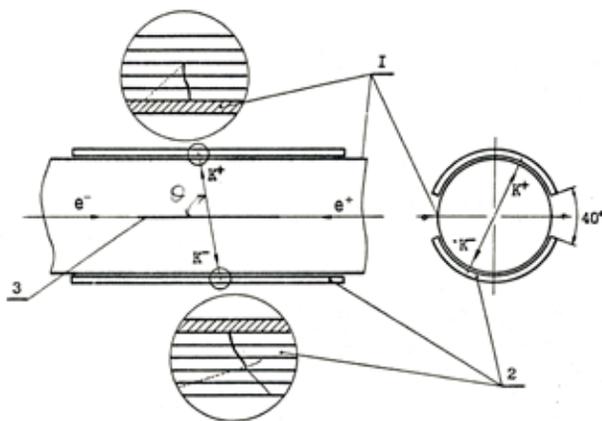
В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века в ИЯФ произошло бурное освоение новых методик регистрации частиц в связи со строительством и вводом в строй нового накопителя со встречными  $e^+e^-$  пучками ВЭПП-2М. Это был и детектор ОЛЯ с полностью электронной системой считывания, и уникальные счетчики Пестова. По инициативе Л. М. Баркова разрабатывался Криогенный Магнитный Детектор (КМД), в котором пропорциональные проволочные счетчики и широкоазорная оптическая искровая камера работают при температуре  $-110^\circ\text{C}$  внутри сверхпроводящего солениода. Проект КМД дал старт огромному числу новых технологий в ИЯФ, начиная от создания криогенной станции для производства жидкого гелия и до производства уникальных сверхпроводящих змеек.

Наряду с этим Лев Митрофанович привнес в эксперименты на встречных пучках методику, которая никогда ранее не использовалась, как, впрочем, не использовалась больше нигде и никогда. Это метод регистрации заряженных частиц из  $e^+e^-$  столкновений в ядерной эмульсии. Ядерные эмульсии (та же фотопленка, только с толстым в 0,4 мм светочувствительным слоем и без пленки) широко использовались в 50-60-х годах и постепенно сошли на нет с развитием электронных детекторов. Но точность локализации треков в несколько микрон (треки видны в микроскоп в слое эмульсии после проявления как цепочка частиц серебра размером 0,3 мкм) стала доступна электронным детекторам только в недавние годы в связи с развитием полупроводниковых пиксельных детекторов.

В эксперименте предлагалось измерить параметры  $\phi$ -резонанса по регистрации заряженных каонов в ядерной эмульсии. Дело в том, что масса  $\phi$ -резонанса 1019,4 МэВ находится очень близко к порогу рождения сравнительно тяжелых каонов (пара  $K^+K^-$  «весит»  $2 \times 493 = 986$  МэВ), и каоны имеют всего около 16 МэВ кинетической энергии. Такие каоны пробегают в веществе до полной остановки около 2 миллиметров, и если на их пути поставить ядерную эмульсию, то после проявления следы каонов можно найти по «жирным» трекам из-за больших ионизационных потерь и остановкам с последующим распадом или «звездой» от ядерного взаимодействия. Еще одной уникальной особенностью эмульсионные детекторы обладают в связи со способностью измерять кинетическую энергию заряженных частиц по длине пробега до остановки. Для этого изучается химический состав эмульсии, измеряется толщина и вес. По формуле Бете-Блоха и измеренному пути до остановки вычисляется кинетическая энергия каонов. На момент проведения экспериментов масса заряженных каонов измерялась по рентгеновско-

му излучению К-мезоатомов и, добавив массу каонов к измеренной кинетической энергии, можно получить энергию встречных  $e^+e^-$  пучков с точностью  $10^{-4}$  (около 100 кэВ).

Схема эксперимента, проведенного в 1974-1976 гг., приведена на рис. 1. Вакуумная камера (1) из фольги толщиной 100 мкм окружает место встречи (3), и рожденные в результате  $e^+e^-$  взаимодействия каоны разлетаются в разные стороны и останавливаются в слоях ядерной эмульсии (2). В кружках показано, как каоны протыкают слои эмульсии и распадаются после остановки ( $K^+$ ) или дают ядерную звезду ( $K^-$ ). Используются пять слоев эмульсии, собранных в стопку только на время облучения на пучках. Это позволяет выделять каоны из места встречи по переходам треков из слоя в слой и подавлять фон от случайных треков  $\approx$  эмульсия это интегральный детектор, и собирает все, что через нее пролетело от момента производства до проявления. В эксперименте изменялась энергия накопителя и подсчитывалось количество каонов при каждом значении энергии (подставлялась новая стопка из эмульсионных слоев), строилась кривая возбуждения  $\phi$ -резонанса и определялись его параметры. Для измерения светимости были разработаны специальные детекторы однократного тормозного излучения с возможностью измерения профиля пучка фотонов [1], и по двум таким профилям с двух сторон экспериментального промежутка восстанавливалось положение места встречи с точностью около 0,5 мм.



**Рис. 1.** Вакуумная камера (1) окружает место встречи (3), и рожденные в результате  $e^+e^-$  взаимодействия каоны разлетаются в разные стороны и останавливаются в слоях ядерной эмульсии (2)

Эмульсия изготавливалась в Институте атомной энергии им. Курчатова в Москве, привозилась в ИЯФ, обрезалась по размерам, обмерялась микрометром, взвешивалась, упаковывалась в стопки, ставилась на накопитель и облучалась. После этого слои проявлялись, высушивались и наклеивались на подложку для просмотра на микроскопе. Просмотр эмульсионных слоев и поиск каонных треков проводился профессиональными просмотристами в Курчатовском институте и молодыми сотрудниками ИЯФ В. Смахтиным и Е. Солодовым. Это был многомесячный, довольно трудоемкий процесс, в результате которого было найдено 1100 пар заряженных каонов при интегральной светимости в  $2,76 \text{ нб}^{-1}$  в восьми точках по энергии в двух сканированиях. Были получены самые точные на тот

момент значения массы и ширины  $\phi$ -мезона [2]. Забавно, что уже тогда эффективность регистрации (вероятность просмотристу найти след каона) определялась по количеству треков, найденных в одной стопке и пропущенных при просмотре в противоположной части эмульсионного детектора. Просмотристы чаще пропускали треки, идущие перпендикулярно стопке эмульсионных слоев. Наклонный трек виден лучше. Каждый слой просматривался двумя просмотристами и по количеству найденных и пропущенных следов определялась эффективность самого просмотриста.

В это же время на накопителе ВЭПП-2М развивалась уникальная методика измерения энергии встречных пучков методом резонансной деполяризации с точностью  $2 \times 10^{-5}$  (20 кэВ). Метод ядерной эмульсии позволял измерить кинетическую энергию заряженных каонов приблизительно с такой же точностью, и по разности этих энергий извлечь массу каонов. В накопитель инжектировались позитроны, в течение двух часов они поляризовались при энергии 650 МэВ, потом энергия опускалась до энергии  $\phi$ -резонанса, выдерживалась временная пауза для выхода накопителя на стационарный режим и включался деполяризатор. После определения энергии ставилась эмульсия, добавлялись пучки электронов и позитронов (3x3, 5x5 мА) и проводилось облучение в течение 30–50 минут. По найденным 250 следам каонов в эмульсии и измеренным пробегам вычислялась масса заряженных каонов.

Этот уникальный эксперимент позволил измерить массу каонов с точностью 29 кэВ [3], что сравнимо с экспериментами в К-мезоатомах и до сих пор является одним из самых точных измерений. В. Смахтин отвечал за весь эксперимент и по результатам защитил кандидатскую диссертацию. Надо отметить, что ВАК не утверждал результаты защиты в течение двух лет, так как нашелся «черный» оппонент, который отказывался верить, что можно провести измерения с такой точностью. В. Смахтин ездил на специально организованную сессию ВАК с докладом и убедил в справедливости полученных результатов.

За измерения масс элементарных частиц на накопителях ИЯФ Л.М. Барков и В.П. Смахтин в составе других сотрудников ИЯФ были удостоены Государственной премии СССР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Крупин и Е.П. Солодов. Материалы рабочего совещания по методике пропорциональных камер. Препринт 13–7154, 70, Дубна, 1973.
2. Л.М. Барков и др. Измерение параметров  $\phi$ -мезона методом ядерной эмульсии Препринт ИЯФ 79–93, Новосибирск, 1979.
3. L.M. Barkov et. al. K-meson mass measurement. Nucl. Phys. v. B148, 53, 1979.

## ДИССЕРТАЦИИ

1. Владимир Петрович Смахтин. Измерение параметров  $\phi$ -мезонного резонанса и массы заряженных каонов в накопителе ВЭПП-2М методом ядерных фотоэмульсий. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1979 г.

Н.М. Рыскулов, Б.И. Хазин

## 2.3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ КМД

Успешные эксперименты с накопителем ВЭПП-2, одним из неожиданных и замечательных результатов которых оказалось большое сечение рождения адронов в электрон-позитронных столкновениях, инициировали создание установки ВЭПП-2М с большей светимостью (т.е. производительностью) встречных электрон-позитронных  $e^+e^-$  пучков. Новое поколение детекторов могло бы повысить точность этих измерений и дать толчок к развитию теоретических моделей для описания наблюдаемых явлений. Это было время бурного развития методики встречных пучков, которое охватило все мировые центры, занимающиеся физикой высоких энергий.

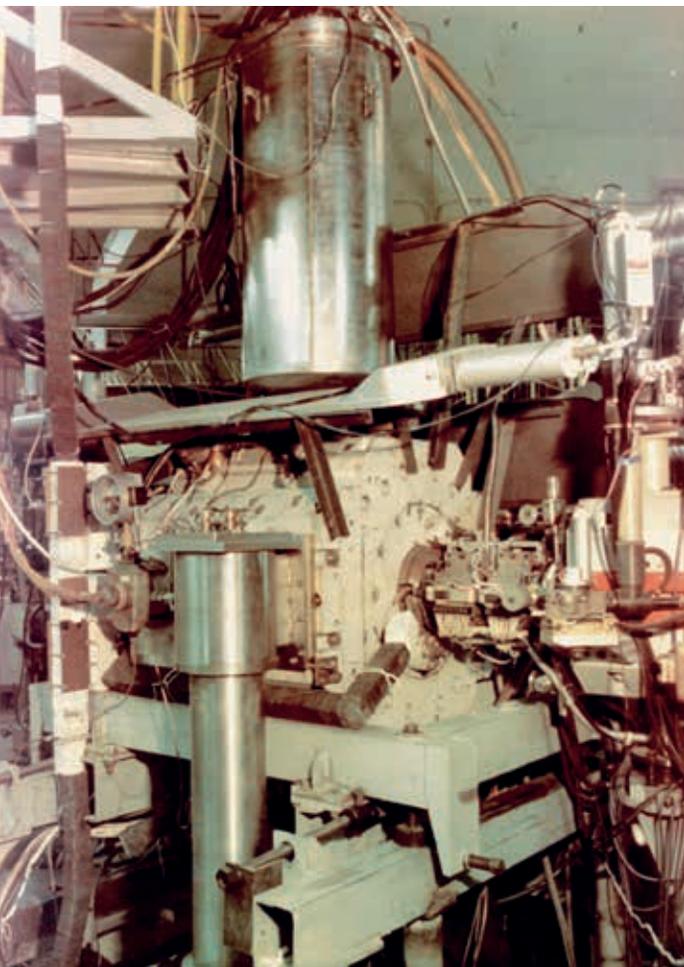
Новые ускорительные установки предъявляли совершенно новые требования к устройству детекторов. Если раньше основным поставщиком новой информации были эксперименты на выведенных пучках и детекторы представляли собой набор относительно легко заменяемых модулей, то теперь естественным вариантом геометрии регистрирующих систем стал цилиндр, охватывающий место встречи, доступ к которому бесконечно усложнялся необходимостью вскрытия вакуумной трубки накопителя, разборкой дипольных магнитов и тому подобными неприятностями. Все эти проблемы, слабо понимаемые основной рабочей силой, в основном состоящей из вчерашних выпускников и студентов старших курсов Новосибирского университета, и тщательно скрываемые опытными руководителями недавно организованной лаборатории 2 Львом Митрофановичем Барковым и Гением Александровичем Блиновым, не могли погасить энтузиазма, с которым команда взялась за дело.

Согласно проекту, основным регистрирующим элементом детектора была искровая камера с оптическим съемом информации – большой опыт работы с такими устройствами был у Л.М. Баркова, а в качестве триггера предполагалось использовать многопроволочные пропорциональные камеры – устройство, которому было несколько лет от роду и которое никем еще в Институте не использовалось... Искровая и пропорциональные камеры размещались внутри сверхпроводящего соленоида с магнитным полем до 32 кГс. Здесь стоит отметить, что ни одного похожего устройства в Институте еще не было и о том, что такое сверхпроводники и жидкий гелий, известно было только понаслышке.

В соответствии с описанными идеями, в начале 70-х годов группой Г.А. Блинова был спроектирован детектор КМД (Криогенный Магнитный Детектор) и началась реализация новаторского замысла Л.М. Баркова по организации в институте производства жидкого гелия (впервые по эту сторону Урала). Значительный вклад в инженерную разработку детектора внесли сотрудники конструкторского отдела В.Н. Зайцев и В.М. Хорев. Инженерную поддержку проекта обеспечивал И.Г. Снопков,

а интенсивные станочно-слесарные работы выполняли В.М. Борейко, В.С. Мельников, Э.Э. Мархель, В. Румянцев, В. Совалёв. Радиомонтажные работы, которые выполнялись Ю.Н. Филипенко, В.М. Титовым, Е.В. Ерастовым, В. Рябченко, И.Ф. Легостаевым, как, впрочем, и множество иных дел, связанных со строительством детектора, курировал Е.П. Солодов. Уже в процессе набора статистики на коллайдере в команду КМД пришел В.С. Охапкин, успешно завершивший деятельность в другом эксперименте. Он модернизировал устройство для перелива жидкого гелия и сделал это так удачно, что с небольшими изменениями оно применялось еще много лет в детекторах КМД-2 и КМД-3.

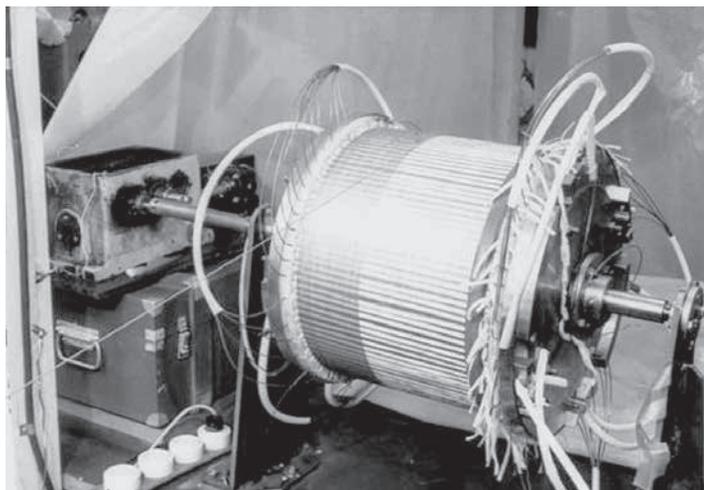
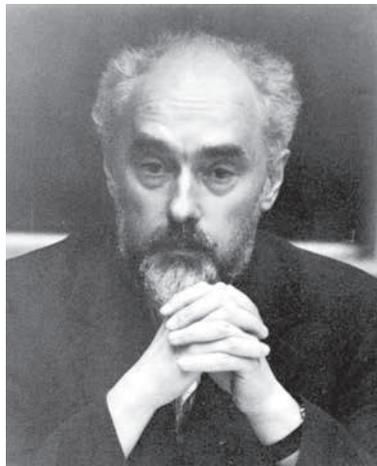
Гелиевый ожижитель и необходимая инфраструктура усилиями Н.С. Баштового и Г.Б. Минченкова были собраны и запущены в начале 70-х годов, и первая порция жидкого гелия была получена в 1974 году. После этого ожижитель был передан в ведение команды А.Т. Попова, которая впоследствии стала основой коллектива криогенной станции, производящей в настоящее время жидкий гелий для всего СО РАН.



**Рис. 1.** Внешний вид детектора КМД

В конечном варианте Криогенный Магнитный Детектор представлял собой систему из сверхпроводящего соленоида, внутри которого соосно размещались цилиндрическая оптическая искровая камера (ИК) с шестью зазорами и две цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) – одна охватывала место встречи, а другая располагалась за искровой камерой. Перед искровой камерой была установлена линза, а за ней зеркала, которые собирали изображение треков частиц на киноплёнку.

**Рис. 2.** Соленоид детектора КМД – первый сверхпроводящий соленоид в ИЯФ



**Рис. 3.** Лев Митрофанович Барков

Важным элементом детектора являлся сверхпроводящий соленоид с рабочим магнитным полем 32 кГс, сконструированный и изготовленный Г.А. Блиновым, В.Б. Барышевым и Н.С. Баштовым. Наличие магнитного поля позволяло измерить импульс заряженных частиц по кривизне треков.

Продолжением этой деятельности было создание первой в мире сверхпроводящей змейки. Идея была предложена Л.М. Барковым, а сделали ее В.Б. Барышев, Н.С. Баштовой и С.П. Дёмин. Змейка представляла собой линейку из 16 полюсов с чередующейся полярностью магнитного поля. Электронный пучок, двигаясь в переменном магнитном поле, имеет извилистую траекторию и интенсивно генерирует синхротронное излучение (СИ). Такие змейки, получившие название вигглеров, используются сегодня во всем мире.

Основным регистрирующим элементом детектора КМД была созданная Е.Н. Губановым и Н.М. Рыскуловым искровая камера, работающая в трековом режиме. В газе камеры происходил искровой пробой по ионизированному треку от заряженной частицы. Этот светящийся след фотографировался кинокамерой (главным кинооператором был Н.М. Рыскулов), а потом в режиме сменного дежурства километры экспонированной киноплёнки обрабатывались на проявочной машине. Для уменьшения многократного рассеяния в камере ее цилиндрические электроды были сделаны из нагартованной алюминиевой фольги толщиной 50 мкм. С этой же целью вакуумный промежуток был изготовлен из нержавеющей стали толщиной 60 мкм, а для предотвращения его смятия внешним давлением внутрь промежутка была вставлена бериллиевая трубка толщиной 1 мм.

Благодаря повышенной плотности газа в ИК (рабочая температура – 180 К, давление – 2,2 атм) и наличию магнитного поля, диффузия электронов ионизации сильно подавлялась, что позволило получить пространственное разрешение около 50 мкм в плоскости, перпендикулярной оси пучков. Для получения такого разрешения нужно было тщательно разобраться в тонкостях работы оптической системы детектора. По инициативе В.П. Смахтина ее параметры были измерены в красном свете луча лазера, соответствующем цвету специальных реперов, контролирующих сшивку отдельных областей пространства камеры. Однако, как известно, коэффициент преломления зависит от длины волны, а цвет искр только условно можно было считать красным... Да и спектральная чувствительность киноплёнки сдвигала его в неизвестном направлении. Окончательно проблема определения параметров оптики решилась, когда по предложению Е.П. Солодова были проведены контрольные заходы с регистрацией треков заряженных частиц с использованием бесцветного (для одной половины ИК) и оранжевого и синего (для другой половины ИК) светофильтров. Разница измеренных координат треков была использована для калибровки оптической системы и устранила множество необъяснимых загадок.

Отснятая киноплёнка просматривалась с помощью специально для этой цели разработанного А.И. Шехтманом сканирующего автомата. При этом очень важную роль на том этапе, когда из устройства надо было «выжать» необходимую точность измерений, сыграл В.П. Смахтин.

Оперативное измерение светимости (ответственный Н.М. Рыскулов) осуществлялось посредством счёта двойного тормозного излучения при рассеянии электронов на позитронах. Для этого Н.М. Рыскуловым были изготовлены два ливневых сцинтилляционных счётчика, располагавшихся на противоположных концах прямолинейного промежутка, в котором был установлен КМД. Основным источником фона было рассеяние электронов и позитронов на остаточном газе, сопровождаемое излучением фотона.

Триггер детектора обеспечивали две многопроволочные пропорциональные камеры (МПК), разработанные Б.И. Хазиним и Е.П. Солодовым. Внутренняя камера, охватывающая вакуумную камеру, и наружная, охватывающая искровую камеру, включались на совпадения, выбирая события с требуемой топологией. Триггер является важной составляющей любого детектора для борьбы с фоновыми нагрузками (ложными срабатываниями из-за выбывающих из пучка частиц). Только при включенном магнитном поле сверхпроводящего соленоида, которое закручивало фоновые частицы с малым поперечным импульсом и не давало им достичь наружной МПК, удавалось достичь приемлемой частоты запуска детектора.

Проблему фона иллюстрирует следующий эпизод. На пусковом этапе работы детектора фоновая нагрузка была настолько высокой, что просто не позволяла работать. Ввиду конструктивных особенностей вакуумный промежуток места встречи пучков, расположенный внутри КМД, предварительно прогреть было невозможно, и это давало повод

для подозрений о повышенном газовыделении из металла в этом месте. Дело дошло до того, что Ю.М. Шатунов, начальник лаборатории, обеспечивающей работу ВЭПП-2М, предложил команде КМД принять мужественное решение – выкатиться из ВЭПП-2М и заняться чем-нибудь другим... В предчувствии, что это решение может реализоваться, команда КМД проводила на установке дни и ночи напролёт. В конце концов ответственному за измерение светимости пришла в голову идея переставить ливневые счётчики и измерить фон из другого промежутка – не окажется ли, что мужественное решение придётся принимать кому-то другому? Так оно и вышло – фон в другом промежутке оказался в несколько раз выше. ВЭПП-2М был вскрыт, и в том, другом, промежутке были найдены следы вакуумного масла, пары которого портили вакуум и являлись причиной фоновых проблем. После санации вакуума положение нормализовалось, но проблемы фона и триггера периодически были причиной бессонницы у части команды КМД.

С весны 1979 года до лета 1984 года КМД набирал физическую инфраструктуру. Основными задачами были измерения параметров векторных мезонов, прецизионное измерение массы нейтрального каона и изучение процессов множественного рождения адронов.

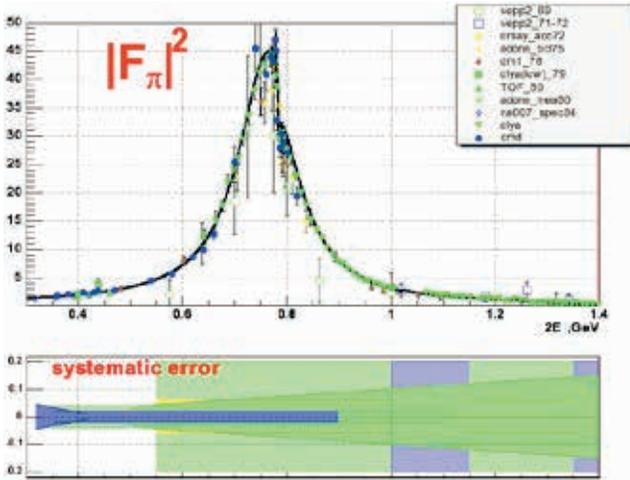
За давностью лет и отсутствием в те времена персональных компьютеров сейчас уже очень непросто вспомнить подробности, которыми сопровождалась экспериментальные сеансы, но отдельные фрагменты можно извлечь из студенческих дипломных работ, опубликованных статей и защищенных диссертаций.

Для измерения параметров  $\rho$ -мезона сечение рождения пары из положительного и отрицательного пиона, на которую он распадается, было измерено в диапазоне энергий от 360 до 820 МэВ в системе центра масс. Полный интеграл светимости в этом эксперименте составил  $40 \text{ нб}^{-1}$ , которые были набраны за 34 дня, распределенных на 4 года работы. При этом было снято примерно полмиллиона кадров фотопленки. Результатом этого эксперимента было самое точное в мире на тот момент измерение пионного формфактора и параметров  $\rho$ -мезона. Данные этого эксперимента вместе с результатами детекторов ОЛЯ и TOF, которые были получены на ВЭПП-2М примерно в это же время, приведены на рисунке 4.

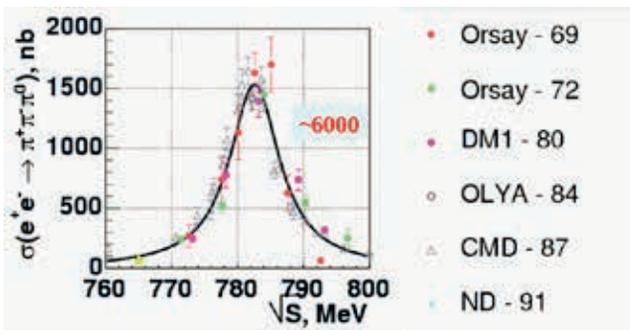
Приятно отметить, что на момент написания этой статьи (2017 г.) число ссылок на совместную статью КМД и ОЛЯ [1], в которой описываются эксперименты по измерению формфактора пиона этими детекторами, превысило 400.

Не менее интересными и значимыми были прецизионные измерения параметров  $\omega$ -мезона, основной модой распада которого является распад на три пиона. В этом эксперименте сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  измерялось в 15 точках по энергии в узком диапазоне от 760 до 810 МэВ в системе центра масс. Интеграл светимости, набранный в мае-июне 1984 года, составил около  $50 \text{ нб}^{-1}$ , а число снятых кадров превысило 310 000. Поскольку ширина  $\omega$ -мезона, равная 8,3 МэВ, гораздо меньше ширины  $\rho$ -мезона – 150 МэВ, понятие массы для него применимо мно-

го лучше, а значит, и измерять ее надо было гораздо точнее. Поэтому в этом эксперименте энергия пучков измерялась с помощью недавно разработанной в ИЯФ методики резонансной деполяризации. Содержание этой методики описано в другом разделе этой книги, поэтому не будем останавливаться на ней подробно. Отметим только, что ее применение в данном эксперименте потребовало разработки хитроумных методик прохождения деполяризующих резонансов, которые блестяще были проведены командой накопителя ВЭПП-2М. Результат эксперимента приведен на рисунке 5.



**Рис. 4.** Результаты экспериментов ТОФ, ОЛЯ и КМД по измерению электромагнитного формфактора пиона в сравнении с данными других доступных в то время экспериментов



**Рис. 5.** Результаты экспериментов ОЛЯ, НД и КМД по измерению сечения рождения трех пионов, из анализа которого были получены параметры  $\omega$ -мезона

Отметим, что результаты этого эксперимента долгое время были лучшими в мире, уступив в конце концов результатам измерений с детектором КМД-2.

Еще одним прецизионным экспериментом детектора КМД стало измерение массы нейтрального каона. Суть эксперимента состояла в измерении предельного угла разлета пары пионов, на которые распадается короткоживущий каон. Величина этого угла определяется скоростью каона, а она, в свою очередь, зависит от его массы. Таким образом, если энергию пучка измерить методом резонансной деполяризации, а затем очень точно измерить предельный угол разлёта пи-

онов, можно определить, чему равна масса нейтрального каона. При этом чем медленнее летят каоны, тем выше чувствительность измерения. Успеху эксперимента способствовало три фактора: существование вблизи порога рождения нейтральных каонов  $\phi$ -мезона, который с большой вероятностью распадается на пару медленных каонов, разработанный в институте метод резонансной деполяризации для измерения энергии пучков и замечательное пространственное разрешение детектора КМД.

В результате удалось измерить массу каона с точностью в 4 раза лучше среднемировой.

Обработка данных, полученных в экспериментах с детектором КМД еще продолжалась, когда коллектив, используя полученный опыт, приступил к созданию нового детектора, получившего название КМД-2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. L.M. Barkov et al., Electromagnetic Pion Form-Factor in the Timelike Region, Nucl. Phys. B256 (1985) 365–384.
2. Л.М. Барков и др. Измерение массы нейтрального каона. Письма в ЖЭТФ 42 (1985) 1113–1116.
3. Л.М. Барков и др. Измерение свойств  $\omega$ -мезона с помощью криогенного магнитного детектора. Письма в ЖЭТФ 46(1987)132-134.
4. Л.М. Барков и др. Прецизионное измерение массы нейтрального каона. Ядерная физика 46 (1987) 1088–1094.
5. Л.М. Барков и др. Исследование многопионного рождения с помощью криогенного магнитного детектора на накопителе ВЭПП-2М. Ядерная физика 47 (1988) 393–400.

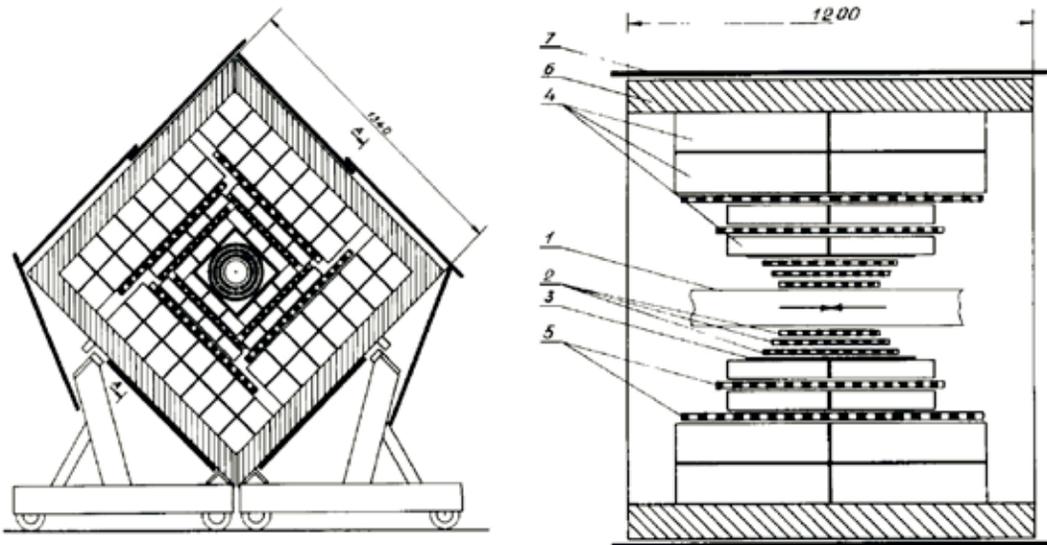
## ДИССЕРТАЦИИ

1. Борис Исаакович Хазин. Измерение формфактора пиона на встречных электрон-позитронных пучках в диапазоне энергий  $360 \text{ МэВ} \leq 2E \leq 820 \text{ МэВ}$ . Диссертация к.ф.-м. н. ИЯФ, Новосибирск, 1984 г.
2. Владимир Михайлович Хорев. Сверхпроводящие магнитные системы для экспериментов на накопителях электронов и позитронов. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 1983 г.
3. Евгений Петрович Солодов. Изучение адронных реакций при энергиях встречных электрон-позитронных пучков  $2E=1,09-1,35 \text{ ГэВ}$  с помощью криогенного магнитного детектора. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1984 г.
4. Николай Миржакифович Рыскулов. Прецизионное измерение массы нейтрального каона. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1987 г.
5. Александр Исаевич Шехтман. Измерение параметров  $\omega$ -мезона на накопителе ВЭПП-2М с помощью криогенного магнитного детектора. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1987.

В.П. Дружинин

## 2.4. ДЕТЕКТОР НД. ЭКСПЕРИМЕНТЫ 1982–1987

Нейтральный детектор (НД) для экспериментов на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М начал проектироваться в 1976 году. В это время на ВЭПП-2М успешно набирал статистику детектор ОЛЯ, но стало уже ясно, что нужен новый, более современный детектор. В 70-х годах существенно возросли возможности по автоматизации эксперимента. Появились так называемые мини-ЭВМ, а также конструктив для цифровой электроники КАМАК. На их основе можно было построить быструю систему сбора данных. Для регистрации заряженных частиц была развита методика многопроволочных пропорциональных камер. Они значительно превосходили использовавшиеся ранее искровые камеры по быстродействию, т.е. позволяли работать при более высоких нагрузках и набирать большую статистику. Была осознана необходимость эффективной регистрации фотонов. Во второй половине 70-х появились проекты трех детекторов с электромагнитными калориметрами, основанными на кристаллах NaI. Это Crystal Ball для экспериментов на  $e^+e^-$  коллайдере SPEAR (SLAC, США), CUSB для экспериментов на  $e^+e^-$  коллайдере CESR (Итака, США) и наш НД.

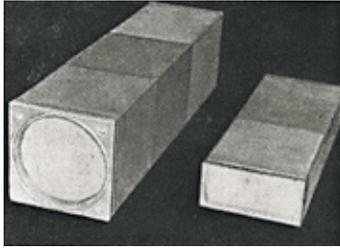


**Рис. 1.** Схема нейтрального детектора: 1 – вакуумная камера ВЭПП-2М; 2 – цилиндрические пропорциональные камеры; 3 – пластиковые сцинтилляционные счетчики; 4 – сцинтилляционные счетчики на основе кристаллов NaI; 5 – ливневые пропорциональные камеры; 6 – железный поглотитель; 7 – пластиковые сцинтилляционные счетчики антисовпадений

Вспоминает С.И. Середняков:

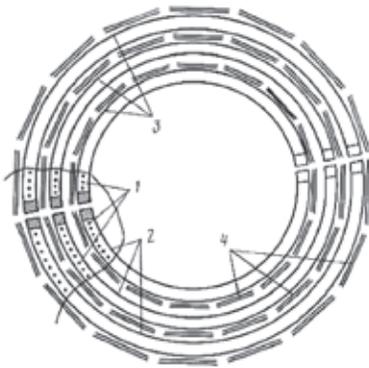
– 1976 год. ВЭПП-2М оказался очень успешным проектом: его светимость на два порядка превосходила светимость ВЭПП-2 и достигала  $10^{30}$  см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>. На коллайдере начал успешно работать детектор ОЛЯ, обладающий хорошими возможностями по регистрации заряженных частиц, поэтому своевременно было принято решение строить детектор следующего поколения, способный эффективно регистрировать фотоны, измерять их углы вылета и энергии. В это время большинство физиков третьей лаборатории было занято в экспериментах. В.А. Сидоров предложил Жене Кушниренко и мне подумать над следующим детектором для ВЭПП-2М. Жена Кушниренко занимался жидким аргоном и предложил калориметр на его основе. Детектор с таким калориметром оказывался огромным. У меня был опыт работы со сцинтилляторами на основе кристаллов NaI. Цилиндрический кристалл большого размера использовался в мониторе светимости на ВЭПП-2 и ВЭПП-2М. В первом нарисованном варианте детектора использовались цилиндрические кристаллы. Затем мы увидели доклад о проекте американского детектора CUSB, в котором также были кристаллы NaI, но прямоугольного сечения. Связались с химическим комбинатом в Усолье-Сибирском. Они сказали: «Да. Можем делать прямоугольные, но нужен фрезерный станок». После этого была выбрана окончательная схема калориметра. Вспоминается эпизод в 1977 году. После заседания секции совета по ФВЭ А.М. Будкер спросил меня, а хорошо ли мы подумали, начиная этот проект. Я что-то сказал про моделирование ливней в детекторе. Будкер выслушал мой ответ с сомнением. Так или иначе, но дело уже закрутилось. ИЯФ купил для комбината станок, началась отработка технологии изготовления счетчиков калориметра. Было произведено несколько тонн NaI, что было рекордным по тем временам.

Схема детектора НД показана на рисунке 1. Калориметр НД состоял из 168 счетчиков на основе кристаллов NaI. Общий вес кристаллов составляет 2,6 тонны. NaI из-за своей гигроскопичности является, вообще говоря, не самым лучшим материалом для больших калориметров. В современных детекторах он практически не используется. Однако в то время выбора не было: крупнотоннажное производство можно было организовать только для NaI. Кристаллы (рис. 2) были произведены на химическом комбинате в г. Усолье-Сибирском. Для регистрации сцинтилляционного света использовались ФЭУ-84. Калориметр состоит из четырех слоев кристаллов, между первым и вторым и вторым и третьим слоями расположены двухкоординатные пропорциональные «ливневые» камеры. Для фотонов, вылетающих из центра детектора, они находятся на глубине, соответствующей максимуму числа частиц в электромагнитном ливне, порождаемом фотоном, и поэтому с большой (около 90%) вероятностью срабатывают от заряженной компоненты ливня. По измеренным координатам срабатываний ливневых камер определяются углы вылета фотонов.



**Рис. 2.** Кристаллы для калориметра детектора СНД

Вакуумная камера коллайдера окружена тремя слоями двухкоординатных пропорциональных камер (рис. 3), которые предназначены для измерения углов вылета заряженных частиц. Координата в плоскости, перпендикулярной оси камеры, измерялась по номеру сработавшей проволочки, а продольная координата определялась по разнице времен прихода сигналов на концы линии задержки, расположенной вдоль проволочки. Также было устроено измерение координат в ливневых камерах.



**Рис. 3.** Система пропорциональных камер детектора НД:

- 1 – сигнальные проволочки;
- 2, 3 – корпус камеры;
- 4 – линии задержки

Вспоминает С.И. Середняков:

– 1978 год. Проект НД одобрен. В группе, кроме меня, Миша Минаков и Игорь Редько (они занимаются изготовлением счетчиков NaI и измерением их параметров) и Саша Перышкин, год назад окончивший НГУ (занимается пропорциональными камерами). Появился новый студент – Володя Дружинин. Его дипломная работа – монитор светимости для ВЭПП-2М. Наш заведующий лабораторией А.Г. Хабахпашев, мудрый человек, посоветовал поговорить с двумя молодыми сотрудниками В. Иванченко и В. Голубевым насчет их привлечения в НД. Я провел переговоры, и они перешли в нашу лабораторию. Вот этот состав и начал делать детектор. Конструктором был А. Романчук. Электронику делали в группах В. Аульченко и С. Бару. Для поддержки электроники НД и разработки специфических электронных блоков Аульченко рекомендовал нам Юру Усова.

Снаружи калориметра расположен железный поглотитель, предназначенный для поглощения остатков электромагнитных ливней, за ним – пластмассовые сцинтилляционные счетчики, которые включались в антисовпадения с остальными системами детектора и служили

для уменьшения количества запусков детектора от космических частиц. При включении детектора оказалось (хотя это можно было и предвидеть), что значительная часть космических частиц залетает в детектор сбоку, минуя антисовпадательные счетчики. Срочно были сделаны дополнительные счетчики, которые крепились к торцу верхней половины железного поглотителя. Возможно, из эстетических соображений эти счетчики никогда не изображались на схеме детектора.

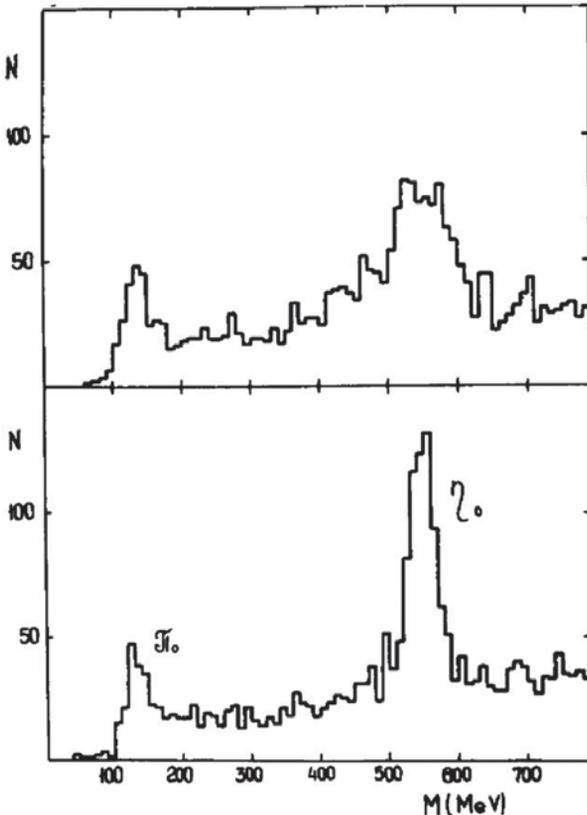
Электроника детектора включала в себя цифровую электронику в стандарте КАМАК на 500 каналов (ЗЦП, ВЦП...), систему считывания информации с анодных проволочек пропорциональных камер на 2000 каналов, систему высоковольтного питания на 220 каналов (55 блоков ВВИ в специальной стойке) и многое другое. Следует отметить, что блоки ВВИ, сделанные для НД, до сих пор используется в ИЯФ как в различных стендах, так и на детекторах. Вся электроника была произведена в ИЯФ.

Считывание информации с цифровой электроники осуществлялось с помощью мини-ЭВМ (три шкафа высотой не менее 1,5 м и шириной около метра) М-6000. На этом компьютере с оперативной памятью 64 КБ и характерным временем на операцию 5 мкс была создана система сбора данных (ССД), не уступавшая по функциональности современным. Система сбора данных читала события с КАМАК со скоростью около 10 Гц, осуществляла их программный отбор и упаковку. Затем события передавались на центральную ЭВМ (тоже М-6000), находящуюся в ИЯФовском вычислительном центре (ВЦ), для записи на магнитную ленту. Скорость записи была около 2 Гц. Во время экспериментальных заходов проводилось измерение светимости коллайдера, контролировалась работоспособность и загрузка различных подсистем детектора. ССД включала программу визуализации событий, с помощью которой на мониторе раз в несколько секунд изображалось очередное экспериментальное событие. Были специальные программы калибровки аппаратуры, контроля питающих напряжений, измерения эффективностей камер и счетчиков, порогов энерговыделений. В общем, это была почти идеальная с точки зрения физика-экспериментатора система сбора данных. По функциональности она стала образцом для ССД детектора следующего поколения СНД.

Обработка записанных данных проводилась на ЭВМ ЕС 1040, 1060 и 1061 на ВЦ ИЯФ. Для анализа данных была разработана специальная гистограммная программа. Собственная разработка лаборатории № 3 – пакет программ UNIMOD (авторы А.Д. Букин, В.Н. Иванченко, М.Ю. Лельчук, В.А. Таюрский, С.И. Эйдельман, В.И. Юрченко) – использовалась для моделирования изучаемых и фоновых процессов взаимодействия родившихся частиц с веществом детектора.

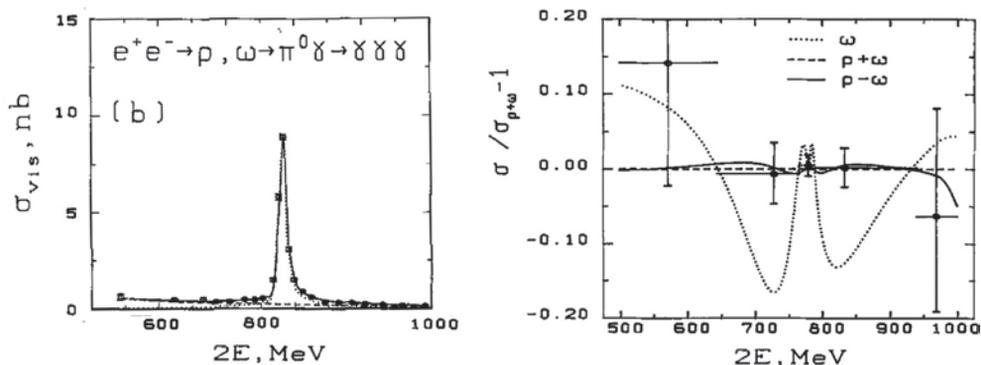
Эксперименты с детектором НД проводились с 1982 года по 1987 год. Данные набирались в диапазоне энергии в системе центра масс от 0,5 до 1,4 ГэВ. Всего было записано 50 миллионов событий. Соответствующий интеграл светимости составил  $19 \text{ пб}^{-1}$ . Это приблизительно в 8 раз больше, чем статистика, записанная в предыдущем эксперименте ОЛЯ.

В 70-х и в начале 80-х годов, в период, когда создавался детектор НД, произошел важный прорыв в понимании структуры элементарных частиц: было осознано, что сильновзаимодействующие частицы, адроны, состоят из кварков. В этот период были обнаружены и исследованы тяжелые кварконии (связанные состояния кварка и антикварка) чармоний и боттомоний, состоящие из  $c$ - и  $b$ -кварков соответственно. В начале 80-х семейство чармония содержало уже 10 частиц ( $\eta_c$ -,  $\psi$ - и  $\chi_c$ -мезоны), а семейство боттомония 9 частиц ( $\Upsilon$ - и  $\chi_b$ -мезоны). Были изучены переходы, в том числе и радиационные, между состояниями кваркониев. Надо отметить, что огромный вклад в исследование радиационных переходов внесли упомянутые выше детекторы с кристаллическими калориметрами Crystal Ball и CUSB. Экспериментальные данные по тяжелым кваркониям прекрасно описывались в рамках потенциальной кварковой модели. Резонансы  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$ , наблюдавшиеся на ВЭПП-2 и ВЭПП-2М, также являются состояниями кваркония, но состоят из смеси легких кварков,  $u$ ,  $d$  и  $s$ . Неудивительно, что главной задачей для детектора НД стало измерение радиационных переходов в системе легких кваркониев, а именно распадов  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$  в конечные состояния  $\pi^0\gamma$  и  $\eta\gamma$ , и сравнение вероятностей распадов с предсказаниями кварковой модели. Большинство из этих распадов наблюдалось до начала работы детектора НД, однако точность измерений была невелика.



**Рис. 4.** Спектр инвариантных масс двух фотонов в трехфотонных событиях из энергетической области вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса. Верхний рисунок – до, а нижний – после применения кинематической реконструкции

Первым результатом НД, опубликованным в 1984 году, стало измерение радиационных распадов  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$  и  $\eta\gamma$ . Распады наблюдались в трехфотонном конечном состоянии. Для фотонов, зарегистрированных в детекторе НД, измерялись все характеристики: энергия и полярный и азимутальный углы вылета. В трехфотонных событиях девять измеренных параметров частиц связаны четырьмя условиями сохранения полной энергии и импульса в событии.



**Рис. 5.** Слева: энергетическая зависимость сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \rho, \omega \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow \gamma \gamma \gamma$ , измеренная в эксперименте с детектором НД. Справа: относительная разность между тремя моделями, используемыми для описания экспериментальных данных. Точки показывают экспериментальные данные, усредненные по пяти энергетическим интервалам

При анализе данных НД стала применяться процедура кинематической реконструкции, которая, во-первых, проверяла степень выполнения законов сохранения (это позволяет подавить фон) и, во-вторых, использовала условия сохранения для уточнения параметров события. Эффект кинематической реконструкции показан на рисунке 4, где приведен спектр двухфотонных инвариантных масс в трехфотонных событиях из энергетического диапазона вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса до и после кинематической реконструкции. Пики на массах  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов происходят от событий с распадами  $\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$  и  $\eta \gamma$ . Процедура кинематической реконструкции, разработанная для детектора НД, стала одним из основных инструментов анализа данных в последующих экспериментах с детектором СНД. В результате экспериментов с детектором НД точность измерения вероятности распада  $\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$  была улучшена в 4 раза, до 10%, а распада  $\phi \rightarrow \eta \gamma$  – в три раза, до 4,6%. Малость вероятности распада  $\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$  ( $1,3 \times 10^{-3}$ ) указывает на то, что  $\phi$ -мезон состоит в основном из странных кварков. Одним из важных результатов НД явилось существенное уточнение примеси  $u$ - и  $d$ -кварков внутри  $\phi$ -мезона. По результатам НД она составила  $(3,5 \pm 0,4) \times 10^{-3}$ .

На детекторе НД было впервые проведено детальное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$  при энергиях ниже  $\phi$ -мезонного резонанса, где оно определяется в основном распадами  $\omega$ - и  $\rho$ -мезонов. Поскольку эти резонансы перекрываются, существенный вклад в сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$  вносит интерференция между амплитудами распадов  $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$  и  $\rho \rightarrow \pi^0 \gamma$ . Измеренное сечение показано на рисунке 5; в нем доминирует вклад  $\omega$ -мезона. Экспериментальные данные аппроксимировались в трех гипотезах: моделью с амплитудой  $\rho$ , равной нулю, и моделями с конструктивной и деструктивной интерференцией между амплитудами  $\rho$ - и  $\omega$ -мезонов. Сравнение этих моделей с экспериментальными данными показано на рисунке 5. Видно, что данные требуют ненулевой амплитуды распада  $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$ . До эксперимента НД этот распад наблюдался только в заряженном канале

$\rho^+ \rightarrow \pi^+ \gamma$ . Интересной особенностью этого анализа является невозможность экспериментально различить модели с конструктивной и деструктивной интерференцией. Для выбора знака интерференции приходится привлекать теоретические соображения. В данном случае кварковая модель предсказывает конструктивную интерференцию.

Сечение радиационного процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta \gamma$  не удалось выделить в трехфотонном канале из-за большого электродинамического фона от процесса  $e^+e^- \rightarrow 3\gamma$ . К счастью, у  $\eta$ -мезона имеется другой большой канал распада – в три  $\pi^0$ -мезона, поэтому была предпринята попытка поискать процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta \gamma$  в семифотонном конечном состоянии. Детектор НД не был рассчитан на регистрацию многофотонных событий: эффективность регистрации всех семи фотонов оказалась мала. Выручило отсутствие других существенных источников многофотонных событий. Повысить эффективность регистрации удалось, разрешив потерю двух из семи фотонов. В результате было отобрано около 50 событий с пятью и более фотонами. При аппроксимации измеренного сечения были определены вероятности распадов  $\omega \rightarrow \eta \gamma$  и  $\rho \rightarrow \eta \gamma$ . Результаты оказались сравнимыми по точности с единственным предыдущим измерением вероятностей этих распадов.

Важным параметром, необходимым для сравнения результатов по радиационным распадам с предсказаниями, является полная ширина резонанса, величина которой может быть определена только экспериментально. Для  $\omega$ -мезона на момент эксперимента НД табличное значение ширины составляло  $9,8 \pm 0,3$  МэВ. Это значение являлось результатом усреднения 14 измерений. Каково же было наше удивление, когда при аппроксимации кривой возбуждения  $\omega$ -мезона в канале  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  мы получили на 15% меньшее значение ширины, равное  $8,4 \pm 0,1$  МэВ. Наше измерение затем было подтверждено в экспериментах КМД, СНД, КМД-2. Современное значение ширины  $\omega$ -мезона –  $8,49 \pm 0,08$  МэВ. Следует отметить, что сдвиг табличного значения 1987 года есть результат систематического сдвига всех имеющихся в то время данных: из 14 измерений 13, включая три измерения на встречных пучках, лежали выше современного значения.

Эксперименты с детектором НД привели к существенному уточнению данных по четырем из восьми измеренных в то время радиационных переходов между легкими векторными ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) и псевдоскалярными ( $\pi$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ) мезонами. Как это ни странно, согласие с предсказаниями кварковой модели в результате этого уточнения только улучшилось. Была предпринята попытка поиска последнего необнаруженного распада  $\phi \rightarrow \eta' \gamma$ , вероятность которого мала из-за близости масс  $\phi$ - и  $\eta'$ - мезонов. К сожалению, удалось установить только верхний предел на вероятность распада. Этот распад был все же обнаружен на ВЭПП-2М, но в экспериментах с более совершенными детекторами КМД-2 и СНД.

Обсуждаемые выше распады относятся к классу магнитных дипольных переходов, связанных с наличием у кварков магнитных моментов. Они происходят между низшими состояниями кваркония  $^3S_1$  (векторные мезоны) и  $^1S_0$  (псевдоскалярные мезоны). На НД был проведен поиск радиационных распадов другого типа, в два псевдоскаляра и

фотон:  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ ,  $\phi \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ ,  $\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ . Эти распады могут идти через различные промежуточные состояния, в том числе чисто адронные, например,  $\phi, \omega \rightarrow \rho^0 \pi^0$ ,  $\rho \rightarrow \pi^0 \gamma$ . Наиболее интересным представляется другой механизм распадов, электрический дипольный переход в скалярное состояние, например,  $\phi \rightarrow f_0(980) \gamma$ ,  $\phi \rightarrow a_0(980) \gamma$ . К сожалению, чувствительности детектора НД не хватило для обнаружения распадов  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ ,  $\phi \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$  и  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ . Были установлены верхние пределы на их вероятности. В результате этих поисков была осознана важность измерения распадов  $\phi \rightarrow f_0(980) \gamma$ ,  $\phi \rightarrow a_0(980) \gamma$  для понимания кварковой структуры мезонов  $f_0(980)$  и  $a_0(980)$ . Эти измерения станут важнейшими результатами будущих экспериментов с детекторами КМД-2 и СНД.

На детекторе НД был впервые измерен распад  $\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ . Следует отметить, что это измерение не удалось повторить в последующих экспериментах на СНД и КМД-2, возможно, из-за сложности и трудоемкости анализа. Основным механизмом этого распада является излучение мягких фотонов пионами. Спектр фотонов может быть рассчитан с помощью скалярной электродинамики в приближении точечного пиона. Эксперимент должен был установить степень справедливости этого приближения. Как спектр фотонов, так и вероятность распада (около 1% для энергии фотона больше 50 МэВ), измеренная с 15% точностью, хорошо согласуются с электродинамическим расчетом.

К радиационным распадам близко примыкает класс Далиц-распадов, в которых вместо фотона наблюдается пара  $e^+ e^-$ . Вероятность таких распадов приблизительно в 100 раз меньше вероятности соответствующего радиационного распада. На детекторе НД впервые были измерены два распада этого типа  $\phi \rightarrow \eta e^+ e^-$  и  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ .

Детектор НД внес существенный вклад в измерение адронных сечений. Были изучены процессы  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ,  $\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ ,  $\pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ ,  $\eta \pi^+ \pi^-$ ,  $\omega \pi^0$ . Были продолжены исследования электродинамических процессов. На НД удалось выделить редкие процессы четвертого порядка по константе электромагнитных взаимодействий  $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$ ,  $e^+ e^- \gamma \gamma$ ,  $\gamma \gamma \gamma \gamma$  в кинематике, когда все конечные частицы излучаются на большой угол и регистрируются. Процесс  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma \gamma \gamma$  наблюдался впервые. Измеренные угловые и энергетические распределения хорошо согласовались с расчетом.

По результатам экспериментов с НД было напечатано около 20 работ в физических журналах. Многие результаты не были превзойдены в течение многих лет. Обзор физических результатов НД был опубликован в журнале *Physics Reports* в 1991 году. Этот обзор набрал более 200 цитирований.

В создании детектора, проведении экспериментов и анализе данных участвовали физики С.И. Середняков, В.Н. Иванченко, В.Б. Голубев, А.С. Перышкин, В.П. Дружинин, М.С. Дубровин, Е.В. Пахтусова, С.И. Долинский (рис. 4). Инженерное сопровождение обеспечивали М.Д. Минаков, И.Ю. Редько. Конструктор детектора – А.И. Романчук. Электроника для детектора была изготовлена в группах В.М. Аульченко и С.Е. Бару. Непосредственное сопровождение электроники осуществлял Ю.В. Усов. Система сбора данных детектора основывалась на программных разработках Б.Н. Шувалова. В анализе данных использовалось программное

обеспечение, разработанное под руководством А.Д. Букина. В создании детектора участвовали механики и лаборанты А.А. Живалев, В.В. Гусев, П.И. Нечунаев, С. Шаратов, С. Солдатов, Ю. Марков, С. Куцкин. Все физики, участвовавшие в создании детектора, защитили диссертации: В.Н. Иванченко, В.Б. Голубев, А.Н. Перышкин, В.П. Дружинин, М.С. Дубровин – кандидатские, С.И. Середняков – докторскую.

## ЛИТЕРАТУРА

1. S.I. Dolinsky et al., Summary of experiments with the neutral detector at the  $e^+e^-$  storage ring VEPP-2M, Phys.Rep. 202 (1991) 99.

## КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Владимир Николаевич Иванченко. Радиационные распады  $\phi$ -мезона  $\phi \rightarrow \eta\gamma$  и  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1985 г.

2. Владимир Борисович Голубев. Комptonовское рассеяние квази-реальных фотонов на электронах и позитронах. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1985 г.

3. Александр Николаевич Перышкин. Процесс  $e^+e^- \rightarrow 4\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.

4. Владимир Прокопьевич Дружинин. Распад  $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.

5. Михаил Сергеевич Дубровин. Радиационные распады  $\rho, \omega \rightarrow \pi^0\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1989 г.

## ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сергей Иванович Середняков. Рождение нейтральных частиц в  $e^+e^-$  аннигиляции при энергии  $2E < 1,4$  ГэВ. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.

2. Александр Дмитриевич Букин. Математическое обеспечение экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 1991 г.

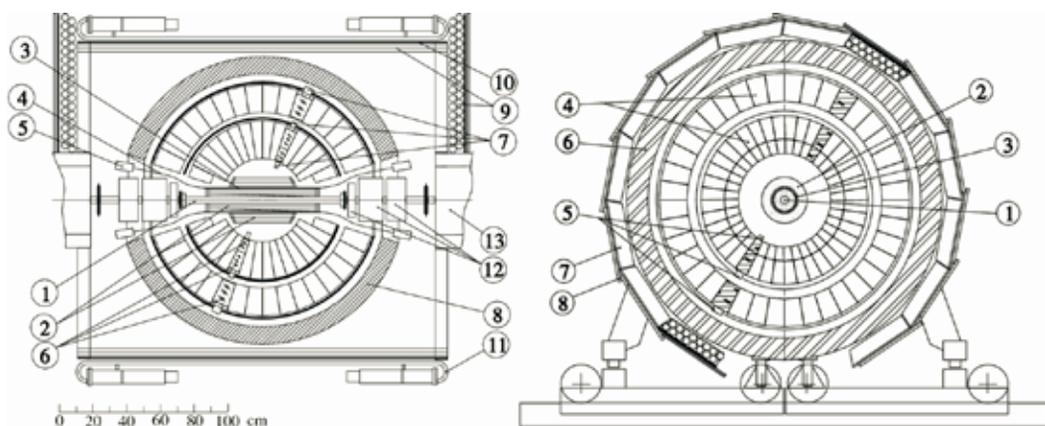


**Рис. 6.**  
Команда НД  
и СНД.  
Слева направо:  
В. Лайс,  
З.К. Силагадзе,  
В.Б. Голубев,  
С.И. Долинский,  
В.П. Дружинин,  
С.И. Середняков,  
М.С. Дубровин,  
Е.В. Пахтусова,  
А.И. Романчук,  
А.Н. Перышкин,  
В.Н. Иванченко

В.П. Дружинин

## 2.5. ДЕТЕКТОР СНД. ЭКСПЕРИМЕНТЫ 1995–2000

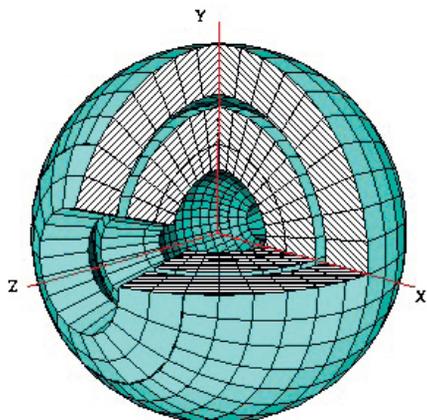
Замысел Сферического Нейтрального Детектора (СНД) возник в 1982 году после знакомства с известным в то время детектором Crystal Ball. Тогда В.А. Сидоров предложил подумать о нашем ответе при не-пременном условии, что наш проект будет лучше, чем Crystal Ball. И очень скоро наша команда предложила СНД – трехслойный шар. В 1985 году, когда эксперимент с детектором НД шел еще полным ходом, проект СНД был уже готов, и часть физиков с НД стала заметную часть времени тратить на создание нового детектора.



**Рис. 1.** Детектор СНД на ВЭПП-2М. Слева – сечение вдоль оси пучков: 1 – вакуумная камера ВЭПП-2М; 2 – дрейфовые камеры; 3 – цилиндрический сцинтилляционный счетчик; 4 – световоды; 5 – ФЭУ; 6 – кристаллы NaI; 7 – вакуумные фототриоды; 8 – железный поглотитель; 9 – стримерные трубки; 10 – железные пластины; 11 – сцинтилляционные счетчики; 12 – магнитные линзы; 13 – поворотные магниты. Справа – сечение поперек оси пучков

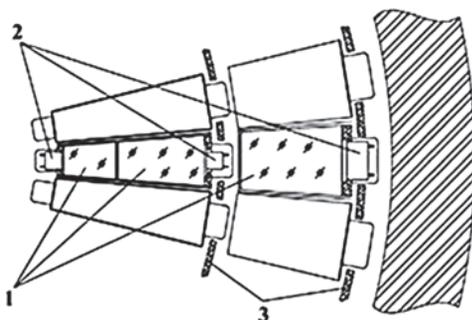
Схема детектора СНД показана на рисунке 1. Основной его частью является трехслойный сферический калориметр на основе кристаллов NaI (рис. 2, 3). Первоначально число кристаллов составляло 1680, ровно в десять раз больше, чем в детекторе НД. При установке детектора на ВЭПП-2М пришлось снять 8 счетчиков третьего слоя. Чуть позже из-за тесноты внутри детектора были убраны еще 40 счетчиков из первого слоя. Калориметр сегментирован таким образом, что кристаллы имеют одинаковый размер, 9 градусов, по полярному и азимутальному углам. Важной характеристикой детектора является телесный угол, перекрываемый калориметром. Для СНД это 90% от  $4\pi$ , а у НД было 65%. Для пятифотонного события только за счет увеличения телесного угла выигрыш в эффективности регистрации по сравнению с НД составляет 5,5

раза, а для семифотонного – 11 раз. Существенно, по сравнению с НД, возросли и точности измерения углов вылета и энергий фотонов. Углы вылета заряженных частиц измерялись трековой системой, состоящей из двух дрейфовых камер. Внутренняя «длинная» камера имеет телесный угол даже больше, чем калориметр, 96% от  $4\pi$ .



**Рис. 3.** Расположение кристаллов и фототриодов калориметра СНД: 1 – кристаллы NaI(Tl); 2 – фототриоды; 3 – несущие сферы

**Рис. 2.** Конфигурация кристаллов калориметра СНД



В 1985 году были произведены первые образцы кристаллов калориметра. Так же, как и для НД, кристаллы изготавливались в Усолье-Сибирском. Если в НД использовалась стандартная заводская технология упаковки кристаллов NaI, то для СНД была разработана новая схема герметизации с использованием тонкостенных контейнеров из алюминиевой фольги. В результате удалось сделать зазор между соседними кристаллами всего 0,5 мм. Полный вес калориметра составляет 3,5 тонны. Произвести такое количество кристаллов было непростой задачей. Когда в 1987 году закончился эксперимент с детектором НД, большая часть кристаллов калориметра НД была использована для производства счетчиков нового детектора. Съём света в калориметре предполагалось осуществлять с помощью вакуумных фототриодов. В то время промышленного выпуска таких фототриодов не было. Совместно с новосибирским заводом «ЭКРАН» начали развивать технологию их производства. В конце концов производство фототриодов для первого и второго слоя калориметра было налажено в ИЯФ, а для третьего слоя – на заводе «ЭКРАН».

Непростой технической задачей оказалась сборка кристаллов калориметра в сферу. Но самые большие трудности ожидали при включении

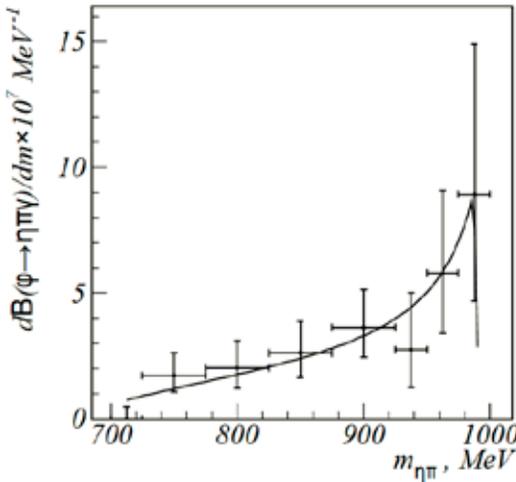
калориметра после установки фототриодов и монтажа предусилителей. Здесь произошел переход количества в качество. Большое количество контактов, ненадежность предусилителей и фототриодов привели к тому, что после монтажа электроники на детекторе около 10% каналов калориметра оказались неработоспособны. После ремонта одних каналов выходили из строя другие, и начинало казаться, что процесс ремонта не закончится никогда. Все же после значительного количества итераций ненадежные усилители и фототриоды выгорели, а ненадежные контакты были найдены. Особенно тяжелая ситуация была на первом слое калориметра, где у края детектора фототриоды стояли практически вплотную, и места для электроники и вывода кабелей не оставалось. Тогда-то и было принято решение о снятии крайних кристаллов первого слоя. Но даже после этого на следующих от края кристаллах пришлось присоединить по два фототриода на один предусилитель. Эта проблема была решена только через два года после начала работы детектора, когда была разработана другая схема монтажа электроники с применением печатных кросс-плат.

Для экспериментов с детекторами КЕДР, СНД, КМД-2 в ИЯФ был разработан свой собственный стандарт оцифровывающей электроники КЛЮКВА, а также набор модулей для этого стандарта, позволяющий оцифровывать сигналы с дрейфовой камеры, калориметра и других систем. Использование этого стандарта позволило легко считывать возросший (на порядок по сравнению с предыдущим поколением детекторов) объем информации с детектора. На СНД скорость считывания при 10%-ных просчетах составляла 80 Гц.

Разбиение калориметра по слоям, конечно, принесло много головной боли по механике, электронике, бесконечно затруднило ремонты, усложнился анализ данных. Но было и много плюсов. Например, выход из строя одного из счетчиков не приводит к «дыре» в эффективности, а лишь ухудшает разрешение в этом месте. Пучковый и космический фон часто виден в форме «треков» в калориметре. Для частиц, вылетающих из центра, распределение энергии по слоям облегчает идентификацию частиц.

Эксперименты с детектором начались в 1995 году. Первый сезон с новым детектором был посвящен отладке электроники, программного обеспечения, изучению фоновых условий и т.д. Первая полезная экспериментальная информация была накоплена в 1996 году. Было проведено несколько сканирований энергетического диапазона вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса. Первые результаты обработки этих данных были доложены на конференции HADRON 1997 в Брукхейвене (США). Главным результатом было обнаружение распадов  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  и  $\eta \pi^0 \gamma$ . Интерес к этим распадам связан с тем, что в них доминируют электрические дипольные переходы  $\phi \rightarrow f_0(980) \gamma$  и  $\phi \rightarrow a_0(980) \gamma$ , где  $f_0(980)$  и  $a_0(980)$  – скалярные мезоны с весьма необычными свойствами. В кварковой модели скалярные резонансы являются орбитальными возбуждениями кваркония, состояниями  ${}^3P_0$ . По массе они должны быть близки к состояниям кваркония  ${}^3P_2$ , хорошо известным тензорным мезонам  $f_2(1270)$  и

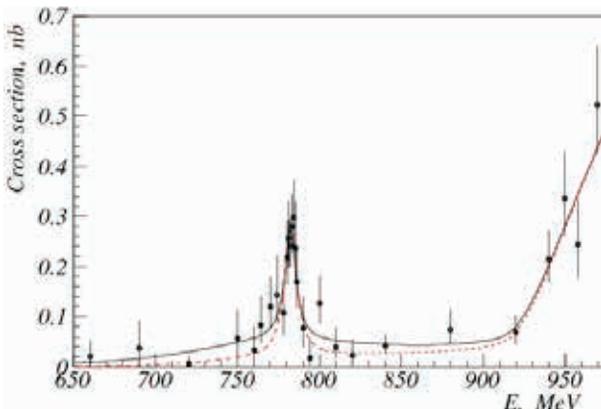
$a_2(1320)$ . Резонансы  $f_0(980)$  и  $a_0(980)$  имеют на 300 МэВ меньшую массу и рассматриваются как кандидаты в экзотические состояния: молекулы из К и анти-К-мезонов или четырехкварковые состояния, содержащие дополнительно пару странных кварков, s анти-s. Измеренные на СНД относительно большие величины распадов  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  и  $\eta \pi^0 \gamma$  однозначно указывали на наличие s анти-s компонентов в  $f_0(980)$  и  $a_0(980)$  мезонах и, следовательно, на их экзотическую природу (рис.4). Теоретические споры между сторонниками различных моделей, в частности, молекулярной и четырехкварковой, продолжают до сих пор.



**Рис. 4.** Спектр масс системы  $\eta\pi^0$  в распаде  $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ , свидетельствующий о доминировании  $a_0(980)$  в конечном состоянии

Эксперименты с детектором СНД продолжались до 2000 года. В диапазоне энергий от 300 до 1400 МэВ были записаны данные с интегральной светимостью около  $32 \text{ пб}^{-1}$ . Это в полтора раза больше, чем статистика, накопленная в эксперименте с детектором НД.

Однако существенно возросшие точности измерения углов и энергий частиц и эффективность их регистрации позволили изучать на СНД ранее недоступные процессы. Например, в сечении процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$  вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса была обнаружена интерференционная волна, соответствующая нарушающему сохранение изопопического спина распаду  $\phi \rightarrow \omega\pi^0$ . Впервые была измерена вероятность этого распада. Для другого процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  впервые было измерено сечение при энергии ниже 1 ГэВ. Результат измерения показан на рисунке 5.



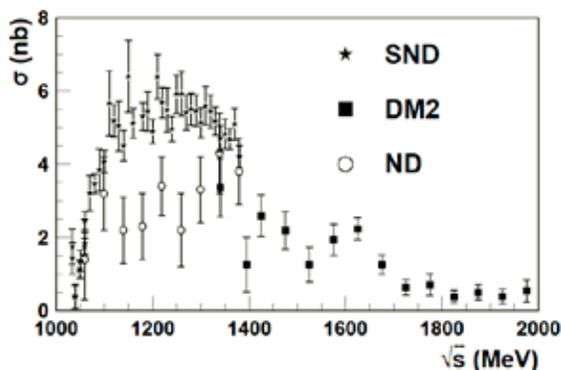
**Рис. 5.** Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ , измеренное на СНД. Точки с ошибками – экспериментальные данные. Сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных с учетом распадов  $\omega$  и  $\rho \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ , включая распад  $\rho \rightarrow f_0(500)\gamma$ . Пунктирная линия – аппроксимация с вероятностью распада  $\rho \rightarrow f_0(500)\gamma$ , равной нулю. Рост сечения выше 920 МэВ связан с открытием канала  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$

Ниже 900 МэВ основной вклад в сечение дают распады  $\omega$ - и  $\rho$ -мезонов, причем распад  $\rho \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  наблюдался впервые. В этом распаде был выделен вклад электрического дипольного перехода  $\rho \rightarrow f_0(500) \gamma$ , где  $f_0(500)$  – еще один скалярный мезон, не вписывающийся в «наивную» кварковую модель.

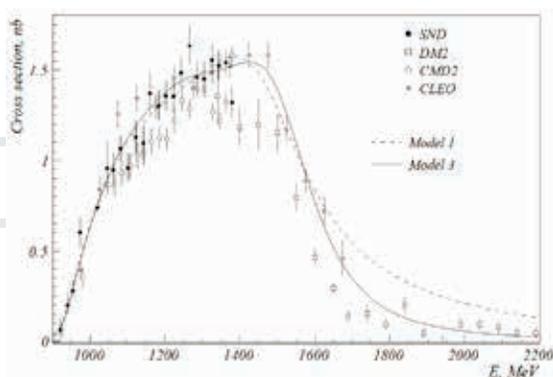
На детекторе СНД были продолжены измерения магнитных дипольных распадов  $\rho$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов. Удалось, наконец, увидеть распад  $\phi \rightarrow \eta' \gamma$ , правда, после его обнаружения на детекторе КМД-2. С использованием новых данных по радиационным распадам был существенно уточнен кварковый состав  $\eta$ - и  $\eta'$ -мезонов. Удивительно, что соотношения между вероятностями радиационных переходов, предсказанные в рамках очень простой кварковой модели, продолжают выполняться даже при значительно возросшем уровне экспериментальной точности.

С середины 80-х годов существенно поменялись приоритеты в экспериментальной физике высоких энергий. Огромных успехов в объяснении экспериментальных данных и предсказании новых явлений достигла Стандартная модель, объединяющая сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия. Большое внимание в эксперименте стало уделяться поиску редких процессов и прецизионным измерениям, в которых можно было обнаружить отклонения от Стандартной модели, так называемую «новую физику». Коллайдеру ВЭПП-2М в некотором смысле повезло. Оказалось, что единственный точный метод расчета вклада адронов в поляризацию вакуума основан на использовании экспериментальных данных по полному сечению  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны. Причем область энергий, перекрываемая ВЭПП-2М, является наиболее важной. Упомянутый выше адронный вклад нужен, например, для расчета бегущей константы электромагнитных взаимодействий и аномального магнитного момента мюона  $(g-2)_\mu$ . Эксперимент по точному измерению  $(g-2)_\mu$  должен был заработать в BNL (Брукхейвен, США) в 1998 году. Для того чтобы провести прецизионное сравнение экспериментального результата с расчетом, требовалось в разы улучшить точность измерения адронных сечений в области ВЭПП-2М.

На СНД были промерены сечения большинства адронных процессов, происходящих на ВЭПП-2М:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $\pi^+\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^+\pi^0\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-\eta$ ,  $K^+K^-$ ,  $K_S^0 K_L^0$ ,  $\pi^0\gamma$ ,  $\eta\gamma$  и др. (рис. 6, 7). Эти же измерения параллельно выполнялись на детекторе КМД-2. По ряду процессов, в том числе по  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ , дающему максимальный вклад в  $(g-2)_\mu$ , лучшая точность была получена на КМД-2. К 2002 году, к появлению первого результата эксперимента в BNL, точность расчета  $(g-2)_\mu$  была улучшена в два раза и стала сравнима с точностью эксперимента. Тогда же была обнаружена разница между расчетом и измерением на уровне 2,5 стандартных отклонений. К настоящему времени точности измерения и расчета улучшились примерно в 1,5 раза до приблизительно  $0,5 \times 10^{-6}$ , а разница между теорией и экспериментом возросла до 3,5 стандартных отклонений. Это одно из немногих имеющихся в настоящее время отклонений от предсказаний Стандартной модели.



**Рис. 6.** Сечение процесса:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в сравнении с результатами предыдущих измерений



**Рис. 7.** Сечение процесса:  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  в сравнении с результатами предыдущих измерений

Моделирование эксперимента выполнялось с помощью пакета программ UNIMOD-2, разработанного под руководством А.Д. Букина сотрудниками 3-й лаборатории (Н.А. Грозина, М.С. Дубровин, И.Л. Кац, В.Н. Иванченко, В.А. Таюрский, С.И. Эйдельман) и К. Хэнсгена из Лейпцигского университета.

Выше были описаны наиболее важные измерения, выполненные на СНД. Всего же по результатам экспериментов с СНД на ВЭПП-2М было опубликовано 50 статей.

В создании детектора, проведении экспериментов и анализе данных участвовали физики С.И. Середняков, В.Н. Иванченко, В.Б. Голубев, А.Н. Перышкин, В.П. Дружинин, М.С. Дубровин, Е.В. Пахтусова, С.И. Долинский, З.К. Силагадзе, Т.В. Димова, И.А. Гапоненко, А.А. Сальников, А.А. Король, М.Н. Ачасов, Д.А. Букин, С.В. Бурдин, А.В. Бердюгин, К.И. Белобородов, А.В. Боженок, А.Д. Букин, С.В. Кошуба, В.В. Шарый, А.В. Васильев. Производством кристаллов и фототриодов занимались М.Д. Минаков, В.А. Аксенов, П.М. Бесчастнов, Е.Е. Пята. Конструктор детектора – А.И. Романчук. Электроника для детектора была изготовлена в лабораториях В.М. Аульченко и С.Е. Бару. Непосредственное сопровождение и разработку специализированной электроники для детектора осуществляли Ю.В. Усов и Ю.С. Великжанин. В разработке системы стримерных трубок участвовали физики А. Номероцкий, М. Шубин, П. Хаустов и лаборант А.В. Чегодаев. В сборке детектора принимали участие механики и лаборанты А.А. Живалев,

В. Лайс, А. Сироткин, В.В. Гусев, П.И. Нечунаев, С. Шарапов, С. Солдатов, А. Мадин, А. Кульпин. По результатам экспериментов на ВЭПП-2М было защищено 16 диссертаций: В.Н. Иванченко, В.П. Дружинин, Е.В. Пахтусова, М.Н. Ачасов (докторские), М.Д. Минаков, А.А. Сальников, М.Н. Ачасов, Т.В. Димова, С.В. Бурдин, Д.А. Букин, А.А. Король, А.В. Бердюгин, В.В. Шарый, А.В. Васильев, А.Г. Харламов, Д.А. Штоль (кандидатские).

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.N. Achasov et al., Spherical neutral detector for VEPP-2M collider, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 449 (2000), 125.
2. M.N. Achasov et al., The  $\phi \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$  decay, Phys. Lett. B 479 (2000), 53.
3. M.N. Achasov et al., The  $\phi(1020) \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  decay, Phys. Lett. B 485 (2000), 349.
4. V.M. Aulchenko et al., The process  $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0$  near the  $\phi$  resonance, JETP, 90 (2000), 927.
5. M.N. Achasov et al., Measurements of the parameters of the  $\phi(1020)$  resonance through studies of the processes  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ ,  $K_S^0 K_L^0$ , and  $\pi^+\pi^-\pi^0$ , Phys. Rev. D 63 (2001), 072002
6. M.N. Achasov et al., Experimental study of  $\rho \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  and  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  decays, Phys. Lett. B 537 (2002), 201.
7. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy region  $\sqrt{s}$  from 0.98 to 1.38 GeV, Phys. Rev. D 66 (2002), 032001.
8. M.N. Achasov et al., Analysis of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  and  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  processes in the energy range of  $\sqrt{s}=0.98-1.38$  GeV in experiments with a spherical neutral detector, JETP, 96 (2003), 789.
9. M.N. Achasov et al., Experimental study of the  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$  process in the energy region  $\sqrt{s} = 0.60-0.97$  GeV, Phys. Lett. B 559 (2003), 171.
10. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy region  $\sqrt{s}$  below 0.98 GeV, Phys. Rev. D 68 (2003), 052006.
11. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  in the energy region  $400 < \sqrt{s} < 1000$  MeV, JETP 101 (2005), 1053.
12. M.N. Achasov et al., Study of the  $e^+e^- \rightarrow \eta \gamma$  process with Spherical Neutral Detector at the VEPP-2M  $e^+e^-$  collider, Phys. Rev. D 74 (2006), 014016.

## КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Владимир Прокопьевич Дружинин. Распад  $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.
2. Михаил Дмитриевич Минаков. Системы счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl) для экспериментов на встречных пучках. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 1990 г.
3. Михаил Николаевич Ачасов. Энергетическая калибровка calorimetра детектора СНД. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1998 г.
4. Андрей Алексеевич Сальников. Изучение распадов  $\phi \rightarrow \eta \gamma$ ,  $\pi^0 \gamma$  с детектором СНД на ВЭПП-2М. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.

5. Татьяна Владимирована Димова. Экспериментальное изучение процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e\gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e\gamma\gamma$  и конверсионных распадов  $\phi \rightarrow \eta e^+e^-$ ,  $\eta \rightarrow e^+e\gamma$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

6. Дмитрий Александрович Букин. Поиск распада  $K_S \rightarrow 3\pi^0$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

7. Сергей Вячеславович Бурдин. Распады  $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

8. Вячеслав Валерьевич Шарый. Исследование процессов  $e^+e^- \rightarrow 4\pi$  в области энергий 0,98-1,38 ГэВ с детектором СНД. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2001 г.

9. Александр Аркадьевич Король. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  в области энергий 0,6-0,97 ГэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2003 г.

10. Алексей Владимирович Васильев. Поиск процессов прямого рождения С-четных резонансов в  $e^+e^-$  аннигиляции на ВЭПП-2М с детектором СНД. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2003 г.

11. Алексей Викторович Бердюгин. Процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  в области энергий 0,6-1,4 ГэВ. Новосибирск, 2007 г.

12. Алексей Георгиевич Харламов. Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  в области энергии ниже 1 ГэВ с детектором СНД. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2010 г.

13. Дмитрий Александрович Штоль. Измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  в области энергии  $\sqrt{s}=1.04-1.38$  ГэВ. Новосибирск, 2011 г.

#### ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Владимир Николаевич Иванченко. Нейтральные радиационные распады легких векторных мезонов. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1997 г.

2. Елена Валентиновна Пахтусова. Процессы  $e^+e^-$  аннигиляции с рождением адронов и редкие каналы распада легких векторных мезонов. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

3. Владимир Прокопьевич Дружинин. Изучение процессов  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$  и  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  в области энергий ниже 1,4 ГэВ. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

4. Михаил Николаевич Ачасов. Изучение легких векторных мезонов в процессах рождения адронов в  $e^+e^-$  аннигиляции. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2013 г.

**Б.И. Хазин**

## 2.6. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-2

В середине восьмидесятых годов экспериментальные группы лабораторий физики высоких энергий Института практически одновременно предложили проекты трех новых детекторов элементарных частиц. Два из них – Криогенный Магнитный Детектор (КМД-2) и Сферический Нейтральный Детектор (СНД) – предназначались для экспериментов на коллайдере ВЭПП-2М, а КЕДР – для установки ВЭПП-4М.

Потребовалось пять лет, начиная с 1986 года, в течение которых усилиями группы физиков, инженеров и лаборантов лабораторий 2 и 3 при участии лаборатории 6, конструкторского отдела, мастерских и служб института детектор КМД-2 был изготовлен. В 1991 году начались работы по его запуску на установке ВЭПП-2М.

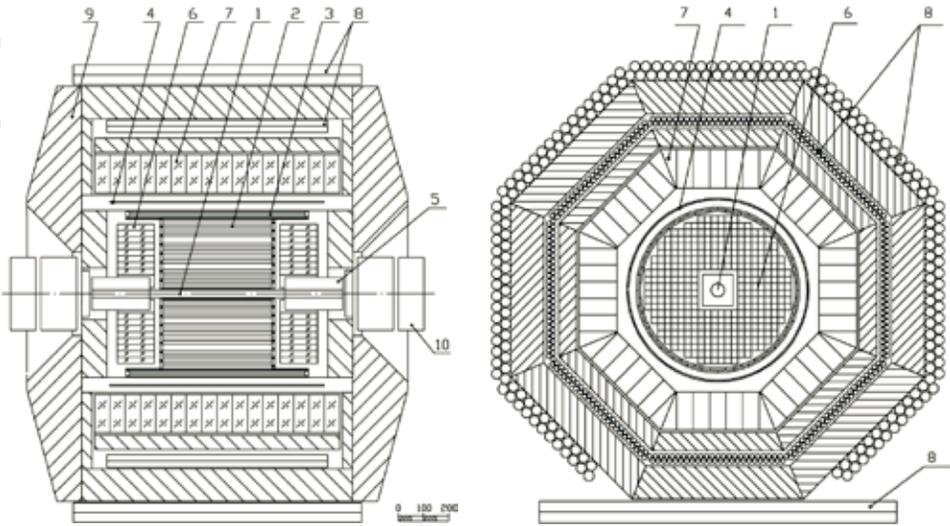
К началу проектирования КМД-2 был накоплен опыт экспериментов на ВЭПП-2М с детекторами ОЛЯ, КМД и НД, и мы представляли, каким должен быть новый детектор, чтобы решить стоящие перед ним физические задачи. Одной из них, как оказалось, наиболее востребованной научной общественностью, была задача измерения сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны с ошибкой лучше 1%. Возникла она в связи с планами группы физиков из университетов США, Германии и Японии провести в Брукхэйвской Национальной лаборатории США измерение аномального магнитного момента мюона  $g-2$  с точностью в 20 раз лучшей, чем прежде. Такой уровень точности позволял осуществить довольно жесткую проверку теоретических представлений о фундаментальных взаимодействиях: согласно расчетам, примерно одна миллионная (!) доля величины магнитного момента мюона была обязана своим происхождением слабым взаимодействиям. В то время было очень интересно в этом убедиться, чтобы выяснить, насколько хорошо мы понимаем природу слабых взаимодействий.

Однако, чтобы извлечь желаемую информацию из результатов Брукхэйвского эксперимента, надо правильно учесть вклады электромагнитного и сильного взаимодействий. Труднее всего рассчитать вклад сильного взаимодействия, и сегодня есть только один надежный способ учесть влияние адронной поляризации вакуума на величину магнитного момента мюона – измерить сечение электрон-позитронной аннигиляции в адроны при всех, доступных электрон-позитронным коллайдерам энергиях. Самой важной областью при этом оказывается диапазон энергий ВЭПП-2М.

Для точных и подробных измерений сечений рождения максимально широкого набора конечных состояний необходимо было решить две задачи – поднять светимость и обеспечить надежную работу накопительного комплекса и построить универсальный детектор, который бы эффективно регистрировал заряженные частицы и фотоны, измеряя

при этом с высокой точностью их параметры – углы вылета, импульсы и энергии. Первая задача решалась командой ВЭПП-2М, а в лаборатории 2 под руководством Л.М. Баркова началось проектирование и строительство детектора, получившего название КМД-2. Уровень развития вычислительной техники и детекторных технологий безусловно диктовал прямое считывание данных в компьютер с последующей записью на ленту (на всякий случай напомним, что персональных компьютеров в то время еще не существовало, а максимальный размер исполняемой программы в «Электронике-60» – машине, которую можно было реально использовать в качестве online-сервера, не превышал шестидесяти килобайт).

С учетом всего вышесказанного постепенно возникла концепция детектора, показанная на рис. 1. Главным конструктором проекта стал С.Г. Пивоваров, а главным инженером – В.С. Охупкин.



**Рис. 1.** Детектор КМД-2:

1 – вакуумный промежуток; 2 – дрейфовая камера; 3 – Z-камера;  
4 – сверхпроводящий соленоид; 5 – компенсирующий магнит; 6 – торцевой калориметр ВGO; 7 – калориметр CsI; 8 – пробегная система; 9 – ядро;  
10 – линза ВЭПП-2М

Внутри сверхпроводящего соленоида располагалась трековая система, состоящая из дрейфовой и Z-камер, снаружи соленоида, в цилиндрической части – электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI, а в торцах – калориметр на кристаллах ортогерманата висмута (ВGO). Прямо за CsI калориметром и снаружи от ядра в качестве пробегной системы для идентификации мюонов и вето для космических частиц были установлены два двойных слоя стримерных трубок.

Дрейфовая камера, разработанная Е.П. Солодовым, Б.И. Хазиним, В.Г. Заварзиним и И.Г. Снопковым, представляла собой цилиндр длиной 440 мм и диаметром 600 мм. Между торцами цилиндра было натя-

нуто 512 сигнальных проволочек диаметром 15 мкм и более 2500 проволочек диаметром от 100 до 300 мкм для формирования электрического поля в дрейфовом зазоре. Проволочки в камере были установлены так, что они образовывали 80 дрейфовых ячеек «струйного» типа, расположенных в три слоя. Некоторое представление об устройстве дрейфовой камеры можно получить из рис. 3. Полученные разрешения (~200 мкм по дрейфовой координате и ~5 мм вдоль оси пучков) соответствовали проектным параметрам.

Еще одним важным элементом трековой системы, одновременно выполняющим важные триггерные функции детектора, была двухслойная многопроволочная цилиндрическая пропорциональная камера, получившая название Z-камеры. Ее создание стало возможным благодаря успешным разработкам, которые были сделаны к 1985 году сотрудниками детектора ОЛЯ под руководством А.Г. Чилингарова. Ими был сделан четырехслойный годоскоп на основе плоских пропорциональных камер с полосковыми катодами. Аналоговая информация с катодных полосок, направленных поперек анодных проволочек, позволяла определять координаты трека вдоль проволочек с точно-



**Рис. 2.** Б.И. Хазин, Г.В. Федотович, Н.М. Рыскулов, Е.П. Солодов

стью ~150 мкм для вертикальных треков. Накопленный опыт работы с годоскопом использовался при создании Z-камеры детектора КМД-2, которая была успешно разработана и изготовлена Г.В. Федотовичем и Э.В. Анашкиным при инженерной поддержке М.Н. Захваткина, И.Г. Снопкова, В.Е. Федоренко и А.А. Гребенюка.

На рис. 3 представлен внешний вид Z-камеры при установке в детектор КМД-3. Поскольку при переходе от КМД-2 к КМД-3 она никак не изменилась, поэтому изображение дает правильное представление о ее конструкции.

Камера склеивалась из четырех тонких листов фольгированного СТЭФа толщиной 0,5 мм. Последующие измерения показали, что разброс диаметра этих цилиндров лежит в пределах 0,1 мм – очень важный параметр, влияющий на ширину плато счетной характеристики.

Одной из функций камеры было формирование сигнала для первичного триггера. Время столкновения пучков в ВЭПП-2М составляло 60 нс, поэтому временной разброс анодных сигналов не должен превышать 5 нс. Тогда ширина по основанию распределения временных сигналов, оцениваемая как 4 стандартных отклонения, составит  $\pm 4 \times 5 \text{ нс} = 40 \text{ нс}$  –



**Рис. 3.** Слева: дрейфовая камера детектора КМД-2. Хорошо видна «струйная» структура ячеек камеры. Справа: Z-камера детекторов КМД-2 и КМД-3 и создавшие её физики С.И. Редин, Г.В. Федотович, А.Л. Сибиданов

это меньше периода обращения пучка и позволяет привязать триггерный сигнал к конкретному столкновению. Чтобы добиться такого временного разрешения, расстояние между проволочками было выбрано близким к 3 мм. Кроме того, впервые была использована «быстрая» газовая смесь на основе фреона-14 (80%) с изобутаном (20%), что в совокупности и обеспечило временное разрешение лучше 5 нс. Камера успешно отработала в детекторе практически 10 лет.

Как уже отмечалось, дрейфовая и Z-камеры располагались внутри сверхпроводящего соленоида, создающего однородное магнитное поле в объеме дрейфовой камеры. Магнитная система в целом состояла из трёх сверхпроводящих соленоидов: основного соленоида длиной 0,9 м, диаметром 0,7 м и двух небольших компенсирующих соленоидов, расположенных на оси детектора возле торцов дрейфовой камеры. Питалась она постоянным током 1,2 кА, создавая магнитное поле 1 Т внутри основного соленоида. Поскольку обмотка соленоида находилась перед цилиндрическим CsI-калориметром, чтобы не ухудшить его энергетическое разрешение ее толщина должна была быть как можно меньшей. Не менее важным являлось требование надежной защиты обмотки соленоида при переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние. Необходимо было найти решение, которое позволило бы в минимальное время перевести в нормальное состояние всю обмотку, чтобы обеспечить однородное выделение тепла по всей её массе. Оно было найдено путем применения ранее не опробованной в ИЯФ технологии, которая заключалась в том, что сверхпроводящий кабель укладывался в винтовую канавку, проточенную на поверхности цилиндрического каркаса из нержавеющей стали, и запаивался свинцово-оловянным припоем.

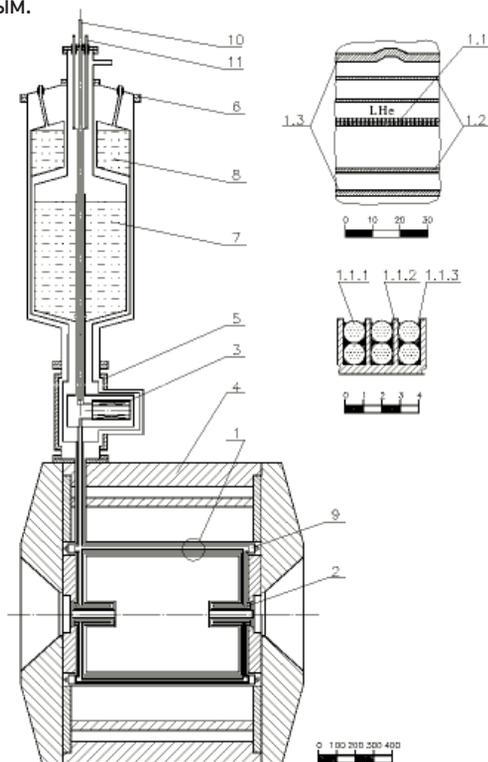
Еще одним новым для ИЯФ решением было использование сверхпроводящего статического преобразователя для ввода тока в магнитную систему вместо традиционного сильноточного источни-

ка питания. Оно позволило избежать использования толстых медных токонесущих шин и сократить приток тепла в жидкий гелий, которым охлаждалась магнитная система. Сверхпроводящий преобразователь представлял собой двухполупериодный трансформаторный выпрямитель напряжения, в котором в качестве ключевых элементов использованы не обычные полупроводниковые диоды, а управляемые нагревом сверхпроводящие ключи. В сверхпроводящем состоянии ключ не имеет сопротивления, и через него протекает ток (ключ замкнут), а в нормальном состоянии сопротивление есть, так что ток через него почти не протекает (ключ разомкнут). Путем своевременного перевода ключей из одного состояния в другое можно добиться того, что переменное напряжение, подаваемое на вход сверхпроводящего выпрямителя, преобразуется в напряжение одной полярности на его выходе. Сверхпроводящий преобразователь, питающийся переменным током амплитудой 40 А от обычного источника питания, позволял поднимать ток в магнитной системе КМД-2 до рабочей величины 1,2 кА и затем поддерживать его на необходимом уровне в течение нескольких месяцев, пока длился очередной эксперимент.

Работами по созданию и эксплуатации криогенной магнитной системы занимались В.С. Охапкин, Н.С. Баштовой, И.В. Журавков, С.В. Карпов, В.П. Смахтин, И.Г. Снопков, В.М. Титов, В.С. Мельников, В.Г. Заварзин, А.В. Максимов, А.А. Рубан и Н.М. Рыскулов. Система из датчиков ЯМР для точного измерения магнитного поля во время работы детектора была установлена Г.В. Карповым.

**Рис. 4.** Магнитная система КМД-2.

- 1 – основной магнит;
- 1.1 – основной соленоид:
- 1.1.1 – СП провод;
- 1.1.2 – нержавеющий каркас;
- 1.1.3 – припой;
- 1.2 – алюминиевые азотные экраны;
- 1.3 – внешняя, теплая оболочка вакуумного объема;
- 2 – компенсирующие соленоиды;
- 3 – СП преобразователь;
- 4 – ярмо;
- 5 – объем, в который помещен СПП;
- 6 – криостат;
- 7 – объем с жидким гелием;
- 8 – объем с жидким азотом;
- 9 – каналы для охлаждения экранов жидким азотом;
- 10 – трубка для заливки жидкого гелия;
- 11 – токовводы



Как уже отмечалось, цилиндрический электромагнитный калориметр детектора выполнен на основе кристаллов CsI. Работы с этими кристаллами ведутся в ИЯФ с 1983 года. Они были инициированы разработкой проекта нового детектора для накопителя ВЗПП-4. После изучения возможности использования целого ряда кристаллов мы остановили выбор на кристаллах CsI. Как выяснилось позже, в это время в Корнелле (США) уже разрабатывался проект детектора CLEO-II, в котором также предполагалось использовать кристаллы CsI.

В тот момент в СССР не производилось кристаллов CsI необходимого размера и качества и в нужном объеме. Развитие производства таких кристаллов было инициировано ИЯФ. Нельзя не отметить здесь большую роль В.А. Сидорова, который, будучи заместителем директора института, активно поддержал это направление. На основе развитого производства кристаллов и технологии их обработки в период с 1987-го по 1998 год было изготовлено около 10 000 кристаллов с полной массой около 40 т для экспериментов, выполняемых в ИЯФ и в международных проектах.

Примерно в 1985 году физики лаборатории 3, работавшие с кристаллами CsI, А.Е. Бондарь, Б.А. Шварц и А.С. Кузьмин предложили оснастить детектор КМД-2 цилиндрическим калориметром на основе таких кристаллов. Первая реакция на это предложение была, мягко говоря, сдержанной. Отчасти такую реакцию можно объяснить тем, что в то время в лаборатории 2 шли работы по развитию детекторов с использованием жидкого ксенона и кристаллов BGO и эти методики считались гораздо более перспективными. Однако В.П. Смахтин, который в то время с большими трудностями продвигал производство кристаллов BGO, горячо поддержал идею CsI в цилиндрической части детектора, и вскоре с помощью В.С. Охупкина и КБ Г.М. Колачева была нарисована общая схема калориметра с восьмью октантами. Через некоторое время проект калориметра на основе CsI был принят сообществом КМД, правда, при условии, что будет предусмотрена возможность смещения октантов по радиусу так, чтобы появилось место для ксенонового калориметра, когда он будет готов (оптимисты говорили о трех годах, пессимисты – о пяти).

В 1987–1989 годах были произведены 1000 кристаллов общей массой около 2,4 т для цилиндрического калориметра, а в КБ Г.М. Колачева разработана его конструкция. В 1990 году первый (тестовый) октант устанавливается в детектор, а в 1991 году калориметр был полностью собран и начал работать. Помимо упомянутых выше сотрудников лаборатории 3, активное участие в этой работе принимали А.И. Суханов, Н. Габышев, А.Н. Криницин, А.В. Чегодаев и другие. На рис. 5 можно видеть часть команды создателей калориметра и один из его октантов.

Цилиндрический калориметр детектора КМД-2 состоял из 892 сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) размером  $6 \times 6 \times 15$  см<sup>3</sup>. Толщина калориметра для нормально падающей частицы составляла около  $8X_0$ . Такая толщина активного вещества калориметра была выбрана как компромисс между необходимой эффективностью регистра-

**Рис. 5.** Слева: один из октантов калориметра. Справа: часть команды создателей CsI калориметра: А.И. Суханов, Н.И. Габышев и Б.А. Шварц



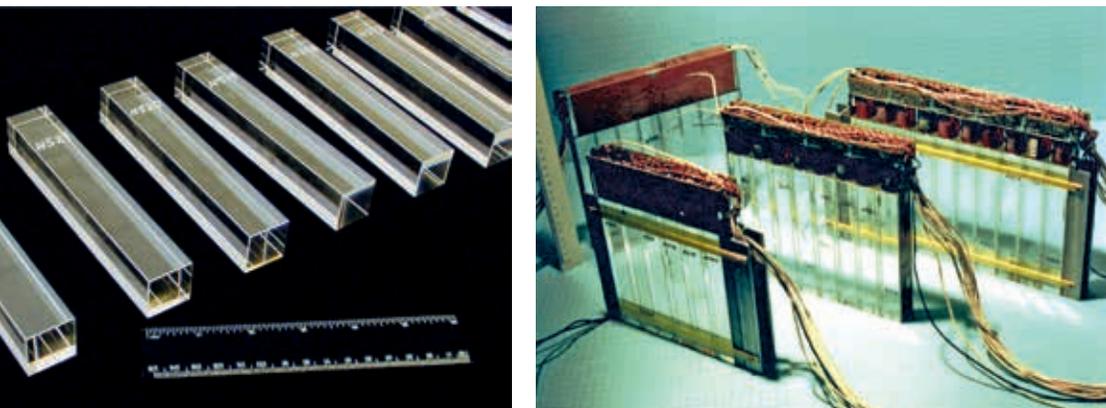
ции и энергетическим разрешением калориметра, с одной стороны, и доступным для размещения калориметра пространством и стоимостью кристаллов с другой. Вопрос с фотоприемниками также был непростым, что было обусловлено крайней ограниченностью доступной для их размещения области, а также необходимостью быстрого приобретения большого их количества. В результате были выбраны миниатюрные ФЭУ-60 с рабочим диаметром фотокатода 14 мм и высотой 70 мм, которые массово производил завод МЭЛЗ по цене 11 рублей за штуку. Непростой задачей являлось также высоковольтное питание 900 ФЭУ. Здесь также было найдено оригинальное решение с высокоомным делителем и независимой запиткой последних трех динодов. При полученном для данной конструкции коэффициенте светосбора около 2% вклад в энергетическое разрешение статистики фотоэлектронов пренебрежимо мал в области энергий выше 20 МэВ. Энергетическое и пространственное разрешение калориметра определялось флуктуациями утечек ливня и составляло соответственно  $\sigma_E/E = 8-12\%$  и  $\sigma_x = 8-12$  мм в диапазоне энергий ВЭПП-2М.

В торцевой части электромагнитного калориметра детектора использованы кристаллы BGO. Скорее всего, термин «инновация» в те времена уже существовал. Хотя мы про него не слышали, история создания торцевого калориметра сегодня может служить учебным пособием инновационной активности. Поиск сцинтилляционных кристаллов с малой радиационной длиной велся в мире непрерывно, и в 1978 году появилась работа, в которой утверждалось, что кристаллы германата висмута со структурой эвлитина  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) являются хорошими сцинтилляторами. Через четыре года в Принстоне (США) проходит рабочее совещание, на котором представляются проекты с применением BGO, а про-

изводители показывают первые кристаллы. В это же время появляется информация о том, что кристаллы германата висмута выращиваются на Красноярском заводе цветных металлов (КЗЦМ), и В.П. Смахтин предлагает использовать ВГО в торцевом калориметре разрабатываемого тогда детектора КМД-2. Отправившуюся в Красноярск для переговоров о производстве делегацию ждет разочарование – там выращиваются кристаллы со структурой силенита,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ...

Для создания технологии роста нужных нам кристаллов устанавливается контакт с группой Я.В. Васильева из ИНХ СО РАН, которая предлагает использовать разработанный ими низкоградиентный метод Чохральского и уже в 1986 году выращивает первый кристалл размером  $25 \times 25 \times 150$  мм<sup>3</sup> удовлетворительного качества. Огромную помощь в организации работ оказал В.А. Сидоров. Благодаря его усилиям появилась программа Министерства цветной металлургии «по созданию способа производства монокристаллов германата висмута со структурой эвлинита», подписанная зам. министра В.С. Устиновым 15.12.1983 г. Головным предприятием по промышленному производству ВГО выступал КЗЦМ. К этому времени в ИНХ СО РАН были получены небольшие качественные кристаллы, поэтому было принято решение развернуть на КЗЦМ производство ВГО по их технологии. Благодаря титаническим усилиям сотрудников ИНХ СО РАН и КЗЦМ в 1990 г. началось промышленное производство на пяти ростовых установках. Для увеличения объемов производства ИНХ СО РАН запускает в следующем году на Опытном заводе СО РАН (ОЗ) участок по производству кристаллов ВГО, и в 1992 г. производство кристаллов для КМД-2 завершается! Красноярск и Новосибирск произвели примерно равные количества кристаллов. На рис. 6 показано, как выглядели отдельные кристаллы ВГО и блоки, использовавшиеся для сборки торцевого калориметра.

В 1994 г. калориметр был установлен в детектор в полном объеме. Работами руководил В.П. Смахтин и практически с самого начала актив-



**Рис. 6.** Отдельные кристаллы германата висмута и их сборки в блоки торцевого калориметра детектора КМД-2

ное участие во всех делах принимал Д.Н. Григорьев. В последующем в команду влились (в хронологическом порядке) Ю.В. Юдин, Р.Р. Ахметшин и В.Ф. Казанин. Неоценимый вклад в создание торцевого калориметра внес целый ряд сотрудников ИЯФ СО РАН, ИНХ СО РАН и других организаций. Особо надо отметить постоянный интерес и внимание к работе Л.М. Баркова. Его участие позволило избежать массы ошибок и найти кратчайшие пути к цели.

Торцевой калориметр состоял из 680 кристаллов и покрывал полярные углы от  $16^\circ$  до  $49^\circ$  и от  $131^\circ$  до  $164^\circ$ , соответствующий полный телесный угол равен  $0,3 \times 4\pi$ . Кристаллы имели форму прямоугольного параллелепипеда размером  $25 \times 25 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Сцинтилляционный свет регистрировался вакуумными фототриодами, сигнал с которых поступал на зарядочувствительные, а затем формирующие усилители. Средний энергетический эквивалент шумов в торцевом калориметре составил 0,9 МэВ. Сформированные и усиленные сигналы поступают в триггер и на вход амплитудно-цифровых преобразователей. Энергетическое разрешение калориметра менялось от 8 до 4% при изменении энергии фотонов от 100 до 700 МэВ, при этом координатное разрешение в плоскости, поперечной оси пучков, составило от 6 до 3,5 мм.

Мюонная система детектора КМД-2 состояла из цилиндрических газонаполненных счетчиков, работающих в ограниченном стримерном режиме. Анодом каждой трубки была проволочка из золоченого молибдена диаметром 100 мкм, которая натягивалась по оси нержавеющей трубки, служащей катодом. Достоинствами таких детекторов являются простота изготовления, большая амплитуда сигнала и хорошее временное разрешение. Работы по таким детекторам были начаты в ИЯФ в середине 80-х годов Л.М. Курдадзе и М.Ю. Лельчуком. В результате развития этой методики мюонными системами на основе стримерных трубок были снабжены детекторы КМД-2, СНД и КЕДР.

Мюонная система детектора КМД-2 состояла из двух двойных слоев трубок, разделенных слоем железа толщиной 13 см, являющегося частью яра магнита. Трубки внутреннего слоя имели диаметр 20 мм, а внешний слой состоял из трубок диаметром 40 мм. Внутренний слой трубок и калориметр были разделены слоем железа толщиной 7 см. Сигналы снимались с обоих концов трубок, а продольная координата прошедшей частицы определялась по разнице времен прихода сигнала на разные концы трубки. Всего в этой системе было 768 счетчиков. В работе над этой системой активное участие принимали М.Ю. Лельчук, А.Б. Номероцкий, Д.В. Бондарев, М.А. Шубин, Е. Попков, А.В. Чегодаев, А.Н. Криницын.

Ярким примером участия в создании КМД-2 сотрудников многих лабораторий Института является разработка системы сбора данных. Она была выполнена на основе разработанного в лаб. 3 стандарта КЛЮКВА и впоследствии применялась детекторами СНД и КЕДР. Это решение было принято после тщательного анализа возможности применения электроники стандартов FASTBUS, КАМАК и VME. FASTBUS был отвергнут ввиду высокой цены, VME – из-за малых размеров печатных плат, а КАМАК –

из-за медленной магистрали крейта. Общим недостатком этих стандартов была необходимость размещения всех разъемов (кроме магистральных) на передней панели блоков (разъемы информационных кабелей, кабелей первичного и вторичного триггеров и т.п.), что существенно усложняло эксплуатацию электроники и снижало ее надежность. Разработанный в ИЯФ стандарт КЛЮКВА этих недостатков не имел.

ССД КЛЮКВА была изготовлена в мастерских ИЯФ. Механика стоек и крейтов была произведена по чертежам, разработанным в НКО ИЯФ, на новосибирском заводе «Эталон». ССД была введена в эксплуатацию в конце восьмидесятых и до сих пор работает на детекторах КЕДР и СНД.

Идеи и структуру КЛЮКВЫ предложили и разработали сотрудники с. 3-13 С.Е. Бару и Г.А. Савинов. Они же спроектировали центральные узлы КЛЮКВЫ (чтение, синхронизация, триггеры), сервисные блоки крейтов (процессор вывода, блок обмена, интерфейсы первичного и вторичного триггеров, магистраль крейта), а также несколько типов информационных плат. В дальнейшем к разработке блоков ПТ, ВТ, новых ИП, систем питания подключились другие сотрудники лаб. 3 и лаб. 6. В создании, запуске и эксплуатации КЛЮКВЫ принимали участие десятки научных сотрудников ИЯФ: В.М. Аульченко, В.И. Тельнов, А.А. Талышев, В.М. Титов, Б.О. Байбусинов, Ю.В. Усов (перечислить всех физиков, работающих на КЛЮКВЕ, трудно); инженеров: О.Б. Лазаренко, Л.А. Леонтьев, Э.Л. Неханевич, Л.И. Шаманаева, В.Д. Кутовенко, Ю.А. Евтушенко, В.М. Боровиков, И.А. Гусев; техников: Т.М. Новикова, Д.А. Федоров; лаборантов: Р.А. Сивцов, Г.В. Щенникова; механиков: Б.И. Пронин, В.Г. Округко, А.Ф. Серых; радиомонтажников: П.П. Кругликов, В.Е. Еремин, В.В. Немкин, А.А. Брагин; конструкторов: Г.М. Колачев, В.Г. Бирюков.

Непростой задачей оказалось построение компьютерной системы детектора КМД-2. У разработчиков не было достаточного опыта – новый детектор требовал гораздо более сложной системы, чем та, что использовалась на детекторе КМД. Кроме того, во время эксплуатации КМД-2 одна за другой шли революции в компьютерных технологиях как в глобальном, так и особенно в локальном масштабах. Первоначальный вариант системы сбора данных был создан под руководством А.И. Шехтмана к началу набора данных в 1991 году. На тот момент в Институте были доступны только устаревшие советские компьютеры, что и определило схему реализации и возможности системы. Первый же опыт набора данных показал, что КМД-2 требует использования современной компьютерной техники и программного обеспечения. Постепенное обновление системы продолжалось до 1998 года, т.е. практически в течение всего срока работы. За это время, непрерывно поддерживаясь в рабочем состоянии, система кардинально изменилась. На каком-то этапе базу online-системы детектора составили сервер и станции фирмы DEC. Важную роль сыграла разработка адаптера КАМАК для сервера VAX/VMS, выполненная под руководством А.Н. Путьмакова и В.Ш. Банзарова Антоном Маглели. Произошло полное обновление программного обеспечения. Основные работы по постепенному обновлению системы были выполнены тандемом из опытного сотрудника А.Г. Шамова, автора

базового программного обеспечения новой системы XONLINE, и аспиранта И.Б. Логашенко.

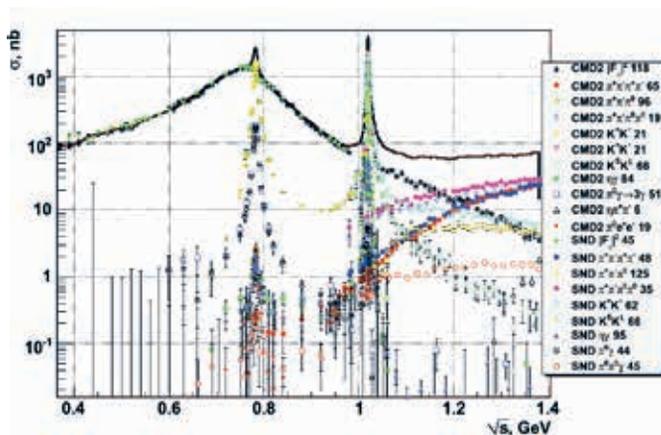
Параллельно создавалась и система обработки данных. Во времена детектора КМД обработка данных производилась централизованно, на больших ЕС ЭВМ, установленных на ВЦ института. В девяностые годы такая модель работать перестала – обработка данных переместилась на персональные компьютеры. В создание кластера персональных компьютеров для обработки данных эксперимента КМД-2 большой вклад внес В.Ш. Банзаров, а программное обеспечение обработки данных было создано главным образом А.В. Максимовым, Д.В. Черняком, В.С. Мони-чем, Н.И. Роотом.

Стоит отметить одну интересную страницу развития системы сбора данных – процессор АП-32. Одна из проблем в начальные годы работы была связана с созданием третичного триггера, необходимого для подавления фона, оперативного измерения светимости и контроля качества данных. Существующая компьютерная техника не обладала производительностью, необходимой для выполнения требуемого объема вычислений в режиме реального времени. Группа под руководством Г.А. Аксенова в составе Ю.И. Мерзлякова, А.Г. Чертовских и В.Я. Сазанского разработала к тому времени оригинальный быстродействующий RISC процессор АП-32, сопутствующее программное обеспечение и аппаратуру связи. Производительность процессора значительно превышала производительность доступных на тот момент компьютеров, однако это был уникальный образец, не предназначенный для серийного производства. К 1993 году эта разработка была полностью интегрирована в систему сбора данных детектора и успешно проработала до конца 1996 года, пока не была заменена появившимся более производительным серийным компьютером VAX Station.

Как видно из предыдущего рассказа, в создании детектора и проведении экспериментов принимали активное участие лучшие сотрудники всего института. Только благодаря их помощи проект оказался успешным. Следует отметить, что эксперимент КМД-2 был выполнен международной коллаборацией, в разное время заметный вклад в материальное обеспечение работ и обработку данных внесли наши коллеги из США и Европы – Vernon Hughes, Bill Worstell, Julia Thompson, Doug Brown, Craig Valine, Arie Baratt и другие.

Набор физической информации в экспериментах с детектором КМД-2 начался в 1992 году, а последний заход был записан 26 июня 2000 года. Обработка данных принесла много интересных результатов – веским подтверждением этому служат 15 кандидатских и 5 докторских диссертаций, защищенных по результатам анализа. На рис. 7 приведены результаты измерения различных каналов электрон-позитронной аннигиляции в адроны, полученные детекторами КМД-2 и СНД.

Как видно из рисунка, диапазон изменения измеренных сечений составляет пять порядков! Необходимо отметить, что все сечения были измерены с рекордно низкой систематической ошибкой. В частности, для процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ , вносящего наибольший вклад в адронную по-



**Рис. 7.** Основные результаты экспериментов с детекторами КМД-2 и СНД по измерению сечений электрон-позитронной аннигиляции в адроны

ляризацию вакуума, в области до 1 ГэВ в с.ц.м. она составляла всего 0,6% и не превышала 4% при максимальной энергии ВЭПП-2М.

Ряд экспериментов был посвящен поискам редких распадов векторных мезонов и изучению динамики промежуточных состояний в процессах с множественным рождением адронов. Здесь стоит отметить первое наблюдение процесса  $\phi \rightarrow \eta' \gamma$  с последующей цепочкой распадов  $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ ,  $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ . Впоследствии вероятность этого распада, которая оказалась равной  $5 \times 10^{-5}$ , была уточнена благодаря, с одной стороны, увеличенному объему экспериментальных данных, а с другой, добавлению в анализ каналов распада  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ .

Еще одним интересным результатом явилось первое прямое измерение вероятности полуплептонного распада короткоживущего каона, которая оказалась равной  $7,2 \times 10^{-4}$ . Чтобы получить этот результат, необходимо было из шести миллионов зарегистрированных событий рождения пары нейтральных каонов выделить события искомого процесса, число которых оказалось значительно меньше сотни. Впоследствии эта вероятность со значительно лучшей точностью была измерена в эксперименте KLOE в Италии, подтвердившем правильность измерения КМД-2.

Исключительно интересные результаты были получены при анализе динамики рождения многоадронных состояний. В частности, впервые было показано, что в реакции рождения четырех пионов доминируют промежуточные состояния  $\omega \pi^0$  и  $a_1 \pi$ , а целый ряд других возможных промежуточных состояний с той точностью, которую обеспечили измерения, не реализуется. Не менее значимыми стали результаты измерения вероятности распада  $\phi \rightarrow f_0 \gamma$ , результаты которого не противоречат интерпретации скалярного мезона  $f_0$  как частицы, состоящей из четырех кварков.

В формате нашей книги невозможно даже вскользь упомянуть все результаты, коллаборацией опубликовано более полусотни статей, лучше всего, если заинтересованный читатель обратится прямо к ним.

Цикл экспериментов с КМД-2 завершился в 2000 году, и немедленно вслед за остановкой команда начала реализацию давно вынашиваемых планов строительства нового детектора – КМД-3, перенявшего все лучшее, что было накоплено в процессе работы, и шагнувшего далеко вперед своего предшественника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R.R. Akhmetshin et al., Study of dynamics of  $\varphi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  decay with CMD-2 detector. Phys.Lett. B434(1998)426-436.
2. R.R. Akhmetshin et al.,  $a(1)(1260)$  pi dominance in the process  $e^+ e^- \rightarrow 4\pi$  at energies 1.05 GeV  $\div$  1.38 GeV. Phys.Lett. B466(1999)392-402.
3. R.R. Akhmetshin et al., First observation of the  $\varphi \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$  decay. Phys.Lett. B462(1999)371.
4. R.R. Akhmetshin et al., Measurement of  $\varphi$  meson parameters in  $K^0(L) K^0(S)$  decay mode with CMD-2. Phys.Lett. B466(1999)385, Erratum-ibid. B508(2001)217-218.
5. R.R. Akhmetshin et al., Cross-section of the reaction  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$  below 1 GeV at CMD-2. Phys.Lett. B475(2000)190-197.
6. R.R. Akhmetshin et al., Measurement of  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$  cross section with CMD-2 around  $\rho$  meson. Phys.Lett. B527(2002)161-172.
7. R.R. Akhmetshin et al., Study of the process  $e^+ e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  in c.m. energy range 920 MeV  $\div$  1380 MeV at CMD-2. Phys.Lett. B562(2003)173-181.
8. R.R. Akhmetshin et al., Reanalysis of hadronic cross-section measurements at CMD-2. Phys.Lett. B578 (2004) 285-289.
9. В.М. Аульченко и др. Измерение формфактора пиона в диапазоне энергий 1,04-1,38 ГэВ с детектором КМД-2. Письма в ЖЭТФ 82 (2005) 841-845.
10. R.R. Akhmetshin et al., High-statistics measurement of the pion form factor in the  $\rho$  meson energy range with the CMD-2 detector. Phys. Lett. B648(2007)28-38.
11. Р.Р. Ахметшин и др. Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  на детекторе КМД-2 в диапазоне энергий 370-520 МэВ. Письма в ЖЭТФ 84 (2006) 491-495.
12. Э.В. Анашкин и др. Криогенный магнитный детектор КМД-2. ПТЭ 6 (2006) 63-80.

## КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Александр Степанович Кузьмин. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow 3\pi$  в области энергий  $\varphi$ -мезона с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1998.
2. Татьяна Аркадьевна Пурлац. Изучение радиационных распадов  $\varphi \rightarrow \eta\gamma$ ,  $\varphi \rightarrow \eta'\gamma$  с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.
3. Эдуард Витальевич Анашкин. Прецизионное измерение параметров  $\omega$ -мезона с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.
4. Иван Борисович Логашенко. Прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в диапазоне энергий 0,61-0,96 ГэВ с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.
5. Дмитрий Николаевич Григорьев. Торцевой BGO калориметр детектора КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.
6. Николай Иванович Роот. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow 4\pi$  в диапазо-

не энергий 1,05 – 1,38 ГэВ с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.

7. Александр Иванович Суханов. Изучение редких многочастичных процессов в диапазоне энергий 0,6 – 1,06 ГэВ с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

8. Николай Иванович Габышев. Изучение конверсионных распадов в области энергий  $\phi$  мезона с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н., ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

9. Петр Анатольевич Лукин. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$  в области энергий 1,0 – 1,38 ГэВ с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2001 г.

10. Павел Петрович Кроковный. Изучение процессов  $\phi \rightarrow \eta\gamma$  и  $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2003 г.

11. Василий Федорович Казанин. Изучение распадов  $\rho$ - и  $\omega$ -мезонов в псевдоскалярный мезон и  $e^+e^-$  -пару с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2005 г.

12. Алексей Леонидович Сибиданов. Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  на детекторе КМД-2 в диапазоне энергий 370 – 520 МэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2008 г.

13. Федор Владимирович Игнатов. Измерение формфактора пиона в диапазоне энергий 1,04-1,38 ГэВ с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2008 г.

14. Денис Александрович Епифанов. Изучение реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области  $\phi$ -мезонного резонанса с детектором КМД-2. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2009 г.

15. Александр Сергеевич Попов. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^0$  с детектором КМД. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2009 г.

16. Douglas Hodsdon Brown. Measurement of Three Pion Production in Electron-Positron Annihilations for the Hadronic Contribution to the Anomalous Magnetic Moment of the Muon (in English). Philosophy Doctor degree. ИЯФ, Новосибирск, 1998 г.

#### ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Евгений Петрович Солодов. Редкие процессы в распадах  $\phi$ -мезона. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.

2. Борис Исаакович Хазин. Прецизионные измерения сечений  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

3. Семен Исаакович Эйдельман.  $e^+e^-$  аннигиляция в адроны и ее приложения к физике мюона и  $\tau$ -лептона. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2003 г.

4. Борис Альбертович Шварц. Создание калориметров на основе кристаллов CsI и их применение в экспериментах на встречных  $e^+e^-$  пучках. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2004 г.

5. Геннадий Васильевич Федотович. Радиационные поправки к процессам  $e^+e^-$  аннигиляции и прецизионные измерения сечений рождений адронов. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2007 г.

## ГЛАВА 3

В.И. Тельнов

## ДЕТЕКТОР МД-1 НА ВЭПП-4

Ниже пойдет речь о детекторе МД-1, который работал на  $e^+e^-$  накопителе ВЭПП-4 в области энергий  $\Upsilon$ - мезонов ( $2E=7,2-10,4$  ГэВ) с 1981-го по 1985 год.

## 1. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОЕКТА МД-1

В 1967-1970 годах на ВЭПП-2 были проведены первые эксперименты на встречных  $e^+e^-$  пучках в области энергий до  $2E=1,3$  ГэВ. Одним из ярких результатов было обнаружение рождения электрон-позитронных пар при столкновении виртуальных (эквивалентных) фотонов. Было осознано, что такие двухфотонные процессы рождения частиц ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^- X$ ) будут доминировать при более высоких энергиях, поскольку их сечения растут, в то время как сечения аннигиляционных процессов ( $e^+e^- \rightarrow X$ ) быстро падают с ростом энергии ввиду формфакторов частиц (тогда еще не знали про кварки).

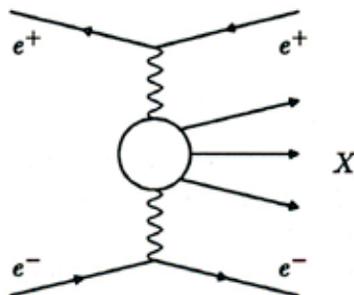


Рис. 1. Диаграмма двухфотонного рождения частиц в  $e^+e^-$  столкновении

В этой ситуации возникло естественное предложение сделать детектор, специально приспособленный к изучению двухфотонных процессов. Возглавить эти работы было поручено Онучину Алексею Павловичу.



Рис. 2. Алексей Павлович Онучин, 1970 г.

Первоначально предполагалось, что этот детектор будет работать на  $e^+e^-$  накопителе ВЭПП-3 с энергией  $2E=4$  ГэВ, который вступил в строй в 1972 году. Для первой очереди экспериментов был подготовлен детектор с оптическим съемом информации (рук. В.Е. Балакин). Новый же детектор с магнитным полем и измерением импульсов частиц МД-1 должен был прийти ему на смену. Работы в этом направлении были начаты в 1970 г. Однако дальше стали происходить довольно драматические события. ВЭПП-3 работал и успешно использовался как источник синхротронного излучения, но для экспериментов со встречными пучками катастрофически не хватало позитронов. Физики-экспериментаторы держали детектор наготове, но приемлемой светимости не было. Дело в том, что исходно ВЭПП-3 сооружался как бустер для протон-антипротонного коллайдера, где позитроны не требовались. После его перепрофилирования в 1969 году на  $e^+e^-$  программу просто не хватило времени для создания нормального позитронного источника. Для этого требовался линейный ускоритель, но у нас не было для него источников СВЧ, клистронов. Эта проблема была решена только после создания в ИЯФ источника СВЧ нового типа – гирокона.

В ноябре 1974 года две американские группы, работающие на  $e^+e^-$  накопителе SPEAR (SLAC) и на протонном ускорителе в BNL, одновременно объявили об открытии  $J/\psi$  – частиц с массой 3090 МэВ. Это явилось началом новой, кварковой, эры в физике элементарных частиц. Были открыты частицы, содержащие с-кварки ( $\psi$ -мезоны,  $D$ -мезоны и др.), а через полгода на SPEAR был открыт  $\tau$ -лептон. Это было, конечно, большим невезением для ИЯФ, поскольку ВЭПП-3 был построен на два года раньше накопителя SPEAR. Утешало только то, что в целом работали в правильном направлении. В начале 1975 года в Гамбурге заработал  $e^+e^-$  коллайдер DORIS на энергию до  $2E=7$  ГэВ.

В сложившейся ситуации директор института Г.И. Будкер принял решение отказаться от  $e^+e^-$  экспериментов на ВЭПП-3 и перенести программу детектора МД-1 на коллайдер ВЭПП-4 с энергией до  $2E=12$  ГэВ, который исходно проектировался как протон-антипротонный коллайдер ВАПП на энергию  $2 \times 23$  ГэВ. Сооружение туннеля с магнитами было уже на завершающей стадии. Таким образом, с 1975 г. проект детектора МД-1 переместился на ВЭПП-4. Цель эксперимента – изучение многоадронных и двухфотонных процессов в неисследованной области больших энергий.

## 2. КОНЦЕПЦИЯ ДЕТЕКТОРА

В основу концепции детектора МД-1 (~1971 г) было положено наличие в детекторе магнитного поля, перпендикулярного плоскости орбиты (обычно в детекторах на коллайдерах используются соленоиды с продольным полем). Такое нестандартное решение мотивировалось желанием лучше регистрировать двухфотонные события, которые происходят в основном при столкновении двух виртуальных фотонов с очень разной энергией, а потому продукты реакции летят вперед. Поперечное поле детектора совместно с доворотными магнитами, расположенными

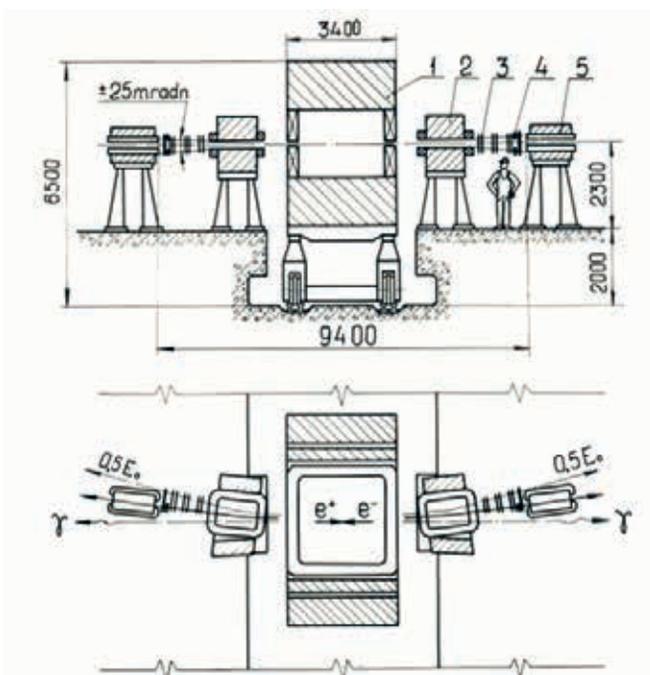
между детектором и фокусирующими квадрупольями, позволяли также регистрировать конечные электроны и позитроны в двухфотонных процессах: за счет меньшей энергии они выворачивались в систему регистрации «рассеянных электронов». Данная схема детектора, предложенная зав. лаб. № 3 В.А. Сидоровым и А.П. Онучиным, выглядела довольно логичной и далее почти не дискутировалась.

**Рис. 3.** Схема места встречи. В центре детектор МД-1, далее идут «доворотные» магниты, система регистрации рассеянных электронов, квадрупольные линзы

Однако такая схема с поперечным полем имеет и существенные недостатки. Дело в том, что при столкновении пучков образуется много частиц с малой энергией, которые исходно летят вперед, но поперечное поле детектора выворачивает их в детектор. Поскольку все эти частицы движутся в горизонтальной плоскости, то эта проблема решается путем исключения этой области из триггера.

Другая проблема – это уменьшение светимости из-за того, что фокусирующие линзы располагаются далеко от места, и в результате получается большая бета-функция в месте встречи. Идея повышения светимости за счет малой бета-функции появилась несколько позже (на коллайдере СЕА, Кембридж).

Еще одна неожиданная проблема обнаружилась только в 1976 году, когда чертежи детектора были уже в цехе. А.Н. Скринский заинтересовался, не будет ли проблем в детекторе из-за синхротронного излучения (СИ). При низких энергиях проблем нет, поскольку мощность маленькая и СИ поглощается в вакуумной камере. Однако при энергиях  $E=4-5$  ГэВ в пучке, при которых собирались работать с МД-1, ситуация могла оказаться катастрофической. Расчеты, сделанные А.П. Онучиным и Ю.А. Тихоновым в 1977 г., показали, что прямые и рассеянные на вакуумной камере жесткие фотоны СИ могли проникать в детектор, конвертировать в фотоэлектроны в пропорциональных камерах и создавать абсолютно неприемлемую нагрузку, в тысячи раз выше допустимой. Для устранения данной проблемы потребовалось полностью исключить прямое попадание фотонов СИ на стенки вакуумной камеры внутри де-



тктора. Для этого пришлось увеличить диаметр вакуумной камеры в детекторе с 10 до 40 см. Ввиду таких больших размеров вакуумной камеры детектор стал не столь изящным, как задумывалось: ухудшилось импульсное разрешение, появилось пустое пространство выше и ниже вакуумной камеры, которое для герметичности пришлось прикрывать дополнительными детекторами.

### 3. СХЕМА ДЕТЕКТОРА МД-1

Основные системы детектора, включая калориметр, были расположены внутри магнита объемом  $10 \text{ м}^3$  с поперечным орбите (вертикальным) полем, которое было пропорционально энергии пучков и составляло  $12 \text{ кГс}$  при  $E=5 \text{ ГэВ}$ . Для регистрации частиц использовались четыре системы многопроволочных пропорциональных камер (МППК): координатные камеры, ливнево-пробежные камеры, мюонные камеры и система регистрации рассеянных электронов – всего более 300 камер размером до двух метров, содержащих более 0,5 миллиона натянутых проволочек и примерно 16 тысяч каналов электроники. Детектор включал 8 газовых (высокого давления) черенковских счетчиков и 24 сцинтилляционных счетчика.

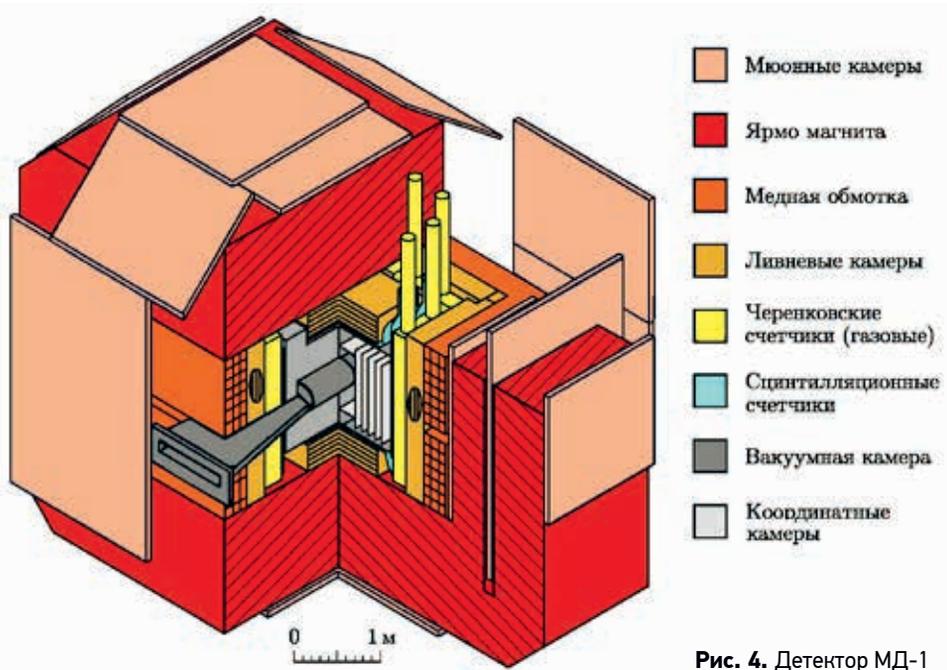


Рис. 4. Детектор МД-1

По пути из места встречи частицы пересекали последовательно 9 слоев координатных камер, сцинтилляционные счетчики, черенковские счетчики, 10 слоев ливнево-пробежных камер. Далее, уже за обмоткой магнита и внутри и за ярмом располагались 3 слоя мюонных камер. В 3,5 метра от места встречи, рядом с орбитой пучка, располагалась

система регистрации рассеянных электронов, которая регистрировала электроны, потерявшие в месте встречи энергию от 10 до 50%.

С точки зрения методики регистрации частиц новым элементом являлись многопроволочные пропорциональные камеры, предложенные Ж. Шарпаком (ЦЕРН) в 1968 году (за что впоследствии ему была присуждена Нобелевская премия). До этого повсеместно использовались искровые камеры.

Пропорциональные счетчики были известны еще с 1930-х годов. Ж. Шарпак предложил многопроволочную камеру, где тонкие сигнальные (анодные) проволочки, натянутые с шагом 2 мм, располагались между двумя проволочными (катодными) плоскостями. Каждая проволочка работала как отдельный детектор. Это было удивительно, так как можно было ожидать, что в такой конструкции из-за емкостной наводки на соседние проволочки будет срабатывать целая группа проволочек. Однако кроме емкостной наводки имеется еще наведенный сигнал противоположной полярности, связанный с отходом ионов от сигнальной проволочки. В результате суммарная наводка имеет противоположный знак, и срабатывают дискриминаторы только на проволочках, на которые пришла ионизация. В отличие от искровых камер, для пропорциональных камер не требуется внешний запуск, нет мертвого времени, однако для них требуются усилитель, дискриминатор и запоминающее устройство на каждую проволочку. Такие возможности в мире появились как раз в конце 1960-х годов.

Координатная система МД-1 состояла из 38 пропорциональных камер с шагом 2 мм и размером до  $0,9 \times 0,9 \text{ м}^2$ , с суммарным числом каналов электроники около 15 000. Один канал достаточно сложной электроники должен был уместиться на 2 погонных мм. В СССР в то время ничего подобного не было, вся электроника делалась из отдельных элементов, размер одного транзистора составлял около 1 см.

Ливнево-пробежная (ЛПК) система состояла из 14 отдельных блоков размером до  $180 \times 85 \times 25 \text{ см}$ , каждый из которых представлял собой «сэндвич» из 10 слоев пропорциональных камер с шагом 4 мм, чередующихся с плоскостями из нержавеющей стали толщиной 13 мм. Каждый слой имел 16 каналов электроники для координатных измерений и один линейный выход для измерения амплитуды (ионизации в камере). Задача ЛПК состояла в регистрации и измерении энергий фотонов, а также разделении  $\pi$ -мезонов и мюонов по их ионизационным пробегам.

Система мюонных камер (МК) состояла из 60 блоков размером до  $2,3 \text{ м}^2$ , в каждом по две плоскости МППК с шагом 4 мм с взаимно-перпендикулярным направлением сигнальных проволочек, 16 координатных каналов на плоскость. Их задача состояла в идентификации мюонов по их пробегам. Они располагались за обмоткой, в ярме и за ярмом магнита.

В системе регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) также использовались МППК, но сигнал снимался с катодных плоскостей с помощью кабельных линий задержек, что обеспечивало более высокое пространственное разрешение.

Коллайдеры и детекторы

Непосредственно за координатными камерами располагались 24 сцинтилляционных счетчика размером  $0,6 \times 0,6 \text{ м}^2$ , которые служили для измерения ионизации, времени пролета и участвовали в триггере. Сигнал со счетчиков снимался с помощью фотоумножителей, расположенных внутри ярма. Основная проблема здесь состояла в экранировании магнитного поля более чем в  $10^4$  раз.

За сцинтилляционными счетчиками были расположены 8 газовых пороговых черенковских счетчиков, наполненных этиленом под давлением 25 атмосфер ( $n=1,02$ ,  $\gamma_{\text{пор}}=5$ ). Они служили для разделения  $e/\mu$  до 0,5 ГэВ,  $e/\pi$  до 0,7 ГэВ,  $\pi/K$  от 0,7 до 2,5 ГэВ. Каждый счетчик просматривался через кварцевые окна четырьмя ФЭУ. Здесь тоже была проблема с экранировкой ФЭУ и прочностью всей конструкции.

Опыт работы со сцинтилляционными и черенковскими счетчиками у А.П. Онучина уже имелся, однако планы по созданию 4 систем, базирующихся на методике МППК, с 0,5 млн анодных и катодных проволочек были очень смелыми. Огромный магнит также был непростым делом. Обсуждался вариант сверхпроводящего магнита, но главный в ИЯФе специалист по магнитам Л.М. Барков сказал, что пока это не представляется возможным. А.П. Онучин вспоминает, что когда они с В.А. Сидоровым пришли с проектом МД-1 к Будкеру, тот спросил, достаточно ли нового заложено в этот детектор, на что Сидоров ответил, что, пожалуй, даже слишком много нового, и он опасается за осуществимость проекта.

#### 4. РАБОТА НАД ДЕТЕКТОРОМ

В 1970 г. А.П. Онучин начал формировать команду. На этот момент в нее входили только что закончивший университет Володя Грошев и студент 4-го курса НГУ Валерий Тельнов. В 1971 г. Алексей Павлович, читавший лекции в НЭТИ, пригласил студента 5-го курса Юру Тихонова. В 1973 г. в команду МД-1 пришел Толя Воробьев, закончивший НГУ в 1971 г. В таком составе – один опытный физик и четверо вчерашних студентов – начали работу над созданием универсального магнитного детектора, который и сейчас, через 40 лет, выглядит вполне современно (не считая компьютеров).

Позже команда МД-1 пополнилась ценными кадрами – Сашей Бондарем и Андреем Шамовым, которые закончили НГУ в 1977 г. и перед этим уже участвовали в работах по МД-1, будучи студентами. В 1977 году в лабораторию пришли также Володя Панин, работавший до этого с жидкими криогенными детекторами у Е.А. Кушниренко, и Валерий Тажурский, занимавшийся ранее моделированием в секторе Б.В. Чирикова.

Прежде чем переходить к подробностям работы над детектором, хочу описать обстановку в институте и лаборатории № 3, возглавляемой Вениамином Александровичем Сидоровым. Я бы сказал, что условия для работы были практически идеальные:

- каждый научный сотрудник, даже совсем молодой, имел лаборанта;
- в лаборатории имелась мощная группа электронщиков, которые создали полную линейку электроники (усилители, дискриминаторы,

формирователи, схемы совпадений, преобразователи время-амплитуда, линии задержки и т.д.), имелись осциллографы и амплитудные анализаторы – все это позволяло проводить практически любые методические работы без компьютеров (которые тогда были только в вычислительном центре ИЯФ);

- имелся мощный цех и экспресс-мастерская, где заказы, нарисованные от руки, выполнялись за несколько дней; почти никогда не возникало проблем с отсутствием необходимого материала; в цехе выполнялись какие-то контрактные работы, однако это практически не отражалось на прохождении заказов из лабораторий;

- в распоряжении лаб. № 3 имелось конструкторское бюро (рук. Г.М. Колачев);

- нормально работал отдел снабжения, не требовалось проведение торгов, не возникало проблем с деньгами (были, но мы этого не замечали);

- никакой бюрократии, грантов не писали, финансовый отдел института состоял из одного человека, никто не отвлекал научных сотрудников от дел.

В 1979 г. я побывал в одной из лучших лабораторий мира – SLAC, в группе, только что получившей Нобелевскую премию, и обнаружил, что условия работы у нас были лучше! Замечу, что такая обстановка сложилась не сама по себе, ее создал заведующий лабораторией № 3 В.А. Сидоров. В свою очередь А.П. Онучин с самого начала работ над проектом МД-1 фактически стал основной движущей силой лаборатории, что вывело наш институт на качественно новый уровень по методике регистрации частиц и создания детекторов для встречных пучков.

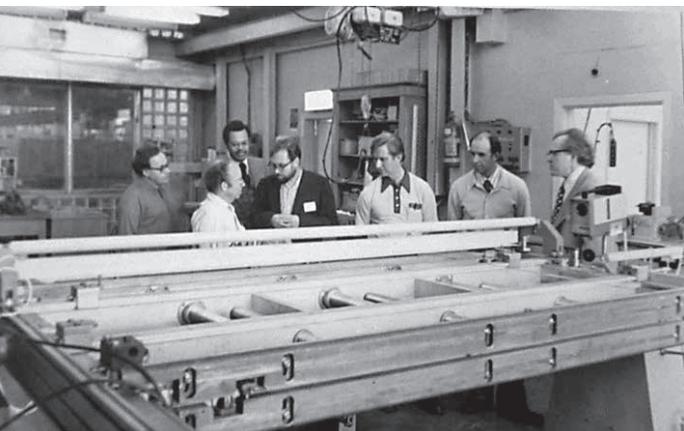
## 5. МНОГОВОЛОЧНЫЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ

Как было уже сказано, основой детектора МД-1 были МППК, предложенные Ж. Шарпаком в 1968 г. У нас ими начали заниматься в 1970 г., как раз когда я пришел на практику в ИЯФ. В. Грошеву было поручено заниматься координатными камерами, а мне – ливнево-пробежными. Через год к этим работам присоединился Ю. Тихонов, ему достались мюонные камеры. Координатные камеры должны были регистрировать координаты частиц с высокой эффективностью и точностью, определяемой шагом между анодными проволочками, равным 2 мм. В ливнево-пробежных камерах высокая точность координат была не нужна (сигнал снимался с полос шириной 5-10 см), но требовалось еще измерение амплитуды сигнала, которая пропорциональна ионизации. Мюонные камеры должны были только регистрировать факт пролета частицы (полосы по ~10 см).

Сразу возникли следующие вопросы: какого диаметра лучше взять анодные проволочки, какое должно быть их натяжение? Этот вопрос был очень существенный, поскольку в МД-1 предполагалось иметь камеры больших размеров, где проволочки просто могли сместиться из-за электростатических сил. Вспоминается, Г.Д. Минаков, тогда еще лаборант, соорудил камеру длиной 2 м и вместе с А.П. Онучиным изучал, как

смещение проволочек зависит от напряжения на камере, натяжения и шага проволочек. Меня это занятие несколько удивило, поскольку это явно можно было рассчитать. Через несколько дней я принес формулу. Оказалось, что неустойчивость анодных проволочек имеет пороговое поведение: до определенного напряжения на камере они стоят на месте, а затем резко расходятся. Расчет натяжения проволочек в МППК, сделанный на 4-м курсе, был затем опубликован в журнале ПТЭ. Изучая, как рабочее напряжение на камере зависит от диаметра проволочек и соотнося это с требуемым натяжением и прочностью проволочек, мы пришли к выводу, что диаметр 28 мкм является оптимальным для анодных проволочек, сделанных из позолоченного вольфрама. Для катодных плоскостей были выбраны 100 мкм проволочки из бериллиевой бронзы, которые натягивались с шагом 1 мм. Всего в детекторе МД-1 было 70 тыс. анодных проволочек и 300 тыс. катодных проволочек.

## 6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР

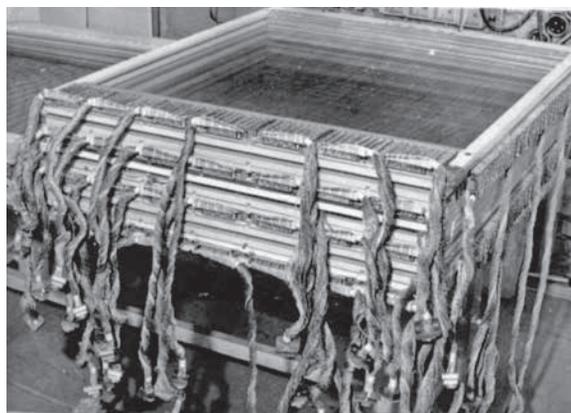


**Рис. 5.** Гости ИЯФ осматривают станок для натяжения проволочек пропорциональных камер. Слева направо: В.Н. Байер, В. Пановский (СЛАК), представитель DOE (США), А.П. Онучин, Б. Гиттельман (США), В.М. Ураев, В.А. Сидоров

Пропорциональные камеры представляют собой рамку, на которой расположены с нужным шагом и натяжением анодные и катодные проволочки. Для намотки тестовых камер использовалось простое приспособление, состоящее из двух стержней с нарезанной с нужным шагом резьбой. Однако такой способ явно не подходил для изготовления более 300 больших камер с 0,5 млн. проволочек. Большой вклад в решение этой проблемы внес Г.Д. Минаков, создавший участок для производства больших МППК. Намотка производилась на автоматизированном станке, работающем по принципу вращающейся рамы, к которой прикреплялись камеры. После намотки с нужным шагом и натяжением проволочки припаивались к медным ламелям. Затем распаивалась электроника. После этого камеры отмывались от флюса и других загрязнений с помощью ультразвука в специальной ванне с горячей дистиллированной водой, после чего камеры высушивались горячим воздухом. Готовые камеры собирались и испытывались в условно «чистой комнате». Намоточный участок был местом посещения высоких гостей (см. фото, рис. 5).

## 7. КООРДИНАТНЫЕ КАМЕРЫ

При разработке координатных камер основными проблемами были технология изготовления, подбор газовой смеси, а главное – разработка и изготовление усилителей-формирователей, которые должны были располагаться на камере с шагом 2 мм. Семен Бару занимался разработкой камерной электроники, а Володя Грошев измерял, как эффективность камеры зависит от напряжения на камере. Критерием было наличие широкого плато с эффективностью, близкой к 100%. В результате совместно с Дубной были разработаны и изготовлены на подмосковном заводе гибридные усилители-формирователи, которых в детекторе МД-1 требовалось около 20 тыс. штук. Тогда еще не было твердотельной электроники, «гибридный» – это означает, что в общем герметичном корпусе на подложке расположены распаянные вручную маленькие (голые) транзисторы размером порядка одного миллиметра. Стопка координатных камер с распаянной электроникой (7 блоков по 64 канала на камеру) показана на фотографии, рис. 6.



**Рис. 6.** Слева: изобретатель МППК, нобелевский лауреат Ж. Шарпак и С.Е. Бару. Справа: координатные камеры

Вспоминается неожиданная проблема: после мойки-сушки камер электроника перестала работать. Хотя усилители-формирователи были сделаны герметично, но оказалось, что герметичность терялась при припаивании «земли» к корпусу гибридной схемы. Решение было найдено. Каждый готовый блок электроники на 64 канала перед постановкой на камеру покрывался лаком, что и обеспечивало герметизацию. Другая серьезная проблема возникла, когда координатные камеры уже поставили в детектор. Сигналы с камер выводились с помощью 16 тысяч витых пар, собранных в жгуты. Внутри этих жгутов также подавалось питание. Когда все включили, то камеры стали генерировать из-за наводки выходных (логических) сигналов на питание. Проблема была решена уменьшением амплитуд выходных (логических) сигналов путем изменения питающих напряжений.

## 8. ЛИВНЕВО-ПРОБЕЖНЫЕ КАМЕРЫ (ЛПК)

В ЛПК анодные проволочки имели шаг 4 мм, а катодными плоскостями являлись пластины из нержавеющей стали толщиной 13 мм, всего в одном блоке было 10 таких слоев. Для обеспечения равномерности амплитуд сигналов по площади пластины зазор между пластинами должен был выдерживаться с точностью лучше 300 мкм. Это была очень большая проблема. Пластины изготавливались на строгальном станке, в результате чего образовывался наклеп. Его снимали путем отжига в больших печах, при этом стопка пластин зажималась между двумя очень толстыми и ровными пластинами. Исходно в ЛПК предполагалась толщина пластин 10 мм, но сделать их с нужной точностью не удалось. Проблема была решена путем увеличения толщины до 13 мм. Остаточная неоднородность коэффициента усиления поправлялась путем калибровки на космике.

При разработке ливнево-пробежных камер была впервые осознана и сформулирована проблема флуктуаций ионизационных потерь в тонких слоях (1974 г.). Работая с прототипом камеры, я измерял спектры ионизационных потерь от источника  $\text{Si}^{90}$  на различных газах. Ширина спектров на полувысоте составляла около 70–100%. В то время считалось, что флуктуации ионизационных потерь описываются распределением Ландау с шириной на полувысоте около 30%, слабо (логарифмически) зависящей от толщины. Я в этом усомнился, поскольку есть же еще флуктуации числа первичных столкновений. Число первичных столкновений на 1 см в Ag составляет около 30, а в He всего 6, только за счет этого будет ширина 45% и 95% соответственно. Алексей Павлович согласился, что нужно изучить это явление. Мы провели измерения флуктуаций для разных газов и толщин и написали статью в NIM. Статья вызвала большой резонанс, после чего появилось много экспериментальных и теоретических работ на эту тему.

Обычно пропорциональные и дрейфовые камеры работают на продув. В детекторе МД-1 координатные и ливнево-пробежные камеры просто откачивались, заполнялись нужной смесью, закрывались вентилем и так нормально работали целый год. Уплотнение осуществлялось обычной вакуумной резиной. Однажды один из блоков ЛПК, установленный уже в детекторе, оказался недостаточно герметичен. Чтобы не разбирать детектор, к трубе, подводящей газ к этому блоку, подсоединили резиновую подушку и создали небольшое избыточное давление, так что качество газа в объеме практически не портилось месяцами. Когда подушка «худела», добавляли немного газа.

## 9. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ И ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ

Этими двумя системами занимался А.И. Воробьев. Серьезной проблемой для обеих систем была магнитная экранировка фотоумножителей. Применялись двухслойные экраны, сделанные из железа с малой и большой магнитной проницаемостью. Хотя имелся некоторый расчет,

уверенности не было. Для проверки был изготовлен магнит размером около 35 см, полностью подобный магниту МД-1, со всеми отверстиями для ФЭУ, где были измерены поля. Несмотря на маленький размер, этот магнит потреблял мощность 100 кВт. Только благодаря такому непростому эксперименту был выбран окончательный вариант магнитных экранов и появилась уверенность, что все будет работать в реальном эксперименте.

Сцинтилляционные счетчики (24 шт.) были сделаны из сцинтиллятора NE-100, приобретенного для ИЯФ через ЦЕРН, и фотоумножителей 58DVP фирмы Phillips. В то время были и отечественные фотоумножители, но для хорошего дела валюту не пожалели.

Черенковские счетчики (8 шт.) наполнялись этиленом при давлении 25 атмосфер ( $n=1,02$ ,  $\gamma_{th}=5$ ). При площади счетчика 1,5 кв. м сила, действующая на крышку, составляла 400 тонн. Для обеспечения прочности конструкции крышки были соединены многочисленными прочными шпильками, покрытыми, как и стенки счетчика, белой краской. Свет из счетчиков выводился через 4 кварцевых окна диаметром 20 см, к которым снаружи прижимались фотоумножители 58DVP. Вначале хотели использовать плексигласовые окна. Гидравлическое испытание они выдержали, после чего гл. конструктор Гена Колачев обошел счетчик и даже заглянул внутрь. Через некоторое время это окно выстрелило с убойной энергией. После такого эксперимента окна стали делать из кварцевых кругов толщиной около 6 см, тщательно обработанных и уложенных в счетчики, чтобы не было условий для возникновения трещин.

## 10. ИНДУКЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Разрабатывая пропорциональные камеры для эксперимента МД-1, мы вникали во все вопросы, касающиеся этой методики, ее предельных возможностей. Так, в координатных камерах МД-1, где сигнал снимается с анодных проволочек, их пространственное разрешение определяется шагом между проволочками. Однако если измерять центр тяжести заряда, наведенного на катодную плоскость, в направлении вдоль анодной проволочки, то шаг анодных проволочек не входит в задачу. Шаг катодных проволочек, намотанных перпендикулярно анодным, также дает несущественный вклад, поскольку заряд наводится на много катодных проволочек. Мы решили изучить, а какое же пространственное разрешение можно получить в этом случае. Сигнал с катодной плоскости снимался с помощью линии задержки, где координата измерялась по разности времен прихода сигналов на концы линии задержки. Использовались различные типы линий задержек, в том числе тонкий кабель. Для перпендикулярно падающих релятивистских электронов разрешение составило 25 мкм, а для протонов 65 МэВ (накопитель НАП) – 15 мкм! Эти результаты, полученные в 1977 году, до сих пор являются рекордными. Этими исследованиями занимался я со студентом А.Е. Бондарем и А.П. Онучин. Такие индукционные камеры были использованы в эксперименте МД-1 для системы регистрации рассеянных электронов, которую воплотили в жизнь А.Е. Бондарь и В.С. Панин.

## 11. МЮОННЫЕ КАМЕРЫ

Спецификой этих пропорциональных камер были их большие размеры и количество. Конечно, все это нужно было сделать надежно. К одному каналу электроники была прицеплена довольно большая площадь камеры. Было сделано так, чтобы при случайной искре электроника не выходила из строя. Мюонные камеры были разработаны Ю.А. Тихоновым, в массовое производство и проверку большой вклад внес Сергей Клименко, проходивший до этого практику под руководством Ю.А. Тихонова.

## 12. МАГНИТ

Магнит детектора МД-1 имел внутренние размеры 2,3х2,3 м<sup>2</sup> и зазор между полюсами 1,8 м. Медная обмотка весом 40 т имела толщину 32 см. Магнитный поток замыкался 400-тонным магнитным ярмом. Максимальное поле, пропорциональное энергии пучков, составляло 16 кГс. Источником являлся мотор-генератор, который потреблял мощность до 3 мегаватт. Проект магнита был разработан в конструкторском бюро Г.М. Колачева. Катушки были изготовлены на опытном заводе СО РАН, ярмо – на заводе им. Ефремов в Новосибирске. Когда уже детектор был собран и начались эксперименты, в катушках магнита (она состояла из отдельных «блинов» толщиной по 10 см) стали происходить закоротки из-за протекания воды в спаянных стыках медных шин. Причина – брак при изготовлении. Это случилось уже при работающем детекторе. Пришлось остановиться, все разобрать, в течение нескольких месяцев в цехе ИЯФ был изготовлен полный комплект новых катушек, и эксперимент был продолжен. Всеми этими работами по магниту занимался А.И. Шушаро, перешедший к нам из плазменных лабораторий в 1976 г.

## 13. ЭЛЕКТРОНИКА, КОМПЬЮТЕРЫ

Электроника детектора была сделана группами С.Е. Бару (вся электроника МППК, считывание событий, триггер) и В.М. Аульченко (дискриминаторы сцинтилляционных и черенковских счетчиков, время-амплитудные и амплитудно-цифровые преобразователи, высоковольтные источники). Детектор работал под управлением одной машины М-6000 с оперативной памятью всего 16 К. Ее быстродействие: сложение – 5 мкс, умножение – 200 мкс, деление – 500 мкс. Загрузка программ производилась с бумажной ленты с дырочками. Эти компьютеры производились в Северодонецке на Украине.

В.А. Сидоров уделял очень большое внимание применению компьютеров в экспериментах. От него все в институте узнали слово «online». Ему удалось не только приобрести для ИЯФ большую партию компьютеров М-6000, но и переманить в ИЯФ одного из главных разработчиков этих машин Бориса Шувалова. Современный настольный РС мощнее примерно в миллион раз! Тем не менее, эта машина успешно справлялась со считыванием событий и успевала даже выполнять функции третичного триггера. Считывание производилось через крейты КА-МАК. Программы управления детектором и контроля систем детектора

были написаны А.Г. Шамовым. События передавались на вычислительный центр, располагавшийся в подвале пристройки к 1-му корпусу, записывались на магнитные ленты (бобины диаметром 40 см). Всего было записано около 3000 лент.

#### 14. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Обработка и моделирование велись на ЭВМ ЕС-1040 (1060, 1061). Борис Шувалов и Борис Сысолетин организовали терминальную сеть по всему институту на базе М-6000 с дополнительной дисковой памятью. Можно было писать программы и отправлять задания на счет. При исполнении задания компьютер запрашивал по очереди ленты, которые устанавливали операторы. В результате обработки первичных лент (этот процесс назывался «перекачка») получались ленты, которые кроме первичной информации содержали также результаты реконструкции событий (параметры найденных частиц). Результаты получали в виде больших распечаток на бумаге. ЭВМ ЕС-1061 имели быстродействие около 1 млн операций в секунду, что было недостаточно.

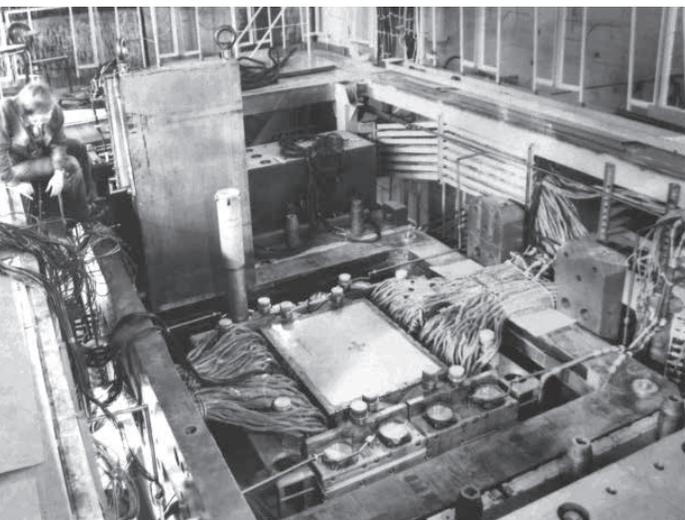
Для ускорения процесса обработки требовался дополнительный высокопроизводительный процессор, который можно было сделать из существующих электронных компонент. Идея такого процессора вынашивалась в команде МД-1 еще до начала экспериментов. Такой процессор, АП-20, был разработан сотрудниками лаб. № 6 Г.А. Аксеновым, Ю.И. Мерзляковым, В.Я. Сазанским, а его адаптацией к эксперименту МД-1 занимался М.В. Бейлин. Быстродействие этого процессора составляло 8-10 млн операций в секунду (сложение, умножение), на порядок выше, чем у ЕС-1060. Этот процессор выполнял функцию третичного триггера. Работающая на нем небольшая программа отсеивала фоновые события. «Полезным», например, считалось событие, если обнаруживалась хотя бы одна заряженная частица, вылетевшая из места встречи, или некоторые другие малофоновые комбинации компонент детектора. В результате прогонки первичных лент через этот процессор число лент, используемых для дальнейшей обработки, сокращалось в 15-20 раз, их дальнейшая обработка на ЕС-1060-61 занимала уже вполне приемлемое время.

Моделирование прохождения частиц через детектор и отклика его систем производилось на основе программы UNIMOD, написанной группой физиков детекторов МД-1 и НД (А.Д. Букин, В.Н. Иванченко, М.Ю. Лельчук, В.А. Таюрский, С.И. Эйдельман, В.И. Юрченко) под руководством А.Д. Букина. Моделирование процессов взаимодействий адронов с ядрами было разработано группой Й. Ранфта из университета г. Лейпцига. По своим характеристикам программа UNIMOD близка к известной программе GEANT3, которая была написана в ЦЕРН в то же время.

#### 15. ЗАПУСК ДЕТЕКТОРА, ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ

Детектор был собран в 1980 г. Магнит с детектором размещался на подвижной платформе. Предполагалось, что для профилактических работ детектор будет выкатываться с места встречи на наладоч-

ную площадку без отсоединения проводов. Все кабели и жгуты длиной 40 м были уложены на подвижной кабельной трассе. Однако на практике детектор только один раз совершил путь от наладочной площадки до места встречи. На торжественную церемонию были приглашены все участники изготовления детектора. Как принято при спуске корабля на воду, к веревке привязали бутылку шампанского, которую доверили отпустить моей жене Лилии. Пролетев 10 м, бутылка ударилась о ядро магнита, на котором был приклеен плакат «МД-1», и отскочила целехонькая. После перевешивания плаката церемония разбивания бутылки завершилась успешно. Все последующие разборки детектора проводились непосредственно на месте встречи, в основном во время летней профилактики. Разборка-ремонт-сборка обычно укладывались в один месяц, так что в августе удавалось сходить в отпуск.



**Рис. 7.** Момент сборки детектора: опускается один из блоков ливнево-пробежных камер под наблюдением автора статьи (слева)

Первый этап экспериментов – это настройка детектора, изучение и оптимизация фонов. Перед МД-1 на ВЭПП-4 уже был проведен короткий эксперимент с детектором ОЛЯ (рук. Л.М. Курдадзе) по измерению масс  $J/\psi$ - и  $\psi'$ - мезонов. Но детектор МД-1 сразу пошел в область  $\Upsilon$ -мезонов. Втрое большая энергия означала в сотни раз большие потери энергии на синхротронное излучение в кольце. Еще более опасным было синхротронное излучение в сильном поле детектора и доворотных магнитов. Предпринятые заранее меры (широкая вакуумная камера, поглотители, коллиматоры) позволили снизить фоны СИ до нормального уровня. Фоны, образующиеся в прямолинейных промежутках, удалось снизить в несколько раз путем организации антисовпадений от фотонов тормозного излучения, летящих вдоль этих участков орбиты. Исходя из анализа фона, были выбраны оптимальные условия для триггера (В.И. Тельнов). Наиболее эффективно в триггере использовались ливнево-пробежные камеры, поскольку они были не чувствительны к синхротронному излучению и можно было выключить из триггера область, прилегающую к плоскости орбиты, загруженную мягкими частицами,

вывернутыми с орбиты поперечным магнитным полем. Первичный триггер имел загрузку порядка 5 кГц, вторичный триггер снижал ее до 10 Гц после чего событие считывалось в компьютер, где уже программно частота событий снижалась до примерно 3 Гц и отобранные события записывались на магнитную ленту. Программы считывания событий, проверки и калибровки детектора на космике и пучках были написаны А.Г. Шамовым. Светимость измерялась тремя методами: упругое рассеяние на малые углы, однократное тормозное излучение и двойное тормозное излучение. Этими системами занимался Ю.А. Тихонов.

Сосредоточившись на борьбе с фонами в детекторе, мы чуть сами не пострадали от этих фотонов. В первый год работы Сергей Клименко занимался на наладочной площадке проверкой мюонных камер, еще не установленных на детектор. Как-то он поделился своей проблемой: камеры то работают нормально (считают космику с частотой около 500 Гц), то вдруг начинают срабатывать с частотой больше 1 Мгц. Я сразу догадался и поднял тревогу: это синхротронное излучение от ускорителя проникало на наладочную площадку, отразившись от потолка 13-го здания! В мюонные камеры, крышки которых были сделаны из 2,5 см дюралюминия, могли проникать только очень жесткие фотоны. Это излучение обнаружилось, когда энергия ВЭПП-4 была поднята до 5 ГэВ. К счастью, никто не пострадал. После этого ускоритель в 13-м здании был полностью закрыт сверху свинцовыми листами.

## 16. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ С МД-1

Набор статистики на МД-1 проводился с осени 1981-го до лета 1985 года, всего четыре года. Конец был связан с большим пожаром на комплексе ВЭПП-4 в августе 1985 г. (во время работы ускорителя на СИ). В 1977 году во FNAL был открыт ипсилон-мезон с массой около 9,5 ГэВ. В этом же году его зарегистрировали на  $e^+e^-$  накопителе DORIS в Гамбурге. Изучение  $\Upsilon$ -мезона и его возбужденных состояний и стало основной задачей детектора МД-1 (наряду с двухфотонной физикой). Одновременно с ВЭПП-4 вступил в строй  $e^+e^-$  накопитель CESR в Корнелле, США. Средняя светимость ВЭПП-4 в области  $\Upsilon$ -мезона составляла около  $3 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , а у наших зарубежных коллег она была на порядок больше (ввиду меньшей  $\beta$ -функции в месте встречи и большего числа сгустков). Так что конкурировать мы могли, только выбирая определенные задачи, где ошибка определялась не статистикой, а систематикой, или где у нас имелись методические преимущества, такие как разработанный в ИЯФ метод измерения энергии пучка по резонансной деполяризации и наличие в МД-1 системы регистрации рассеянных электронов. Интеграл светимости, набранный в эксперименте, составил  $30 \text{ пб}^{-1}$  в интервале энергий  $2E=7,2-10,4 \text{ ГэВ}$ .

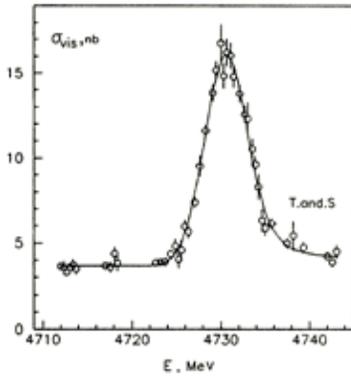
Первый физический результат на МД-1 был получен еще до запуска основного детектора. Было предсказание В.Н. Байера и др., что сечение тормозного излучения зависит от наличия поперечного магнитного поля в месте встречи. Юра Тихонов решил это проверить. Для этого понадобился только счетчик NaI под нулевым углом и камаковский 4-ка-

нальный АЦП разработки Аульченко. Оказалось, что в области малых энергий фотонов спектр очень сильно отличается от предсказаний КЭД, и это связано вовсе не с магнитным полем, а с большими прицельными параметрами в тормозном излучении (Я.С. Дербенев, В.Н. Байер). Электрон может излучить тормозной фотон, даже если пролетает мимо встречного позитрона на расстоянии много большем поперечных размеров пучков. Спектр тормозного излучения оказался зависящим от поперечных размеров пучков. Отличие в спектре в мягкой области составляет десятки процентов. На всех современных и планируемых  $e^+e^-$  коллайдерах тормозное излучение определяет время жизни пучков и для его расчета используются формулы, учитывающие данный эффект, открытый в эксперименте МД-1.

Эксперименты, проведенные с детектором МД-1, можно сгруппировать в несколько категорий:

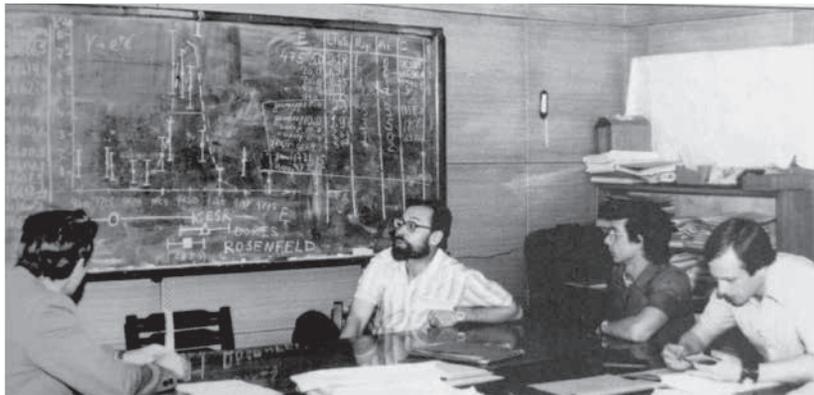
- 1) измерение параметров  $\Upsilon(1S)$ -,  $\Upsilon(2S)$ -,  $\Upsilon(3S)$ -мезонов (массы, электронные ширины, бранчинги);
- 2) измерение полных сечений  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны и поиск узких резонансов;
- 3) двухфотонная физика (с 0, 1, 2 рассеянными электронами);
- 4) разное (QED процессы  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$ ,  $\gamma(CI)e \rightarrow ee^+e^-$ ).

## 17. ФИЗИКА $\Upsilon$ -МЕЗОНОВ. ИЗМЕРЕНИЕ МАСС



Энергия пучка определялась путем измерения частоты прецессии спина, которая пропорциональна средней энергии частиц в пучке. Поляризованный пучок (время поляризации пучков в ВЭПП-4 составляло около

**Рис. 8.** Слева: наблюдаемое адронное сечение в области энергий  $\Upsilon(1S)$ . Внизу: А.Н. Скринский, А.П. Онучин, А.Е. Блинов, А.И. Воробьев в «тихой комнате» МД-1. 1982 г.



50 минут) деполяризовался с помощью внешнего переменного напряжения, частота которого плавно изменялась. Когда частота деполяризатора совпадала с частотой прецессии спина, пучок деполяризовался. Точность измерения энергии этого метода намного лучше, чем энергетический разброс в пучке, так как за время деполяризации электрон совершает много синхротронных колебаний. Факт деполяризации измерялся с помощью рассеяния циркулярно-поляризованных фотонов на вертикально поляризованных электронах, при этом возникала асимметрия в числе рассеянных фотонов, летящих выше и ниже орбиты. Этот метод предложили теоретики ИЯФ В.Н. Байер и В.А. Хозе. В качестве источника циркулярных фотонов можно было использовать лазер, но оказалось, что в МД-1 это можно сделать проще и лучше, используя синхротронные фотоны от встречного сгустка (Ю. Тихонов), которые имеют линейную поляризацию в плоскости орбиты и частичную циркулярную поляризацию выше и ниже орбиты. Для измерения поляризации достаточно было немного развести пучки по вертикали. Вертикальное положение пучков стабилизировалось по сигналу в ионизационных камерах от рентгеновского синхротронного излучения пучка, при этом измерялась up-down асимметрия высокоэнергичных рассеянных ( $>0,5$  ГэВ) фотонов. Асимметрия достигала 3% и легко измерялась.

Точность измерения масс  $\Upsilon(1S)$ -,  $\Upsilon(2S)$ - и  $\Upsilon(3S)$ -мезонов составила 0,1; 0,5 и 0,5 МэВ, соответственно. Прошло уже более 30 лет, а в таблицах PDG до сих пор точность масс  $\Upsilon$ -мезонов полностью определяется данными МД-1! Они являются реперами для определения масс всех b-кварковых мезонов.

Также были измерены с рекордной на то время точностью электронные ширины  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и их бранчинги в мюоны, поставлены верхние пределы распада  $\Upsilon(1S)$  на  $\pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-$ ,  $pp$ -bar и др.

## 18. $e^+e^- \rightarrow$ АДРОНЫ

Было проведено измерение сечения аннигиляции в адроны в области энергий  $2E=7,2-10,4$  ГэВ, которое является одной из важнейших величин для проверки квантовой хромодинамики. На МД-1 эти сечения были измерены с точностью около 3% и до сих пор являются лучшими в этой области. Вся эта область была просканирована с малым шагом и поставлены пределы на существование узких резонансов. В то время на детекторе Crystal ball наблюдали частицу  $\zeta(8,3)$  в распаде  $\Upsilon$ -мезона с достоверностью  $4\sigma$ , и были спекуляции, что, возможно, она состоит из скалярных кварков, а тогда в этой области энергий должно быть состояние, рождающееся как резонанс в  $e^+e^-$  аннигиляции. Мы не нашли такого состояния и поставили жесткие пределы на электронные ширины подобных резонансов. В свою очередь на большей статистике в экспериментах Crystal ball и Argus резонанс  $\zeta(8,3)$  «рассосался».

## 19. ДВУХФОТОННАЯ ФИЗИКА

После открытия двухфотонных процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- e^+e^-$  на ВЭПП-2 в 1970 г. и  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$  на ADONE в 1972 г. ничего нового по двухфотонной физике за последующие 6 лет не появилось, хотя предпринимались некоторые попытки. Первый вклад МД-1 в эту область произошел еще в 1978-79 г., за два года до начала работы на детекторе МД-1. В октябре 1978 г. меня командировали в SLAC на три месяца. Никакой задачи поставлено не было. В SLAC меня определили в группу Б. Рихтера, которому в 1976 г. дали Нобелевскую премию за открытие  $\psi$ -мезонов. В это время они только что начали работу на SPEAR с детектором Mark-2, была набрана некоторая статистика (около 20 пб<sup>-1</sup>). Осмотревшись на месте, я предложил поискать в данных Mark-2 двухфотонную физику, поскольку при подготовке эксперимента на МД-1 хорошо знал эту область и умел моделировать двухфотонные процессы. Через два месяца удалось выделить процесс двухфотонного рождения C-четного резонанса  $\eta'(958)$ , а затем  $f_2(1270)$ . Они были выделены без регистрации рассеянных электронов. Данный результат дал старт активным исследованиям по двухфотонной физике на всех  $e^+e^-$  коллайдерах и детекторах, к которым с 1981 г. подключился и МД-1.

Заодно добавлю, что в конце 1980 года на Первом совещании по физике на линейных коллайдерах мной была выдвинута идея (реального) фотонного коллайдера на базе однопролетных линейных  $e^+e^-$  коллайдеров. На линейных коллайдерах (в то время было два проекта ВЛЭПП (ИЯФ) и SLC (SLAC)) пучки используются однократно, поэтому их можно перед встречей превратить в фотоны, что лучше всего можно сделать путем рассеяния лазерных фотонов. При этом энергия рассеянных высокоэнергичных фотонов близка к энергии исходных электронов, а фотон-фотонная светимость на два-три порядка выше, чем при столкновении виртуальных фотонов на  $e^+e^-$  коллайдерах. Первые статьи по фотонным коллайдерам были написаны совместно с теоретиками из ИМ и НГУ И.Ф. Гинзбургом, Г.Л. Коткиным и В.Г. Сербо. Оба этих важных результата являются следствием работ по программе детектора МД-1.

Теперь о результатах по  $\gamma\gamma$ -физике с МД-1. Отличительной особенностью МД-1 являлась регистрация рассеянных электронов с энергией  $E'=(0,5-0,85)E$  за счет отклонения поперечным магнитным полем. Регистрация двух рассеянных электронов позволяла восстановить инвариантную массу рожденной системы с точностью около 150-200 МэВ только исходя из энергий рассеянных электронов. Ни один из существовавших детекторов не имел такой возможности. Это как раз то, что необходимо для измерения полного сечения  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны. Регистрация одного рассеянного электрона также давала дополнительное уравнение, позволяющее повысить точность восстановления инвариантной массы рожденной системы при регистрации всех родившихся частиц.

Получены следующие результаты.

1) Измерено сечение  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны в области  $W=1,5-4$  ГэВ с регистрацией обоих рассеянных электронов. Во всех других экспериментах инвариантная масса находилась косвенным образом с применением мо-

делирования, и поэтому их результаты имеют дополнительную систематическую ошибку.

2) Измерены двухфотонные ширины  $S$ -четных резонансов  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $f_2$ ,  $a_2$  и измерены сечения процессов  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ . Установлен предел на двухфотонную ширину резонанса с массой 2 МэВ (в связи с наблюдением в то время пиков в массах  $e^+e^-$  пар, наблюдаемых при столкновении ионов).

## 20. РАЗНОЕ (QED)

При движении электронов в поперечном поле МД-1 испускается много синхротронных фотонов с энергией до 20 кэВ. Сталкиваясь со встречными электронами, они могут рождают  $e^+e^-$  пары (процесс Бете-Гайтлера  $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$ ). Этот процесс был рассчитан и экспериментально выделен (В.А. Таюрский). Интересно, что эффективное сечение этого процесса на МД-1 было очень большое, примерно как у тормозного излучения. Рождение таких  $e^+e^-$  пар становилось заметным при  $E > 2$  ГэВ, а при  $E = 5$  ГэВ их было больше, чем от процесса Ландау-Лифшица (ЛЛ)  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ , который в центральной части детектора выглядел так же. Однако при вертикальном разведении пучков процесс ЛЛ исчезал, в то время как сечение первого процесса даже увеличивалось.

## 21. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент с детектором МД-1 был беспрецедентно смелый по количеству используемых новых методик, огромный по объему работы и был подготовлен в сжатые сроки небольшой группой молодых физиков под руководством А.П. Онучина. При его подготовке было получено много очень ценных методических результатов. Эксперимент на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4 в области  $Y$ -мезонов продолжался всего 4 года. Многие результаты получены впервые и являются лучшими по сей день. По результатам эксперимента опубликовано около 30 журнальных статей и обзор в журнале *Physics Reports* [1-28]. Защищено 5 докторских и 14 кандидатских диссертаций (см. списки ниже). За работу, в которой был обнаружен эффект ограничения прицельных параметров в тормозном излучении на встречных пучках, в 1984 году Ю.А. Тихонов был награжден медалью АН СССР для молодых ученых. В 1989 г. А.П. Онучину и Ю.А. Тихонову в группе сотрудников ИЯФ была присуждена Государственная премия СССР за цикл работ «Прецизионное измерение масс элементарных частиц на встречных электрон-позитронных пучках».

Основные участники эксперимента: С.Е. Бару, А.Е. Блинов, В.Е. Блинов, А.Е. Бондарь, А.Д. Букин, А.И. Воробьев, В.Р. Грошев, В.Н. Жилич, А.А. Жоленц, В.А. Киселев, С.Г. Клименко, Г.М. Колачев, С.И. Мишнев, А.П. Онучин, В.С. Панин, В.В. Петров, И.Я. Протопопов, В.А. Сидоров, Ю.И. Сквонь, А.Н. Скринский, В.А. Таюрский, В.И. Тельнов, Ю.А. Тихонов, Г.М. Тумайкин, А.Е. Ундрус, А.Г. Шапов, Ю.И. Эйдельман.

В подготовке, инженерном и программном обеспечении и проведении эксперимента также принимали участие А.С. Артамонов,

А.М. Аульченко, М.В. Бейлин, А.А. Белавин, В.Г. Бирюков, Н.Ф. Денисов, Н.И. Иноземцев, В.Д. Кутовенко, Г.Д. Минаков, С.А. Никитин, Э.А. Купер, Г.И. Провиз, Г.А. Савинов, Б.Л. Сысолетин А.Б. Темных, Б.Н. Шувалов, А.И. Шушаро, М.В. Юрков, В.И. Юрченко. Большой вклад в детектор МД-1 внесли лаборанты П. Козорезов, М. Коробков, В.А. Родякин, Р.Г. Снопков, В.С. Филиппов и многие другие.



**Рис. 9.** Часть команды МД-1 крупным планом. Сидят: В.Р. Грошев, Г.А. Савинов, С.Е. Бару, А.Е. Блинов; стоят: В.И. Тельнов, А.И. Воробьев, А.Г. Шамов



**Рис. 10.** В.И. Тельнов и Ю.А. Тихонов в пультовой МД-1 после защиты кандидатских диссертаций. 1982 г.



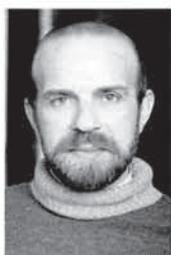
Онучин А.П.



Сидоров В.А.



Аульченко В.М.



Бару С.Е.



Белавин А.А.



Блинов А.Е.



Блинов В.Е.



Бондарь А.Е.



Букин А.Д.



Воробьев А.И.



Грошев В.Р.



Денисов Н.Ф.



Жилич В.Н.



Клименко С.Г.



Колачев Г.М.



Минаков Г.Д.



Панин В.С.



Сковпень Ю.И.



Тазорский В.А.



Тельнов В.И.



Тихонов Ю.А.



Ундрус А.Е.



Шамов А.Г.



Шушаро А.И.

**Рис. 11.**  
Команда  
детектора МД-1  
(почти вся)

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Тельнов. Расчет натяжения проволочек в пропорциональных камерах, ПТЭ 5 (1974) 46.
2. A.P. Onuchin, V.I. Telnov, Fluctuations of ionization losses in proportional chambers, Nucl. Instrum. Meth. 120 (1974) 365.
3. N.I. Kochelev, V.I. Telnov, Method of X-ray detection by a proportional chamber with high accuracy in both coordinates, Nucl.Instrum.Meth. 154 (1978) 407-410.
4. A.E. Blinov et al., Large Impact Parameters Cutoff in Bremsstrahlung at Colliding Beams, Phys.Lett. 113B (1982) 423.
5. A.E. Bondar, A.P. Onuchin, V.S. Panin, Valery I. Telnov, Spatial resolution of the induction proportional chambers, Nucl. Instrum. Meth. 207 (1983) 379.
6. A.S. Artamonov et al., High precision measurement of the  $\Upsilon$ -Meson Mass, Phys.Lett. 118B (1982) 225.
7. A.E. Blinov et al., The interaction region of the VEPP-4 storage ring for the detector with the transverse field MD-1, Conf.Proc. C830811 (1983) 183-185.
8. A.S. Artamonov et al., A high precision measurement of the  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$ ,  $\Upsilon''$ -meson masses. Phys. Lett. 137B(1984)272.
9. A.E. Blinov et al., Measurement of particle polarization in  $e^+e^-$  storage rings by means of synchrotron radiation scattering on the colliding beam, Nucl. Instrum. Meth. A241 (1985) 80-88.
10. А.Е. Блинов и др. Двухфотонное рождение  $e^+e^-$  пар с малой инвариантной массой. Ядерная физика 44(1986)626.
11. V.M. Aulchenko, A.E. Bondar, G.S. Filimonov, G.M. Kolachev, G.D. Minakov, A.P. Onuchin, V.S. Panin, V.A. Rodyakin, V.I. Telnov, V.N. Zhilich, Proportional chambers with delay line readout in the MD-1 Detector, Nucl.Instrum. Meth. A252 (1986) 267-271.
12. S.E. Baru et al., New measurement of the  $\Upsilon$ -Meson Mass, Z.Phys. C30 (1986) 551-558, Erratum: Z.Phys. C32 (1986) 622.
13. А.Е. Блинов и др., Рождение  $e^+e^-$  пары синхротронным излучением на электроне встречного пучка. Ядерная физика 5(1986)1008-1014.
14. A.E. Blinov et al., Luminosity measurement with the MD-1 detector at VEPP-4, Nucl. Instrum. Meth. A273 (1988) 31-39.
15. А.Е. Блинов и др., Верхний предел на двухфотонную ширину нейтральной частицы с массой 1,8 МэВ, Ядерная физика 47(1988)889-890.
16. S.E. Baru et al., Search for  $\chi(2,2)$  in radiative decay of  $\Upsilon$ -Meson, Z.Phys. C42 (1989) 505-510.
17. A.E. Blinov et al., Search for decay  $\Upsilon' \rightarrow \rho\pi$ , Phys. Lett. B245 (1990) 311-314.
18. S. E. Baru et al., Measurement of two photon widths of the  $A_2$ ,  $\eta'$ ,  $\eta$ . Z.Phys. C48 (1990) 581-586.
19. A.E. Blinov et al., The search for narrow resonances in the reaction  $e^+e^- \rightarrow$  hadrons at center-of-mass energy range between 7.23-GeV and 10,34-GeV, Z.Phys. C49 (1991) 239-243.

20. S.E. Baru et al., Determination of the  $\Upsilon(1S)$  leptonic width, Z.Phys. C56 (1992) 547-552.

21. S.E. Baru et al., Measurement of the leptonic width and the muon pair branching ratio of the  $\Upsilon(1S)$  with the MD-1 detector, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 27 (1992) 89-93.

22. A.E. Blinov et al., Pion pair production in photon-photon collisions, Z.Phys. C53 (1992) 33-39.

23. S.E. Baru et al., Measurement of the branching ratio for  $\Upsilon(1S)$  state into  $\mu^+\mu^-$  and search for decays  $\Upsilon(1S) \rightarrow \pi^+\pi^-, K^+K^-, p \text{ anti-}p$ , Z. Phys. C54 (1992) 229-234.

24. S.E. Baru et al., Total cross-section of two photon production of hadrons, Z.Phys. C53 (1992) 219-224.

25. A.E. Blinov et al., Measurement of inclusive Lambda production in electron – positron interactions at the upsilon energies, Z.Phys. C62 (1994) 367-370.

26. A.E. Blinov et al., Bose-Einstein correlations in  $e^+e^-$  annihilation in the  $\Upsilon(1S)$  and continuum, Z.Phys. C69 (1996) 215-222.

27. A.E. Blinov et al., The Measurement of R in  $e^+e^-$  annihilation at center-of-mass energies between 7.2-GeV and 10.34-GeV, Z.Phys. C70 (1996) 31-38.

28. S.E. Baru et al., Experiments with the MD-1 detector at the  $e^+e^-$  collider VEPP-4 in the energy region of Upsilon mesons, Phys.Rept. 267 (1996) 71-159.

### КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Валерий Иванович Тельнов. Исследование пространственного и энергетического разрешения пропорциональных камер. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1982 г.

2. Юрий Анатольевич Тихонов. Эффект ограничения прицельных параметров в тормозном излучении на встречных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1982 г.

3. Геннадий Михайлович Колачев. Детектор с поперечным магнитным полем для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 1984 г.

4. Владимир Романович Грошев. Двухфотонное рождение  $e^+e^-$  пар с малой инвариантной массой. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1986 г.

5. Анатолий Иванович Воробьев. Прецизионное измерение масс  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$  и  $\Upsilon''$ -мезонов. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1986 г.

6. Валерий Алексеевич Таюрский. Рождение  $e^+e^-$  пары фотоном синхротронного излучения на электроны встречного пучка. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1986 г.

7. Александр Евгеньевич Ундрус. Измерение двухфотонных шириин мезонов. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1990 г.

8. Юрий Иванович Сковпень. Поиск распадов  $\Upsilon$ -мезона в  $\gamma\chi(2,2)$ ,  $\gamma\chi(2,2)$  и  $\rho^0\pi^0$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1990 г.

9. Владимир Сергеевич Панин. Полное сечение двухфотонного рождения адронов. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1991 г.

10. Сергей Григорьевич Клименко. Измерение вероятности распада  $\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$  и поиск распадов  $\Upsilon(1S) \rightarrow \pi^+\pi^-, K^+K^-$ . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1993 г.

11. Андрей Георгиевич Шамов. Измерение лептонной ширины  $\Upsilon(1s)$  мезона на накопителе ВЭПП-4 с детектором МД-1. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1994 г.

12. Александр Евгеньевич Бондарь. Системы регистрации рассеянных электронов детекторов МД-1 и КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1994 г.

13. Александр Евгеньевич Блинов. Бозе-эйнштейновские корреляции в области  $\Upsilon$ -мезонов. Анализ методов СР-нарушения на В-фабриках. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1995 г.

14. Виктор Николаевич Жилич. Исследование рождения мюонных пар и поиск узких резонансов в двухфотонных процессах на детекторе МД-1. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1995 г.

15. Борис Николаевич Шувалов. Исследование и разработка математического обеспечения малых интерактивных систем в проблемно-ориентированной многомашинной среде. Диссертация к.т.н., ВЦ СО АН СССР. Новосибирск 1983.

16. Борис Леонидович Сысолетин. Общесистемное математическое обеспечение программно ориентированного многомашинного комплекса. Диссертация к.т.н., ВЦ СО АН СССР. Новосибирск 1983.

#### ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Семён Ефимович Бару. Быстродействующие системы сбора и обработки данных с пропорциональных камер в детекторах на встречных пучках и для прикладных задач. Диссертация д.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.

2. Владимир Михайлович Аульченко. Электронные системы детекторов для экспериментов на встречных  $e^+e^-$  пучках. Диссертация д.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 1988 г.

3. Александр Дмитриевич Букин. Математическое обеспечение экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1991 г.

4. Валерий Иванович Тельнов. Фотон-фотонные взаимодействия на электрон-позитронных коллайдерах. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1993 г.

5. Юрий Анатольевич Тихонов. Аннигиляция электронов и позитронов в адроны при энергии 7,2-10,5 ГэВ. Диссертация д.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1994 г.

## ГЛАВА 4

В.Е. Блинов, А.П. Онучин, В.А. Таюрский, А.Г. Шамо́в

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ  
КЕДР НА ВЭПП-4М

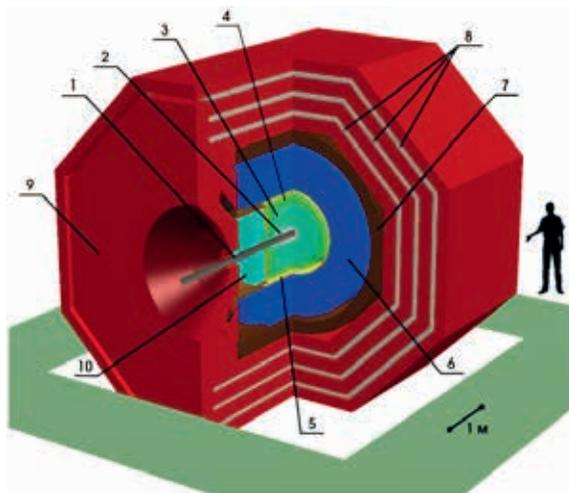
Статья посвящена эксперименту с детектором КЕДР на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4М, в котором проведены прецизионные измерения фундаментальных параметров очарованных частиц и тау-лептона. К настоящему времени (2017 г.) опубликовано свыше 20 экспериментальных результатов, из которых 12 имеют лучшую в мире точность.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

История универсального магнитного детектора КЕДР насчитывает более 30 лет.

**Рис. 1.** Схема детектора КЕДР:

- 1 – вакуумная камера ускорителя;
- 2 – вершинный детектор;
- 3 – дрейфовая камера;
- 4 – азрогелевые пороговые черенковские счетчики;
- 5 – времяпролетные счетчики;
- 6 – баррельный жидкокриптоновый калориметр;
- 7 – сверхпроводящая катушка;
- 8 – ядро;
- 9 – мюонные камеры;
- 10 – торцевой CsI калориметр



Проект детектора создавался в 1986-1990 годах, параллельно велись измерения с прототипами систем регистрации детектора для проверки новых идей и получения заложенных в проект параметров. Изготовление большинства систем детектора пришлось на 1990-е годы. Работу над детектором координировал заместитель директора ИЯФ В.А. Сидоров, а за системы детектора отвечали В.В. Анашин, А.Е. Бондарь, А.И. Воробьев, В.Р. Грошев, М.Ю. Лельчук, А.П. Онучин, В.С. Панин, Ю.А. Тихонов, А.Г. Шамо́в, Б.А. Шварц, А.Г. Чилингаров. Конструкторскими работами руководил Г.М. Колачев. О появлении проекта детектора КЕДР и начале его строительства рассказывает Алексей Павлович Онучин:

– История рождения детектора КЕДР началась осенью 1985 года, когда после пожара на ВЭПП-4 команды детекторов МД-1 и ОЛЯ решили разработать общий проект. Перед пожаром команда МД-1 вела эксперименты на ВЭПП-4, вышла на крейсерский режим работы. Был набран интеграл светимости 30 обратных пикобарн.

Зарегистрировано 0,1 млн событий ипсилон-мезона. Планировалось в несколько раз увеличить объем экспериментальной информации, а через два года остановить эксперименты и провести модернизацию накопителя (проект ВЭПП-4М) и детектора (проект МД-2). Команда детектора ОЛЯ, закончив эксперименты на ВЭПП-2М и измерение масс пси-мезонов на ВЭПП-4 (1980 г.), разработала проект детектора СИЗИФ, начала работы по его практической реализации.

Существенным событием стало принятие решения о строительстве в Корнельском университете (США) нового детектора CLEO-II для проведения экспериментов в этой же области энергии. Проекты наших детекторов СИЗИФ и МД-2 уступали по параметрам детектору CLEO-II. Началась совместная работа над новым проектом, в результате чего появился проект детектора КЕДР. Наиболее существенным и дорогим в этих детекторах являются калориметры. Детектор CLEO-II задал шкалу калориметра. Американцы заложили калориметр на основе 30 тонн кристаллов йодистого цезия стоимостью около 15 млн долларов. В то время СССР производил 0,5 тонны этих кристаллов в год. Было решено начать работы в двух направлениях. Команда детектора ОЛЯ начала поднимать мощности по производству кристаллов йодистого цезия в стране. Команда, работающая на МД-1, предложила создать новый тип калориметра на основе жидкого криптона и начала осваивать эту методику. В 1987 году к работам по жидкому криптону присоединились физики трех итальянских университетов – Милана, Болоньи и Падуи. В конце 1988 года были получены первые результаты на прототипах калориметра на жидком криптоне. Показано, что энергетическое разрешение на высоких энергиях сравнимо с разрешением калориметров на кристаллах, на низких энергиях – несколько хуже. Важными преимуществами калориметра на жидком криптоне являются лучшее пространственное разрешение и лучшая идентификация заряженных частиц, а также высокая радиационная стойкость. Команда детектора ОЛЯ к тому времени получила прекрасные результаты на прототипах с кристаллами и почти в 10 раз увеличила скорость производства этих кристаллов в стране. Тогда решено было в детекторе КЕДР сделать цилиндрическую часть калориметра на жидком криптоне (вес криптона составляет около 30 тонн), а торцы – на кристаллах йодистого цезия (вес кристаллов – 3 тонны).

Экономические трудности в нашей стране в 1990-х годах привели к затягиванию строительства детектора.

Эксперименты с детектором КЕДР на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4М начались в 2002 году и ведутся по настоящее время с несколькими остановками на ремонт и модернизацию систем детектора. Работами по подготовке детектора к эксперименту руководил Ю.А. Тихонов, а начиная с 2002 года – В.Е. Блинов. Хотя КЕДР был построен довольно давно, по многим параметрам он продолжает находиться на уровне лучших детекторов для экспериментов на встречных пучках в своей области энергий (от  $\psi$ - до  $\Upsilon$ -мезонов). А всего в мире было построено около 10

подобных детекторов. Сейчас в области  $\psi$ -мезонов работает детектор BES-III на коллайдере BEPC-II в Китае. В 2018 году в области  $\Upsilon$ -мезонов после модернизации начнет работать детектор Belle-II на коллайдере SuperKEKB в Японии.

Коллайдер ВЭПП-4М работает в режиме 2x2 сгустка. На энергии 2 ГэВ в пучке пиковая светимость коллайдера составляет  $3 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . На энергии 4 ГэВ в пучке расчетная пиковая светимость коллайдера составляет  $2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . С начала 2017 года ВЭПП-4М получает пучки электронов и позитронов от нового инжекционного комплекса ВЭПП-5.

## 2. СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРА КЕДР

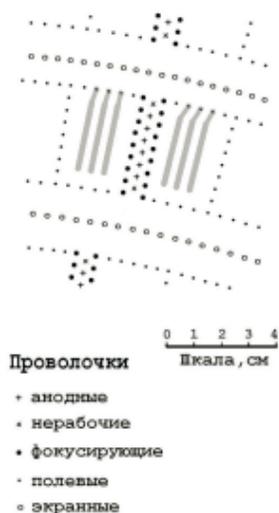
Подробное описание детектора содержится в работе [1]. Далее кратко описана конструкция основных систем детектора, приведен ряд иллюстраций и перечислены основные физики, которые их разработали и поддерживают.

**Магнитная и криогенная системы.** Магнитная система состоит из основного и двух одинаковых компенсирующих сверхпроводящих (СП) соленоидов (см. рис. 1), расположенных внутри железного ярма. Железное ярмо весом 740 тонн замыкает магнитный поток основного соленоида. Однородность магнитного поля внутри детектора обеспечивается с относительной точностью  $10^{-4}$ . Параметры центрального соленоида: рабочее магнитное поле детектора 0,6 Тл, длина криостата – 3,16 м наружный и внутренний диаметры криостата – 3,57 м и 3,12 м, внутренний диаметр СП обмотки – 3,24 м. Толщина катушки –  $0,95X_0$ .

Центральный электромагнитный калориметр детектора заполнен 27 тоннами жидкого криптона. СП соленоиды магнитной системы охлаждаются жидким гелием. Суммарное суточное потребление стороннего жидкого гелия в системе составляет до 1100 литров при работе рефрижератора в дроссельном режиме. Благодаря использованию поршневого детандера расход снижается до 500 литров в сутки. Эти системы разработали В.В. Анашин, Л.М. Барков, А.К. Барладян, Г.С. Блинов, С.В. Карпов, В.Ф. Куликов, А.А. Рубан, Р.Г. Снопков, Ю.А. Тихонов. Сейчас системы поддерживают В.В. Анашин, А.К. Барладян, С.В. Карпов, В.Ф. Куликов, А.А. Рубан, Р.Г. Снопков, Ю.А. Тихонов.

**Вершинный детектор** расположен между вакуумной трубой накопителя и дрейфовой камерой. Телесный угол  $\Omega=0,98 \times 4\pi$ . Вершинный детектор (ВД) изготовлен на основе дрейфовых трубок. Параметры детектора: диаметр трубки – 10 мм, длина чувствительной области – 670 мм, радиус первого слоя – 67,1 мм, радиус последнего слоя – 116,84 мм, число слоев – 6, полное число трубок – 312. Дрейфовая трубка состоит из цилиндрического катода и центральной анодной проволоки. Трубки изготавливаются из алюминизированной лавсановой пленки шириной 5 см. В качестве рабочей газовой смеси используется аргон с добавлением 30% углекислоты под избыточным давлением около 0,1 атм. Пространственное разрешение равно 170 мкм. Суммарная толщина вещества ВД составляет около 0,2% от  $X_0$ . Вершинный детектор разработали А.Г. Чилингаров, В.П. Нагаслаев, А.В. Соколов. За систему отвечали А.В. Полуэктов и А.В. Соколов, сейчас – А.В. Соколов.

**Дрейфовая камера.** Основные параметры дрейфовой камеры (ДК): телесный угол  $\Omega=0,72 \times 4\pi$ , внутренний радиус камеры – 125 мм, наружный радиус камеры – 535 мм, длина камеры – 1100 мм, длина проволочек – 970 мм, 7 суперслоев: 4 аксиальных, 3 стерео, стерео угол  $\pm 100$  мрад, число измерений – 42, число ячеек – 252, число проволочек (16032): 1512 анодных, 11772 полевых и фокусирующих, 2748 экранных. Толщина вещества равна  $0,051 X_0$ . В качестве рабочего газа был выбран чистый диметиловый эфир (ДМЭ,  $C_2H_6O$ ) под давлением 1,06 атм. При рабочей напряженности магнитного поля 0,6 Тл пространственное разрешение в аксиальных / стерео слоях: 115/220 мкм; разрешение трековой системы (ВД+ДК) по поперечному импульсу составляет 3,6% на 1 ГэВ/с.  $\pi/K$  разделение на  $2\sigma$ : до 0,67 ГэВ/с;  $K/p$  разделение на  $2\sigma$ : до 1,2 ГэВ/с. На рисунке 2 показана ячейка дрейфовой камеры. Дрейфовую камеру разработали В.Е. Блинов, В.Р. Грошев, А.П. Онучин, А.В. Рылин, А.Н. Юшков. Сейчас ее поддерживают И.Ю. Басок, В.Г. Присекин, К.Ю. Тодышев, Т.А. Харламова.



**Рис. 2.** Слева: ячейка дрейфовой камеры. Справа: установка в детектор дрейфовой камеры. Ю.В. Марков, А.П. Харченков, А.С. Старостин, К.Ю. Тодышев, А.В. Тарнов, В.Е. Блинов. 2000 г.

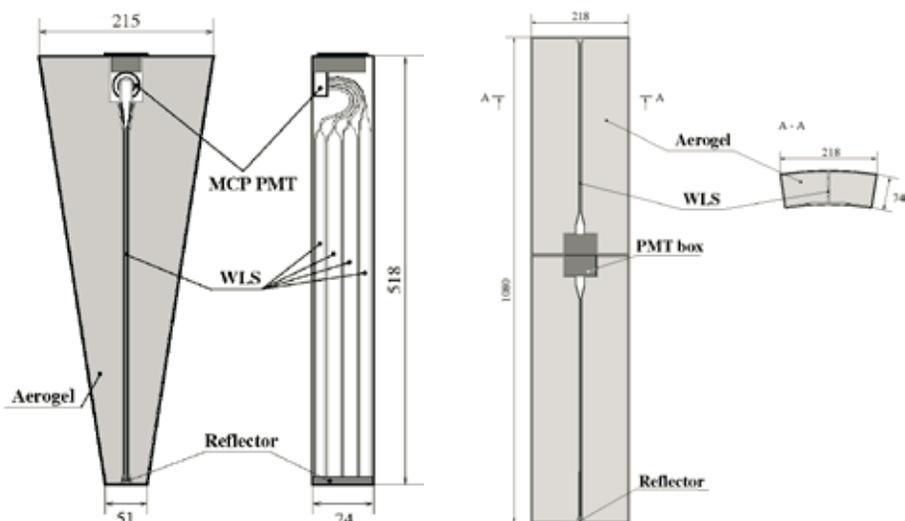
**Система пороговых черенковских счетчиков.** Телесный угол  $\Omega=0,96 \times 4\pi$ . В этой системе в качестве радиатора используется аэрогель с показателем преломления  $n=1,05$ . Система обеспечивает  $\pi/K$  разделение в интервале импульсов 0,6–1,5 ГэВ/с. Она состоит из двух слоев и включает в себя 160 счетчиков: 80 баррельных и 80 торцевых. Конструкция счетчиков показана на рис. 4. Счетчики АШИФ (Аэрогель, ШИФтер, Фотоумножитель) со сбором света с помощью переизлучателей спектра (шифтеров) позволяют существенно уменьшить число ФЭУ и стоимость системы по сравнению с системой с прямым светосбором. ФЭУ для данной системы (на основе микроканальных пластин с мультищелочным

фотокатодом) производится в Новосибирске предприятиями ОАО «Катод» и ЗАО «Экран ФЭП». Счетчики содержат 1000 литров аэрогеля, который совместно производится Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН и ИЯФ. По оптическим параметрам этот аэрогель является одним из лучших в мире. В счетчиках используется переизлучатель на основе полиметилметакрилата с добавкой ВВQ. Система способна работать в магнитном поле до 1,8 Тл. Толщина системы составляет  $0,24 X_0$ . Счетчики АШИФ разработали А.Ю. Барняков, М.Ю. Барняков, А.Р. Бузыкаев, А.И. Воробьев, С.А. Кононов, Е.А. Кравченко, А.П. Онучин, А.Г. Шамов. Систему поддерживают сейчас А.Ю. Барняков, М.Ю. Барняков, Е.А. Кравченко, И.В. Овтин, И.А. Куянов.



**Рис. 3.** Аэрогелевых дел мастера. А.Р. Бузыкаев, М.Ю. Барняков, М. Шмаков, С. Голубев, А.Ю. Барняков, А.Ф. Данилюк, А.П. Онучин, Е.А. Кравченко, В.А. Родякин, А.С. Старостин, А.В. Тарков. 2003 г.

**Времяпролетная система** состоит из продольной и торцевой частей. Основные параметры продольных счетчиков (32): телесный угол  $\Omega=0,71 \times 4\pi$ , толщина сцинтиллятора – 10 мм ( $0,02 X_0$ ), 2 ФЭУ на счетчик,  $\sigma$  времени пролета – 360 пс. Основные параметры торцевых счетчи-



**Рис. 4.** Слева: торцевой счетчик АШИФ. Справа: два баррельных счетчика АШИФ в одном корпусе



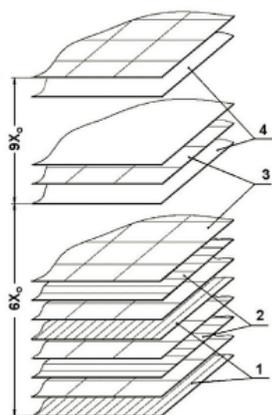
**Рис. 5.** Установка в детектор системы аэрогелевых счетчиков.  
 Сидят: А.В. Тарков, В.А. Родякин, М.Ю. Барняков.  
 Стоят: В.С. Бобровников, С.А. Кононов, М. Шмаков. 2004 г.

ков ( $2 \times 32 = 64$ ): телесный угол  $\Omega = 0,26 \times 4\pi$ , толщина сцинтиллятора – 20 мм ( $0,05 X_0$ ), 1 ФЭУ на счетчик,  $\sigma_{\text{ToF}} = 300$  пс. Для калибровки системы используются экспериментальные события упругого баба-рассеяния. Счетчики позволяют разделять  $\pi$ - и  $K$ -мезоны до импульса 0,6 ГэВ/с на уровне  $2\sigma$ , а также достаточно эффективно подавлять частицы космического излучения. В качестве материала для времяпролетных счетчиков используется пластический сцинтиллятор Bicron-408. Для регистрации сцинтилляционного света в системе применяются ФЭУ ХР2262. Установленные на световодах ФЭУ помещены внутрь магнитных экранов. Систему разработали И.В. Бедный, Н.И. Роот, Б.А. Шварц. Сейчас ее поддерживают А.В. Бобров, А.И. Воробьев, О.Л. Резанова.

**Торцевой электромагнитный калориметр.** Торцевой калориметр детектора КЕДР (см. рис. 1) создан на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Na) производства НПО «Монокристаллреактив», г. Харьков. Для регистрации света используются вакуумные фототриоды, которые были изготовлены на Новосибирском заводе «Экран». Калориметр состоит из двух частей, расположенных вокруг вакуумной камеры симметрично относительно области взаимодействия пучков. Каждая часть включает в себя четыре модуля и внутреннюю систему, состоящую из отдельных счетчиков. Основные параметры: полярный угол – 6-38 и 142-174 гр.; телесный угол  $\Omega = 0,21 \times 4\pi$ ; число кристаллов – 1232; масса – 3,2 тонны. Энергетическое разрешение на 1,5 ГэВ равно 3,5%; пространственное разрешение – 8 мм. Толщина калориметра составляет  $16,1 X_0$ . Систему разработали А.С. Кузьмин, Б.А. Шварц. Сейчас ее поддерживают С.Б. Орешкин, А.А. Осипов.

**Цилиндрический электромагнитный калориметр** выполнен на основе жидкого криптона. Основные параметры: полярный угол – 38-142 гр.; телесный угол  $\Omega = 0,79 \times 4\pi$ ; масса – 27 тонн. Первый слой цилиндрического электромагнитного калориметра имеет структуру электродов, состоящую из чередующихся продольных и поперечных полосок, что позволяет получать пространственное разрешение 1 мм. Структура электродов показана на рис. 6. Общее число каналов регистрирующей электроники калориметра равно 7240, из них 2304 канала предназначены для измерения энергии и 4936 – для измерения координат. Энергетическое разрешение на 1,8 ГэВ равно 3%; разрешение по массе  $\pi^0$  равно 8 МэВ; пространственное разрешение – 1 мм. Толщина калориметра равна  $14,8 X_0$ . Калориметр разработали В.М. Малышев, А.Л. Масленников, А.П. Онучин, В.С. Панин, С.В. Пелеганчук, Г.Э. Поспелов, Ю.А. Тихонов, а также группа итальянских физиков под руководством П. Фрабети. Работу поддерживают К.Ю. Котов, В.М. Малышев, Д.А. Максимов, А.Л. Масленников, С.В. Пелеганчук, Р.Г. Снопков.

**Мюонная система** предназначена для идентификации и разделения мюонов и пионов по отличию длины пробега в веществе детектора. Телесный угол системы  $\Omega = 0,67 \times 4\pi$ . Полностью поглотитель могут пересекать мюоны, энергия которых выше порога 1,7-2,1 ГэВ. Блоки мюонной системы расположены в три слоя внутри ярма магнита детектора (рис. 1). Система построена на основе цилиндрических газовых прово-



**Рис. 6.** Слева: рядом с калориметром на жидком криптоне его создатели (далеко не все). 1-й ряд: Р.Г. Снопков, А.П. Онучин, А.И. Шушаро. 2-й ряд: А. Игнатенко, А.К. Барладян, А.И. Рогозин, А.Л. Масленников, А.Ю. Бондаренко. 1998 г.

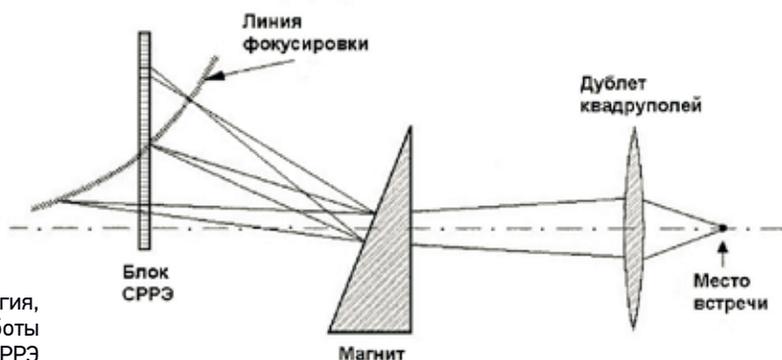
Справа: структура электродов Lkr калориметра. 1 –  $\phi$ -полоски, 2 – z-полоски, 3 – высоковольтные электроды, 4 – заземленные электроды. 1998 г.

лочных камер (стримерных трубок), работающих в самогасящемся стримерном режиме. Основные параметры мюонной системы: число слоев – 3; количество стримерных трубок – 2208; среднее разрешение по координате вдоль трубки – около 4 см. Толщина ярма перед слоем – 23 см (1,4 ядерной длины). Систему разработали Д.В. Бондарев, М.Ю. Лельчук, А.Б. Номероцкий. Систему поддерживает А.М. Сухарев.

**Монитор светимости.** Оперативная светимость ВЭПП-4М измеряется по процессу однократного тормозного излучения  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$  (ОТИ). В этом процессе одна из частиц пучка теряет часть энергии, излучая фотон, а встречная частица практически не меняет своего движения. Излученные фотоны летят в узком конусе вдоль направления исходной частицы с углом  $\sim 1/\gamma$ . Определение скорости счета от электронного и позитронного пучков дает два независимых измерения светимости. Спектр излученных фотонов при малых энергиях имеет вид  $\sim 1/\omega$ . Край спектра ОТИ, соответствующий  $\omega \sim E_B$ , используется для амплитудной калибровки и измерения разрешения монитора светимости. Монитор состоит из двух подсистем, расположенных справа и слева от места встречи. Каждая подсистема состоит из 4 блоков. Блок содержит 25 слоев свинца (толщиной 1 мм) и сцинтилляционной пластмассы (толщиной 5 мм). Энергетическое разрешение на энергии 1 ГэВ составляет 6-7% и определяется стабильностью орбиты. Для большей части заходов точность измерения светимости по ОТИ составляет  $\Delta L/L \approx 3\%$ . Систему разработали А.И. Воробьев, В.Н. Жилич, Б.А. Шварц. Сейчас систему поддерживает В.Н. Жилич.

**Система регистрации рассеянных электронов (СРРЭ)** предназначена для исследования двухфотонных ( $\gamma\gamma$ ) процессов. Она также используется для экспериментов с выведенным фотонным пучком. Система состоит из двух подсистем (на основе магнитных спектрометров) из 4 блоков каждая, которые расположены по обе стороны от места встречи пучков (см. главу, посвященную ВЭПП-4М в 1-й части книги).

Двухплечевой фокусирующий магнитный спектрометр для измерения энергии РЭ использует дублет квадрупольных линз, предназначенный для получения малой  $\beta$ -функции в месте встречи, и поворотные магниты. Электроны и позитроны, потерявшие часть энергии, выводятся с равновесной орбиты пучка поперечным полем поворотных магнитов. В фокусирующем спектрометре частицы с определенной энергией, независимо от угла вылета, попадают в определенную точку на кривой фокусировки. Оптическая аналогия системы показана на рис. 7.



**Рис. 7.** Оптическая аналогия, поясняющая принцип работы СРРЭ

Каждый координатный блок сконструирован в виде единого жесткого модуля шириной около 100 мм (2 блока двойного размера). Вертикальный размер системы 200 мм заведомо избыточен, так как большинство рассеянных электронов лежит в полосе 10-20 мм от плоскости орбиты. Продольный размер блока около 250 мм, в нем находятся 6 двойных слоев дрейфовых трубок (144 и 288 трубочек в блоке), измеряющих отлет рассеянных электронов от оси пучка в плоскости орбиты. Дрейфовые трубочки диаметром 6 мм имеют стенки толщиной 90 мкм (из нержавеющей стали), что обеспечивает защиту от мягкого синхротронного излучения. Координатное разрешение трубочек составляет 0,3-0,6 мм в зависимости от рабочего напряжения. В реальных условиях эксперимента, с учетом многократного рассеяния, разрешение по координате трека составляет около 300 мкм, а разрешение по углу около 3 мрад.

Для улучшения координатного и энергетического разрешения СРРЭ каждый модуль системы оборудован двухкоординатным детектором высокого разрешения на основе многокаскадных газовых электронных умножителей (ГЭУ), расположенных перед блоком из дрейфовых трубок. Разрешение ГЭУ-детекторов составляет около 100 мкм в плоскости орбиты и около 250 мкм по вертикали. Вертикальную координату РЭ можно использовать для подавления фона однократного тормозного

КОЛЛАЙДЕРЫ И ДЕТЕКТОРЫ

излучения. Частицы в СРРЭ регистрируются в диапазоне углов 0-0,01 радиан с энергиями от 45% до 98% от энергии пучка. Интервал по массе регистрируемой  $\gamma\gamma$ -системы равен 0,14 – 4 ГэВ, разрешение составляет 5 – 23 МэВ. Для экспериментов с выведенным фотонным пучком (ОТИ или комптон) СРРЭ обеспечивает точность определения энергии лучше 1% в интервале от 100 до 2000 МэВ. Систему разработали А.Е. Бондарь, В.Н. Жилич, Т.А. Пурлац, А.О. Полуэктов, Л.В. Романов. Сейчас ее поддерживают В.Н. Жилич, В.Н. Кудрявцев, Л.И. Шехтман.

**Триггер.** Аппаратный триггер детектора КЕДР имеет двухуровневую структуру. Он включает в себя первичный триггер (ПТ, принимает решение за 450 нс) и вторичный. ПТ не имеет мертвого времени, так как интервал между столкновениями пучков в кольце ВЭПП-4М 620 нс. Третичный триггер является программным. Эффективность выделения полезных событий триггером зависит от типа события. Для изучаемых на детекторе КЕДР физических процессов она достигает 99%. В работах по триггеру участвовали С.С. Петросян, А.А. Талышев, В.И. Тельнов, А.Г. Шамо́в. Сейчас эту работу ведет А.А. Талышев.

**Система сбора данных. Электроника.** Электронная аппаратура системы сбора данных (ССД) делится на камерную, регистрирующую и обрабатывающую. Камерная электроника располагается на минимальном расстоянии от детектора и служит для усиления первичных сигналов и их формирования. Регистрирующая аппаратура принимает сигналы от камерной электроники, преобразует их в цифровой вид, отбирает полезную информацию и запоминает ее. В обрабатывающей аппаратуре происходит полная или частичная обработка поступающей из регистрирующей электроники информации и ее накопление на долговременных носителях. ССД детектора основана на спецкрейтах стандарта КЛЮКВА, разработанных в ИЯФ СО РАН специально для детекторов КМД-2, КЕДР, СНД. Число каналов электроники без системы ГЭУ составляет около 15 тысяч, система ГЭУ содержит 5120 аналоговых каналов медленного контроля. События в эксперименте КЕДР записываются с частотой 50 – 100 Гц. Средний размер записи события составляет 2-4 килобайта, из них на ГЭУ приходится около 160 байт. Поток данных делится на отдельные файлы, содержащие примерно по 300 тысяч событий (около одного гигабайта). Основные разработчики: В.М. Аульченко, С.Е. Бару, Г.А. Савинов, Ю.В. Усов.

**Система сбора данных. Компьютеры.** Сбор данных, а также криогенный и медленный контроль на детекторе КЕДР, обеспечивают 17 компьютеров под управлением ОС GNU/Linux и 2 компьютера VAX/VMS. Анализ и обработка данных ведётся на компьютерах, размещенных в пультовой детектора КЕДР, на рабочих местах физиков. Для больших задач используются суперкомпьютеры ИВЦ НГУ и ССКЦ, а также компьютеры институтской вычислительной фермы (BINP/GCF). В качестве системы управления пакетными заданиями используется программное обеспечение Sun Grid Engine. Все компьютеры, используемые для сбора данных, собраны в выделенную Ethernet сеть с пропускной способностью 100 Мбит/с.

Для обеспечения доступа к данным дисковых серверов используется сетевая файловая система NFS. В рамках инфраструктуры детектора КЕДР по NFS доступно примерно 13 ТБ дискового пространства, разделенного между четырьмя файловыми серверами, на которых хранятся сырые данные, файлы моделирования, а также файлы, полученные в результате анализа. Кроме общедоступных ресурсов, есть выделенные серверы, предназначенные исключительно для бэкапа данных (7 ТБ) и для базы данных детектора КЕДР.

Работа всех программных средств мониторинга и контроля эксперимента координируется при помощи специальной системы управления процессами. Оператор с любого компьютера комплекса получает доступ к системе посредством специальной программы PILOT, разработчиком которой является А.Г. Шамов. Основные разработчики программ: Е.М. Балдин, А.Р. Бузыкаев, Д.А. Максимов, В.М. Малышев, И.О. Орлов, А.М. Сухарев, А.Г. Шамов.

**Рис. 8.** В пультовой ВЭПП-4М.  
А.Г. Шамов и Ю.А. Тихонов



### **Измерение энергии пучков.**

Исключительно важным в эксперименте КЕДР является прецизионное измерение энергии пучков ВЭПП-4М двумя методами, чего нет нигде в мире, – методом резонансной деполяризации (РД) и методом обратного комптоновского рассеяния (ОКР). Благодаря возможности прецизионного измерения энергии пучка в ВЭПП-4М удалось сформировать конкурентную физическую программу экспериментов с детектором КЕДР при существенном проигрыше ВЭПП-4М в светимости по сравнению с другими коллайдерами, работавшими в этой области энергии. Метод РД был предложен и впервые реализован в ИЯФ в 1970-х годах. С тех пор он широко используется в ИЯФ и в других лабораториях мира. В его основе лежит прецизионное измерение частоты прецессии спина, он является наиболее точным методом абсолютной калибровки энергии пучка в  $e^+e^-$  накопителе, его точность  $10^{-6}$ . Для непрерывного мониторинга энергии пучка (точность  $3 \cdot 10^{-5}$ ) и его энергетического разброса (точность около 10%) применяется метод ОКР. Подробное описание измерения энергии приводится в 1-й части книги «Коллайдеры». Основные участники работ по измерению энергии пучков в эксперименте КЕДР: А.В. Богомягков, В.Е. Блинов, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, Н.Ю. Мучной, М.В. Стручалин, Г.М. Тумайкин, А.Г. Шамов.

**Моделирование.** Для моделирования работы детектора КЕДР был разработан пакет программ моделирования KEDRSIM. Он написан на основе пакета GEANT 3.21 из библиотеки программ ЦЕРН и содержит подробное описание блоков вещества детектора, а также подпрограммы оцифровки сигналов с учетом особенностей работы системы сбора данных для каждой из подсистем детектора. Результатом работы пакета являются данные в том же формате, что и в эксперименте. Кроме того, пакет позволяет записывать дополнительную информацию о взаимодействии рождающихся в детекторе частиц с веществом, что помогает при анализе экспериментальных данных. Первичное моделирование включает около 50 различных генераторов событий: множественного рождения адронов, распадов  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi(3770)$ , баба-рассеяния, рождения пар лептонов в  $e^+e^-$  аннигиляции, двухфотонного рождения лептонов и адронов и ряд других.

На основе библиотеки классов ROOT разработана среда анализа данных эксперимента и моделирования, а также программа просмотра событий. Эта программа используется при наборе экспериментальных данных, для просмотра записанных событий эксперимента и моделирования, при их анализе.

Основной вклад в организацию моделирования детектора КЕДР внесли Е.М. Балдин, В.М. Малышев, Е.А. Кравченко, И.В. Овтин, Т.А. Пурлац, А.М. Сухарев, В.А. Таюрский, К.Ю. Тодышев, А.Г. Шамоу, В.И. Юрченко, С.И. Эйдельман.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С начала экспериментов (2002 год) и по настоящее время (2017 год) детектор работает в области энергий  $\sqrt{s}=2-4$  ГэВ в системе центра масс. После завершения программы экспериментов при низкой энергии запланирован переход в область выше  $\sqrt{s}=4$  ГэВ, где наряду с событиями  $e^+e^-$  аннигиляции также будут активно изучаться двухфотонные процессы.

Эксперименты с детектором КЕДР включают: 1) измерения масс и других параметров элементарных частиц; 2) измерение сечения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны (измерение  $R$ ) и поиск узких резонансов; 3) изучение двухфотонных процессов.

Область энергий до  $\sqrt{s}=4$  ГэВ содержит очень богатую физику, так как здесь находится семейство  $\psi$ -мезонов и рождаются  $D$ -мезоны, содержащие очарованные кварки (чарм или  $c$ -кварки), а также  $\tau$ -лептоны. Исследования свойств этих частиц, открытых в середине 1970-х годов, активно ведутся в ряде лабораторий на существующих ускорителях и планируется проводить, в частности, на будущих  $c$ - $\tau$  фабриках.

Метод измерения параметров частиц и резонансов основан на подгонке экспериментальных сечений, полученных при ряде энергий коллайдера, к теоретической кривой, описывающей зависимость от энергии сечения изучаемого процесса. Измеряемые величины являются параметрами теории и находятся из подгонки данных. Для того чтобы сопоставить экспериментальные точки и теорию, используется моделирование детектора, воспроизводящее с возможной точностью отклик

систем детектора на изучаемые процессы. Из обработки моделирования получают эффективность регистрации изучаемых и фоновых процессов.

### Измерение параметров $J/\psi$ -мезона

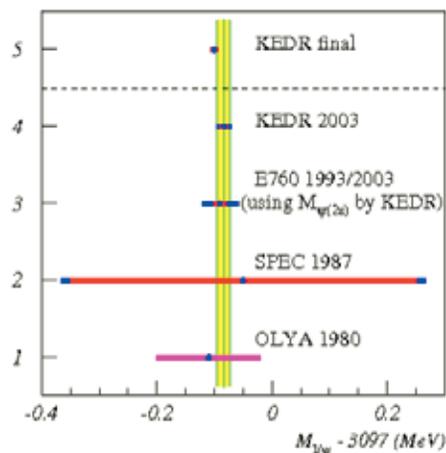
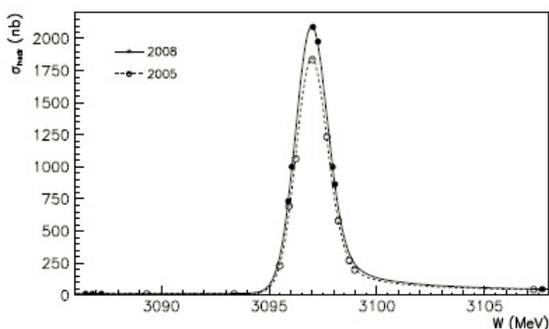
На 2017 г. КЕДРом были опубликованы измерения 8 параметров  $J/\psi$ . Они представлены в таблице 1 ( $\Gamma$  – ширина,  $B$  – вероятность распада). Большинство измерений определяют значения, приводимые в таблицах PDG [2]. Метод измерения масс узких резонансов подробно описан в [3,4]. В 2014 году были опубликованы результаты сравнения вероятностей распада  $J/\psi$  на электрон-позитронные и мюонные пары с точностью лучше 0,7% [6]. В 2015 году был опубликован окончательный результат, в котором с лучшей в мире точностью была измерена масса  $J/\psi$ -мезона (данные набраны в 2005-м и 2008 гг.) [4]. Прецизионное измерение масс  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  играет исключительно важную роль для экспериментов на  $e^+e^-$  коллайдерах, так как значения масс задают реперы на шкале энергий в этой области.

Таблица 1.

### Измерения параметров $J/\psi$ в эксперименте КЕДР/ВЭПП-4М

№	Параметр	Значение	Работа, год	Точность (%)
1	Масса	$3096,900 \pm 0,002 \pm 0,006$ МэВ	[4], 2015	$2 \cdot 10^{-4}$
2	$\Gamma_{ee} \times B_{ee}$	$332,3 \pm 6,4 \pm 3,8$ эВ	[5], 2010	2,2
3	$\Gamma_{ee} \times B_{\mu\mu}$	$331,8 \pm 5,2 \pm 6,3$ эВ	[5], 2010	2,5
4	$\Gamma_{ee}$	$5,51 \pm 0,11$ кэВ	[14], 2017	2,0
5	$\Gamma_{tot}$	$92,3 \pm 1,9$ кэВ	[14], 2017	2,1
6	$\Gamma_{ee} \times B_{hadr}$	$4,839 \pm 0,046 \pm 0,082$ кэВ	[14], 2017	1,9
7	$\Gamma_{\psi\psi}$	$2,98 \pm 0,18^{+0,15}_{-0,33}$ кэВ	[9], 2014	12,6
8	$\Gamma_{ee}/\Gamma_{\mu\mu}$	$1,0022 \pm 0,0044 \pm 0,0048$	[6], 2014	0,65

Ниже на рисунке показаны результаты эксперимента КЕДР/ВЭПП-4М и сравнение измеренной массы  $J/\psi$ -мезона с данными других экспериментов.



**Рис. 9.** Измерение массы  $J/\psi$ . Слева: наблюдаемое сечение  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ . Справа: массы  $J/\psi$ -мезона, которые были измерены в различных экспериментах. Горизонтальная линия характеризует полную ошибку измерения, центральная ее часть соответствует систематической неопределенности. Вертикальная полоса представляет среднемировое значение 2014 года. Измерения ниже пунктирной линии использовались до 2015 г. PDG для получения среднего значения

### Измерение параметров $\psi(2S)$ -мезона

На 2017 г. опубликованы измерения 6 параметров (см. таблицу 2). Большинство измерений относится к числу лучших в таблицах PDG [2]. Данные по массе были получены в результате обработки трех сканирований области  $\psi(2S)$ -мезона, выполненных в 2004-2006 гг. Для измерения  $\Gamma_{ee} \cdot B_{\mu\mu}$  использовался интеграл светимости более  $6,5 \text{ пб}^{-1}$ , набранный в 2005-2010 гг., содержащий около 4 миллионов  $\psi(2S)$  [17].

Таблица 2.

Результаты измерений параметров  $\psi(2S)$

№	Параметр	Значение	Работа, год	Точность (%)
1	Масса	$3686,099 \pm 0,004 \pm 0,009 \text{ МэВ}$	[4], 2015	$2,7 \cdot 10^{-4}$
2	$\Gamma_{ee}$	$2,282 \pm 0,015 \pm 0,038 \pm 0,021 \text{ кэВ}$	[7], 2012	2,0
3	$\Gamma_{tot}$	$296 \pm 2 \pm 8 \pm 3 \text{ кэВ}$	[7], 2012	3,0
4	$\Gamma_{ee} \times B_{hadr}$	$2,233 \pm 0,015 \pm 0,037 \pm 0,020 \text{ кэВ}$	[7], 2012	2,0
5	$\Gamma_{ee} \times B_{\mu\mu}$	$19,4 \pm 0,3 \pm 0,4 \text{ эВ}$	[17], 2017	2,5
6	$\Gamma_{ee} \times B_{\tau\tau}$	$9,0 \pm 2,6 \text{ эВ}$	[11], 2007	29

### Измерение параметров $\psi(3770)$

В этом эксперименте было выполнено 3 сканирования области  $\psi(3770)$  в 2004–2006 гг. и определены основные параметры этого резонанса (работа [8], 2012 г.). В анализе была учтена интерференция  $\psi(3770)$ -резонанса с подложкой, как это стало общепринятым в последнее время. Считалось, что основная часть сечения в области  $\psi(3770)$  определяется суммой вкладов векторных резонансов  $\psi(2S)$  и  $\psi(3770)$ , распадающихся в пару D-мезонов, и постоянного слагаемого. Подгонка экспериментальных точек дает 2 значения электронной ширины. Из них выбрано то, которое ближе всего к предсказаниям теории. В 2017 г. опубликована работа [10], где выполнена совместная обработка данных экспериментов KEДР, BaBar, Belle, BES-II и CLEO. Полученные в результате параметры  $\psi(3770)$  имеют существенно лучшую точность, чем в работе KEДРа [8]. Они показаны в таблице 3.

Таблица 3

Результаты измерений параметров  $\psi(3770)$

№	Параметр	Значение	Работа, год	Точность (%)
1	Масса	$3779,8 \pm 0,6 \text{ МэВ}$	[10], 2017	$1,6 \cdot 10^{-2}$
2	$\Gamma_{ee}$	$196 \pm 18 \text{ эВ}$	[10], 2017	9,2
3	$\Gamma_{tot}$	$25,8 \pm 1,3 \text{ МэВ}$	[10], 2017	5
4	$B_{nDD}$	$0,164 \pm 0,049 \text{ МэВ}$	[10], 2017	29

### Сечение нерезонансного рождения пары D анти-D

Это сечение получено в ходе обработки эксперимента по изучению  $\psi(3770)$ -мезона. Для нерезонансного рождения пары D анти-D вблизи  $\psi(3770)$  было получено, как и для  $\Gamma_{ee}$ , два результата. Ниже приведено сечение, соответствующее наиболее вероятному значению  $\Gamma_{ee}$  [8]:

$$\sigma_{DD}^{NR} = 1.4 \pm 0.7_{-0.2-0.2}^{+0.1+0.3} \text{ нб.}$$

### Измерение параметров $\eta_c$

Масса и полная ширина  $\eta_c$  были получены в ходе обработки эксперимента по изучению радиационного распада  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$ . События этого распада были выделены из инклюзивного спектра  $J/\psi \rightarrow \gamma X$ . Масса и ширина  $\eta_c$  получены в результате подгонки этого сигнала теоретической кривой (см. таблицу 4).

Таблица 4.

### Измерение параметров $\eta_c$

№	Параметр	Значение	Работа, год	Точность (%)
1	Масса	$2983,5 \pm 1,4_{-3.6}^{+1.6}$ МэВ	[9], 2014	0,13
2	$\Gamma_{\text{tot}}$	$27,2 \pm 3,1_{-2.6}^{+5.4}$ МэВ	[9], 2014	17

### Измерение массы $\tau$ -лептона

Эксперимент КЕДР-ВЭПП-4М по измерению массы  $\tau$ -лептона был выполнен в 2007–2009 гг. До этого эксперимента значение массы  $\tau$ -лептона в таблицах PDG практически полностью определялось одним измерением детектора BES в пороговом эксперименте 1992 года, точность которого представляется завышенной. Поэтому такое измерение было актуальным, в частности, для проверки принципа лептонной универсальности. Принцип лептонной универсальности является одним из основных постулатов Стандартной модели: он утверждает, что имеет место равенство констант взаимодействия  $g_e = g_\mu = g_\tau$ .

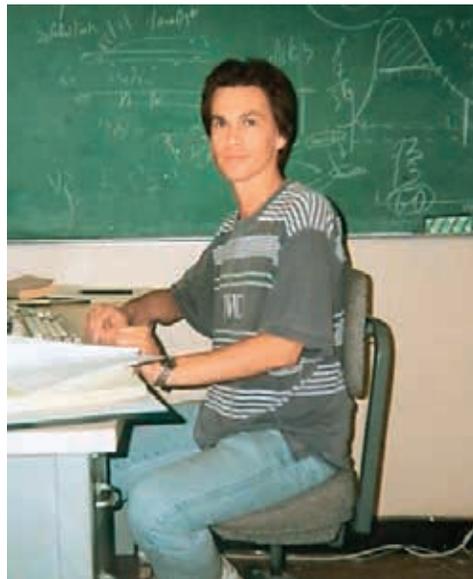
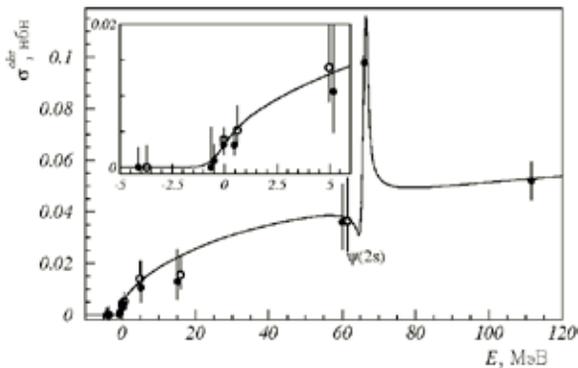
Один из способов проверки принципа лептонной ( $\mu$ - $\tau$ ) универсальности состоит в проверке соотношения

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = 0.9996 \frac{t_\mu}{t_\tau} \mathcal{B}(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau) \frac{m_\mu^5}{m_\tau^5} = 1,$$

которое должно выполняться с точностью, допускаемой ошибками входящих в него физических величин. Основную неопределенность при вычислении этого соотношения вносят ошибки параметров  $\tau$ -лептона:  $\mathcal{B}$  – вероятности распада  $\tau$ -лептона на электрон и 2 нейтрино, а также времени жизни и массы  $\tau$ -лептона. Уточнение этих величин в экспериментах позволяет проверить указанное соотношение на новом уровне точности.

Метод измерения массы  $\tau$ -лептона состоял в поиске скачка в сечении  $e^+e^-$  аннигиляции при изменении энергии столкновения, обусловленного открытием канала рождения пар  $\tau^+\tau^-$ . Энергия пучка, при которой наблюдается скачок, соответствует массе  $\tau$ -лептона. Разброс энергии пучков ВЭПП-4М в системе центра масс, а также ряд других эффектов приводят к сглаживанию скачка сечения на пороге (см. рисунок 10).

Эксперимент детектора КЕДР состоял из двух прохождений пороговой области с набором интеграла светимости 6,7 и 8,5 обратных пикобарн в диапазоне энергии пучка 1772–1889 МэВ. Важную роль при этом



**Рис. 10.** Слева: наблюдаемое в эксперименте КЕДР сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  в зависимости от  $E=E_{\text{beam}}-1777$  МэВ и теоретическая кривая; на вставке – область вблизи порога. Справа: В.Е. Блинов во время работы в СЛАКе в группе детектора ВаВаг

играло точное измерение энергии пучка коллайдера, которое выполнялось методом резонансной деполяризации.

Для получения массы  $\tau$ -лептона измеренное число событий  $\tau^+$  и  $\tau^-$  в 9 точках по энергии в первом сканировании и в 11 точках во втором подгонялось теоретической кривой. Итоговое значение массы  $\tau$ -лептона в эксперименте КЕДР было получено при совместной подгонке статистики двух сканирований и на момент публикации (2007 г.) имело лучшую в мире точность [11]. Позднее это измерение было уточнено [3].

### Измерение масс D-мезонов

Измерение масс D-мезонов основывалось на анализе событий процесса

$$e^+e^- \rightarrow D\bar{D},$$

набранных вблизи порога рождения  $\psi(3770)$ , с эксклюзивной реконструкцией одного из D-мезонов. Точное измерение энергии методом резонансной деполяризации позволило провести анализ статистики без применения идентификации частиц. D-мезоны реконструировались в распадах  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  и  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  + зарядово-сопряженные.

Инвариантная масса D-мезона может быть вычислена как

$$M_D = \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i\right)^2},$$

Здесь используется то, что в распаде  $\psi(3770)$  рождаются два D-мезона с одинаковой массой. Энергия каждого равна  $W/2$  – половине суммарной энергии электрона и позитрона в СЦМ (с точностью до радиационных поправок). Такой метод позволяет значительно улучшить точность реконструкции массы D-мезона по сравнению с вычислением энергии из импульсов продуктов распада. Было восстановлено около 100 событий  $D^0$  и 110 событий  $D^\pm$ . Полученные массы D-мезонов представлены в таблице 5.

Таблица 5.

### Измерение масс D-мезонов

	Параметр	Значение	Работа, год	Точность (%)
1	Масса $D^\pm$	$1869,53 \pm 0,49 \pm 0,20$ МэВ	[12], 2010	2,8
2	Масса $D^0$	$1865,30 \pm 0,33 \pm 0,23$ МэВ	[12], 2010	2,2

Измерение массы заряженного D-мезона до сегодняшнего дня является лучшим в мире по точности.

### Поиск узких резонансов в области $2E=1,85 - 3,1$ ГэВ

Детектором КЕДР на ВЭПП-4М был выполнен поиск узких резонансов в области  $\sqrt{s}=1,85 - 3,1$  ГэВ. В течение долгого времени в этой области энергий существовал предел, который был получен на коллайдере ADONE еще в 1978 г.

Новое ограничение на величину произведения электронной ширины узкого резонанса на вероятность его распада в адроны, для резонанса с массой в интервале 1,85 – 3,1 ГэВ [13]:

$$\Gamma_{ee} \times B(R \rightarrow \text{hadrons}) < 120 \text{ эВ}, \text{ с } 90\% \text{ уровнем достоверности.}$$

Эта величина ниже в 4 раза, чем результат ADONE.

### Измерение величины R

Величина R, равная отношению сечения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны с учетом радиоправок к сечению процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  в борновском приближении, имеет фундаментальное значение для расчетов в рамках Стандартной модели.

Прецизионное измерение величины R было выполнено в двух интервалах по энергии в системе центра масс:  $\sqrt{s} = 1,84 - 3,05$  ГэВ (ниже  $J/\psi$ ) [15] и  $\sqrt{s} = 3,12 - 3,72$  ГэВ (от  $J/\psi$  до  $\psi(2S)$ ) [16]. Результаты измерений представлены на рисунке 11. Они имеют лучшую в мире точность.

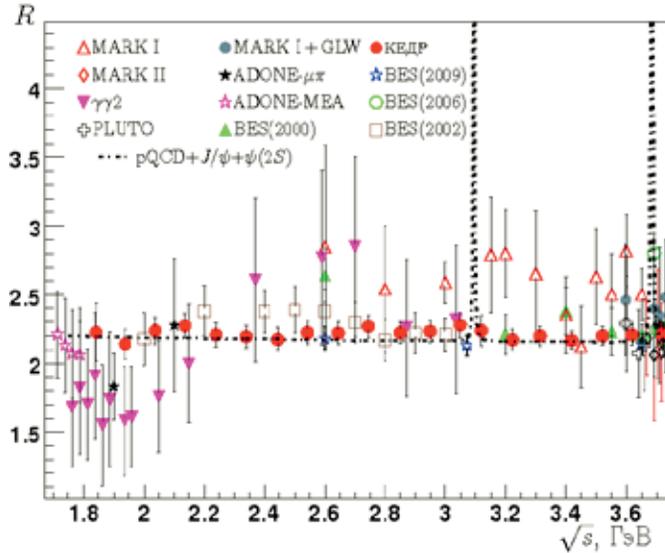
В интервале энергий  $\sqrt{s} = 1,84 - 3,05$  ГэВ достигнутая точность равна 3,9% или лучше для большинства точек при систематической ошибке 2,4%. В интервале,  $\sqrt{s} = 3,12 - 3,72$  ГэВ, точность измерения в большинстве точек лучше либо равна 3,3% при систематической ошибке 2,1%.

Средняя величина R в указанных интервалах приведена в таблице 6. Усреднение было сделано с учетом частичных корреляций между систематическими ошибками в различных точках по энергии. Измеренная величина R хорошо согласуется с расчетом в рамках теории возмущений КХД.

Таблица 6.

Измерение величины R детектором КЕДР

№	Энергия $\sqrt{s}$ (ГэВ)	Число точек	R(КЕДР)	R(pQCD)
1	1,84 – 3,05	13	$\langle R \rangle = 2,225 \pm 0,020 \pm 0,047$	$2,18 \pm 0,02$
2	3,12 – 3,72	7	$\langle R_{uds} \rangle = 2,189 \pm 0,022 \pm 0,042$	$2,16 \pm 0,01$



**Рис. 11.** Измерение R в эксперименте КЕДР на ВЗПП-4М. Величина R в зависимости от энергии в с.ц.м., а также предсказания теории возмущений КХД и вклад узких резонансов в области энергий в СЦМ 1,84 – 3,72 ГэВ. Показаны пики резонансов J/ψ и ψ(2S)

### Двухфотонная физика

В 2016 году получены первые результаты по двухфотонной физике. Было измерено сечение двухфотонного рождения лептонов при энергии пучков 1777 МэВ. Отобранные события использовались для калибровки и проверки эффективности системы регистрации рассеянных электронов [18].

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее впечатляющим результатом экспериментов являются измерения масс J/ψ и ψ(2S), которые сравнивались по точности с измерениями масс π-мезонов (см. таблицу 7). Эти измерения входят в десятку лучших измерений масс элементарных частиц. Эксперименты с детектором КЕДР на ВЗПП-4М, обработка данных и публикация результатов продолжаются. Экспериментальная программа детектора КЕДР на ближайшие годы включает измерение сечения аннигиляции e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> в адроны в области энергии выше  $\sqrt{s} = 4$  ГэВ, измерение масс и лептонных ширин Υ-мезонов, эксперименты по двухфотонной физике и ряд других.

Таблица 7.

**Точность измерения масс элементарных частиц  
(на 2017 г.)**

№	Частица	Точность измерения, $dM/M \times 10^6$	Примечание
1	$e^\pm$	0,0061	PDG-2016
2	p	0,0064	PDG-2016
3	n	0,0064	PDG-2016
4	$\mu^\pm$	0,022	PDG-2016
5	J/ $\psi$	2,0	КЕДР/ВЭПП-4М
6	$\pi^\pm$	2,1	PDG-2016
7	$\psi(2S)$	2,7	КЕДР/ВЭПП-4М
8	$\pi^0$	4,4	PDG-2016

Работы участников эксперимента КЕДР были отмечены рядом премий и наградами. В 2008 г. проф. А.П. Онучину была присуждена премия Академии наук России имени П.А. Черенкова за цикл работ «Детекторы с черенковскими счетчиками в экспериментах на встречных пучках». В 2009 г. кандидатам физ.-мат. наук И.Б. Николаеву и К.Ю. Тодышеву была присуждена медаль РАН с премией для молодых ученых РАН за работу «Прецизионное измерение массы тау-лептона». В 2012 г. Премия Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых была присуждена кандидатам физ.-мат. наук К.Ю. Тодышеву (КЕДР) и Ф.В. Игнатову (КМД-3) за цикл работ по исследованию свойств элементарных частиц на встречных электрон-позитронных пучках.

В заключение следует сказать, что за 3 десятилетия строительства детектора КЕДР и экспериментов с детектором в этих работах принимало участие очень большое количество сотрудников экспериментальных лабораторий и других подразделений ИЯФ, и далеко не все они были упомянуты выше и показаны на фотографиях. Без упорного, многолетнего труда и мастерства многих сотрудников Института была бы невозможна реализация такого уникального проекта, каким является эксперимент с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М.

Подробное описание детектора и основные результаты экспериментов по измерению масс частиц опубликованы в работах [1,3]. В публикациях [4-17] приведены подробности экспериментов с детектором КЕДР, в которых были получены приведенные в статье результаты.

По работам, полностью или частично связанным с экспериментами с детектором КЕДР на ВЭПП-4М, многие сотрудники ИЯФа защитили кандидатские диссертации, а некоторые – докторские диссертации. Эти диссертации перечислены в конце статьи.

На рис. 12 – команда КЕДРа перед детектором (2008 г.). На рис. 13 – участники эксперимента КЕДР рядом с детектором и наверху детектора (2012 г.).



**Рис. 12.** Команда КЕДРа перед детектором в 2008 г. (далеко не вся).  
**1-й ряд:** В.С. Бобровников, И.Б. Николаев, А.А. Осипов, В.Г. Присекин, И.Н. Попков. **2-й ряд:** В.М. Малышев, А.В. Бобров, А.В. Тарков, В.А. Таюрский, В.Е. Блинов, А.К. Барладян, О.Л. Резанова, А.А. Талышев, В.И. Тельнов, Р.Г. Снопков. **3-й ряд:** Д.В. Бондарев, И.В. Бедный, А.Г. Шамов, К.Ю. Тодышев, А.О. Полуэктов, И.О. Орлов, А.С. Старостин, Д.А. Максимов, С.В. Павлючено, А.Н. Грехов, М.А. Елфимов

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Анашин и др. (коллаборация КЕДР). Детектор КЕДР. ЭЧАЯ 44(2013)1263-1345.
2. С. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40 (2016)100001.
3. Е.Б. Левичев, А.Н. Скринский, Ю.А. Тихонов, К.Ю. Тодышев. Прецизионное измерение масс элементарных частиц на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР. УФН 184(2014)75-88.
4. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Final analysis of KEDR data on  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  masses. Physics Letters B749(2015)50-56.
5. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $\Gamma_{ee} * B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$  and  $\Gamma_{ee} (J/\psi) * B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$ . Physics Letters B685(2010)134-140.
6. V.M. Aulchenko et al. (KEDR collaboration). Measurement of the ratio of the lepton widths  $\Gamma_{ee} / \Gamma_{\mu\mu}$  for the  $J/\psi$  meson. Phys. Lett. B731(2014)227-231.



**Рис. 13.** Команда детектора КЕДР (не вся). **Стоят около детектора:**

1-й ряд – В.Е. Блинов, Ю.А. Тихонов, А.П. Онучин, М.А. Елфимов, А.И. Воробьёв;  
 2-й ряд – Б.А. Шварц, В.А. Таюрский, А.Г. Шамов, Е.А. Кравченко, М.Ю. Барняков;  
 3-й ряд – А.В. Чегодаев, А.П. Носов, А.А. Талышев, С.Н. Есин; 4-й ряд – А.А. Турбина, С.В. Карпов, С.А. Кононов, А.Л. Масленников, А.И. Шушаро, А.С. Старостин;  
 5-й ряд – Р.Г. Снопков, В.А. Родякин, А.Н. Грехов, В.Н. Кудрявцев, А.А. Бороденко. **Наверху детектора:** сидят – И.А. Куянов, А.М. Сухарев, Д.В. Корда, И.В. Овтин, А.В. Тарнов, В.В. Носов. **Стоят:** 1-й ряд – В.Ф. Куликов, И.О. Орлов, Д.А. Максимов, И.Б. Николаев, Д.Ю. Шапошников, А.К. Барладян, 2-й ряд – К.Ю. Тодышев, А.Ю. Барняков, А.В. Быков, Н.В. Плюснин. 2012 г.

7. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of main parameters of the  $\psi(2S)$  resonance. *Physics Letters B* 711(2012)280-291.

8. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $\psi(3770)$  parameters. *Physics Letters B* 711(2012)292-300.

9. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$  decay rate and  $\eta_c$  parameters at KEDR. *Physics Letters B* 738(2014)391-396.

10. A.G. Shamov, K.Yu. Todyshev. Analysis of BaBar, Belle, BES-II, CLEO and KEDR data on  $\psi(3770)$  line shape and determination of the resonance parameters. *Physics Letters B. Volume 769*, 2017, pp. 187 – 190.

11. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurements of the  $\tau$  lepton mass at KEDR detector. *Письма в ЖЭТФ*, 85(2007)429-434.

12. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $D^0$  and  $D^+$  meson masses with the KEDR detector. *Physics Letters B* 686(2010)84-90.

13. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Search for narrow resonances in annihilation between 1.85 and 3.1 GeV with the KEDR Detector. Physics Letters B703(2011)543-546.

14. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $\Gamma_{ee}(J/\psi) * B_{\text{hadr}}(J/\psi)$  with KEDR detector. Будет опубликовано.

15. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of R between 1.84 and 3.05 GeV at the KEDR detector. Physics Letters B775 (2017)174.

16. V.V. Anashin et al. (KEDR collaboration). Measurement of  $R_{\text{uds}}$  and R between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector. Physics Letters B753 (2016) 533-541.

17. A.M. Sukharev for the KEDR collaboration. Measurement of  $\Gamma_{ee} * B_{\mu\mu}$  for  $\psi(2S)$  meson with KEDR detector. Talk at International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from  $\phi$  to  $\psi$ , 26–29 June 2017, Mainz, Germany.

18. O.L. Rezanova et al. (KEDR Collaboration), Calibration of the KEDR detector Tagging System with two-photon lepton pair production. JINST 12 (2017) 07034.

### КАНДИДАТСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Владимир Петрович Нагаслаев. Вершинная камера детектора КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1997 г.

2. Владимир Евгеньевич Блинов. Дрейфовая камера детектора КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1997 г.

3. Владимир Михайлович Малышев. Дельбрюковское рассеяние фотонов в кулоновском поле при энергии 140-450 МэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.

4. Сергей Владимирович Пелеганчук. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе жидкого криптона. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 1999 г.

5. Евгений Анатольевич Кравченко. Разработка азрогелевых черенковских счетчиков для  $e^+e^-$  коллайдеров. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2000 г.

6. Сергей Григорьевич Пивоваров. Сверхпроводящая магнитная система и жидкокриптоновый калориметр детектора КЕДР. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 2001 г.

7. Геннадий Эллиевич Пospelов. Пространственное разрешение электромагнитного калориметра на основе жидкого криптона. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2004 г.

8. Евгений Михайлович Балдин. Измерение произведения электронной ширины  $J/\psi$ -мезона на вероятность распада в лептоны. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2010 г.

9. Иван Борисович Николаев. Измерение энергии пучка ускорителя ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2012 г.

10. Корнелий Юрьевич Тодышев. Измерение параметров  $\psi(2S)$  и  $\psi(3770)$  мезонов. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2012 г.

11. Александр Константинович Барладян. Управление криогенным

комплексом детектора КЕДР. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 2015 г.

12. Александр Юрьевич Барняков. Измерение основных параметров системы черенковских счётчиков АШИФ детектора КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2015 г.

13. Алексей Рафаилович Бузыкаев. Разработка черенковских счётчиков АШИФ для детектора КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2017 г.

14. Виктор Сергеевич Бобровников. Выведенный пучок электронов комплекса ВЭПП-4М. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2017 г.

15. Вячеслав Викторович Каминский. Комптоновская калибровка системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2017 г.

### ДОКТОРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Борис Альбертович Шварц. Создание калориметров на основе кристаллов CsI и их применение в экспериментах на встречных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 2004 г.

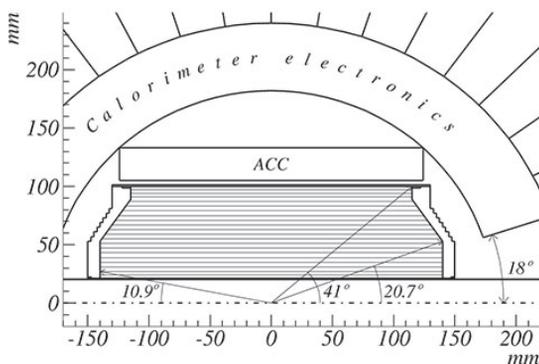
2. Владимир Евгеньевич Блинов. Измерение массы тау-лептона. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 2011 г.

3. Лев Исаевич Шехтман. Быстродействующие координатные детекторы высокого разрешения. Диссертация д.ф.-м.н. Новосибирск, 2012 г.

## 5.1. ДЕТЕКТОР СНД (2010–2017)

В 1999 году было принято решение о сооружении ВЭПП-2000. Для работы на новом коллайдере требовалась серьезная модернизация многих систем детектора СНД. Проект обновленного детектора был готов к концу 2000 года. Начались работы по модернизации, которые велись параллельно с обработкой данных, накопленных на ВЭПП-2М.

Старая трековая система СНД не вписывалась между фокусирующими соленоидами ВЭПП-2000. Была сделана новая, состоящая из девятислойной дрейфовой камеры и однослойной пропорциональной камеры, расположенных в общем газовом объеме (рис. 1). Пропорциональная камера используется для измерения координат треков вдоль проволочек с помощью катодных полосок. Новая камера позволила улучшить точности измерения параметров треков заряженных частиц.

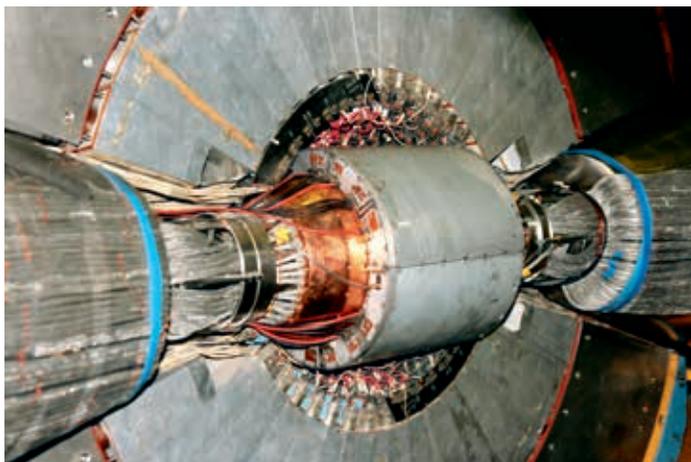


**Рис. 1.** Расположение дрейфовой камеры внутри СНД (показана в виде частей горизонтальных полосок). Снаружи камеры расположен аэрогелевый черенковский счетчик ACC

В диапазоне энергий 1,4 - 2,0 ГэВ, ранее недоступном на ВЭПП-2М, количество адронных реакций, в том числе содержащих каоны, сильно возрастает. Для выделения процессов с заряженными каонами для СНД была разработана система аэрогелевых пороговых черенковских счетчиков с показателем преломления 1,13 (рис. 2). При таком показателе преломления счетчик никогда не срабатывает от заряженных каонов, рождающихся на ВЭПП-2000, но, как правило, срабатывает при прохождении через него электронов, мюонов и пионов. Девять аэрогелевых счетчиков были собраны в виде цилиндра, окружающего трековую систему. Для экспериментов в области  $\rho$ -мезонного резонанса, где каоны еще не рождаются, был сделан клон этой системы из счетчиков с показателем преломления 1,05. Он позволяет отделять пионы от электронов, что особенно важно для измерения реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ .

Электроника детектора была переделана полностью. Основные задачи, которые решались при переделке, – это повышение надежности,

**Рис. 2.** Внешний вид системы черенковских счетчиков СНД. Показаны также внутренняя часть калориметра, торец дрейфовой камеры и фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000



уменьшение энергопотребления, увеличение грузочной способности. Новая электроника была разработана для ияфовского стандарта КЛЮКВА. Чтобы обеспечить увеличение скорости считывания событий, была сделана новая система считывания информации из модулей оцифровки и крейтов КЛЮКВА. Данные из крейтов теперь передаются в компьютер через Ethernet, а значительная часть интеллекта (подавление нулей и упаковка данных) была передана из управляющего модуля в модули оцифровки. В результате более чем на порядок, до 1 кГц, удалось увеличить скорость чтения событий с детектора. Моделирование СНД для ВЭПП-2000 было сделано на основе пакета Geant-4, что давало много новых возможностей в программном обеспечении для анализа экспериментальных данных.

Эксперименты на ВЭПП-2000 начались в 2010 году (рис. 3). Первые три сезона (2010–2012) изучался диапазон энергий 1,05–2,00 ГэВ. В этом диапазоне  $e^+e^-$  аннигиляция в адроны идет через рождение возбужденных векторных резонансов  $\rho(1450)$ ,  $\rho(1700)$ ,  $\omega(1420)$ ,  $\omega(1650)$  и  $\phi(1680)$ . Интервал энергий 1,4–2,0 ГэВ на ВЭПП-2М не исследовался. Главная цель этих экспериментов – детальное измерение адронных сечений, включая рождение нуклон-антинуклонных пар вблизи порога. За три года была накоплена интегральная светимость около  $32 \text{ пб}^{-1}$ . В 2013 году эксперименты были продолжены на низких энергиях, в основном, в области резонансов  $\rho(770)$  и  $\omega(782)$ . Было также проведено сканирование  $\phi$ -мезонного резонанса. Интегральная светимость, накопленная в 2013 году, составила  $25 \text{ пб}^{-1}$ .



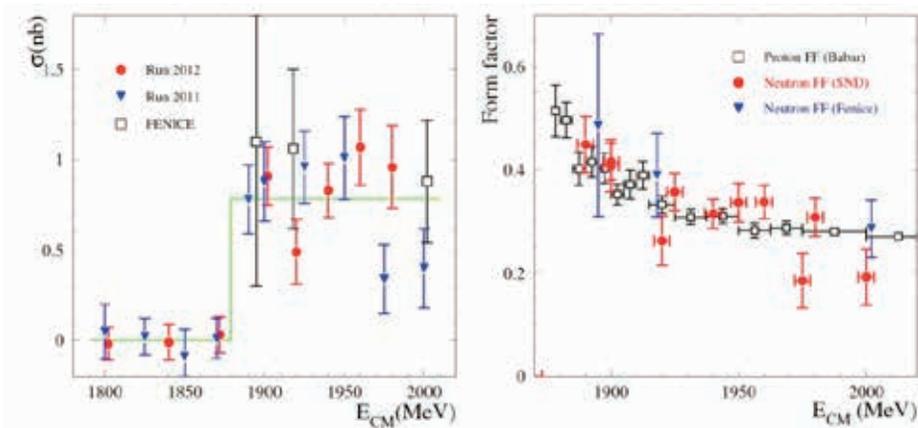
**Рис. 3.** Детектор СНД на ВЭПП-2000. Снаружи видны сцинтилляционные счетчики мюонного детектора

Летом 2013 года комплекс ВЗПП-2000 был остановлен на модернизацию. Эта остановка использовалась для улучшения электроники и системы сбора данных. Эта модернизация дала увеличение скорости считывания событий практически до 3 кГц.

В конце 2016 года набор данных возобновился с модернизированным комплексом ВЗПП-2000 и новым инжекционным комплексом. До летней остановки (2017 г.) набор данных ведется в области энергии 1,5–2,0 ГэВ.

Параллельно ведется обработка ранее записанных данных. Отметим наиболее интересные из новых результатов:

1 – измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$  в пару нейтрон-антинейтрон с точностью на порядок выше прежнего результата. Форм-факторы нейтрона и протона оказались практически равными (рис. 4);



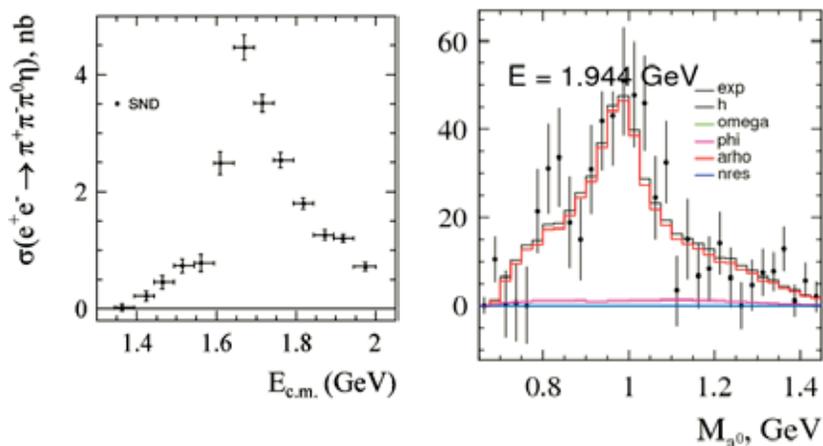
**Рис. 4.** Слева: измеренное на детекторе СНД сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$  в сравнении с данными эксперимента FENICE. Справа: нейтронный эффективный форм-фактор, измеренный СНД и FENICE в сравнении с протонным форм-фактором, измеренным в эксперименте BABAR

2 – обнаружено, что скачок в сечении рождения нуклонов на пороге совпадает по величине с провалом в сечении процесса рождения  $6 \pi$ -мезонов, так что в полном адронном сечении структуры на нуклонном пороге нет;

3 – при изучении множественного рождения мезонов обнаружен большой вклад процессов с рождением скаляра  $a_0(980)$ :  $e^+e^- \rightarrow \omega a_0, \rho a_0$  (рис. 5);

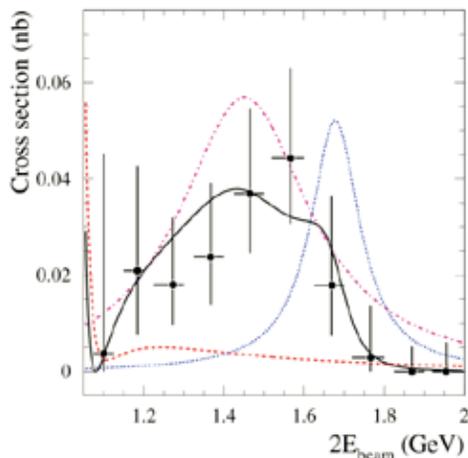
4 – впервые наблюдались магнитно-дипольные радиационные распады возбужденных векторных мезонов  $\rho(1450) \rightarrow \eta \gamma$  и  $\phi(1680) \rightarrow \eta \gamma$ , амплитуды которых интерферируют (рис. 6);

5 – впервые через 30 лет был улучшен результат эксперимента НД – был радикально понижен верхний предел на распад  $\eta' \rightarrow e^+e^-$ . Сегодня наблюдение этого редкого процесса на ВЗПП-2000 выглядит вполне реальным;



**Рис. 5.** Слева: первое измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ . Справа: спектр масс системы  $\pi^0\eta$ , в котором ясно видно доминирование состояния  $a_0(980)$

**Рис. 6.** Энергетическая зависимость сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ . Точки с ошибками – измерение СНД. Сплошная линия – аппроксимация сечения с учетом вкладов легких векторных мезонов  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$ ,  $\phi(1020)$  и их радиальных возбуждений  $\rho(1450)$  и  $\phi(1680)$ . Отдельно показаны вклады  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$  и  $\phi(1020)$  (пунктирная линия),  $\rho(1450)$  (штрихпунктирная линия) и  $\phi(1680)$  (точечная линия) без учета интерференции



6 – по данным СНД на ВЭПП-2М проведено прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ . В области  $\omega$ -мезонного резонанса наблюдается сильное противоречие между данными с ВЭПП-2М и KLOE по распадам  $\omega(782) \rightarrow \pi^0\gamma$ ,  $3\pi$ ;

7 – сделано самое точное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ , в котором доминирует промежуточное состояние  $\omega\pi^0$ . Этот процесс важен для расчета аномального магнитного момента мюона.

Начиная с 2013 г. по настоящий момент (апрель 2017 г.) по новым данным СНД на ВЭПП-2000 опубликовано 13 журнальных статей, в основном в Physical Review D. Обработка данных продолжается.

В модернизации детектора, проведении экспериментов и анализе данных участвуют физики С.И. Середняков, В.Б. Голубев, В.П. Дружинин, Е.В. Пахтусова, З.К. Силагадзе, Т.В. Димова, А.А. Король, М.Н. Ачасов, А.В. Бердюгин, К.И. Белобородов, С.В. Кошуба, А.В. Васильев, А.Г. Бог-

данчиков, Д.П. Коврижин, А.И. Образовский, А.А. Ботов, Д.А. Штоль, А.Г. Харламов, Л.В. Кардапольцев, К.А. Мартин, И.К. Сурин, А.Н. Шукаев, А.Ю. Барняков, Е.А. Кравченко, А.С. Купич, Е.В. Рогозина, К.В. Пугачев, Н.А. Мельникова. Электроникой детектора занимаются В.М. Аульченко, Ю.В. Усов, А.И. Текутьев и В.В. Жуланов. В сборке детектора, ремонте и создании новых систем принимали и принимают участие инженеры, механики и лаборанты: Г.А. Абрамов, В.М. Весенев, А.А. Сироткин, А.Ю. Кульпин, А.В. Михайлов, О.В. Текутьев. По результатам экспериментов на ВЭПП-2000 уже защищено 3 кандидатские диссертации А.Г. Богданчиковым, Л.В. Кардапольцевым и К.И. Белобородовым. На рисунке 7 приведена фотография части команды СНД рядом с детектором.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  in the center-of-mass energy range 1.07-2.00 GeV . Phys. Rev. D 90, 3, 032002 (2014).
2. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow n n \bar{n}$  at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider with the SND detector . Phys. Rev. D90, 112007 (2014).
3. А.Е. Образовский, S.I. Serednyakov. Energy dependence of  $e^+e^- \rightarrow b\pi$  and  $e^+e^- \rightarrow N N \bar{n}$  cross sections near the  $N N \bar{n}$  threshold. JETP Lett., v. 99, 363 (2014).
4. M.N. Achasov et al., Search for the  $\eta' \rightarrow e^+e^-$  decay with the SND detector. Phys. Rev. D 91, 092010, (2015).
5. V.M. Aulchenko et al., Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  cross section in the center-of-mass energy range 1.22-2.00 GeV with the SND detector at the VEPP-2000 collider. Phys. Rev. D 91, 052013 (2015).
6. M.N. Achasov et al., Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \omega \eta \pi^0$  in the energy range  $\sqrt{s} < 2$  GeV with the SND detector. Phys. Rev. D, 94, 032010, (2016).
7. M.N. Achasov et al., Updated measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  cross section with the SND detector. Phys. Rev. D 94, 11, 112001 (2016).
8. M.N. Achasov et al. Study of the reaction  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  with the SND detector at the VEPP-2M collider. Phys. Rev. D 93, 092001 (2016).
9. M.N. Achasov et al. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$  cross section below  $\sqrt{s}=2$  GeV. Phys. Rev. D 94, 092002 (2016).

## ДИССЕРТАЦИИ

1. Александр Георгиевич Богданчиков. Программное обеспечение системы сбора данных детектора СНД. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 2012 г.
2. Леонид Васильевич Кардапольцев. Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  в области энергии от 1,05 до 2,00 ГэВ. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2013 г.
3. Константин Иванович Белобородов. Изучение процессов  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K_L^0$  на детекторе СНД . Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2017 г.



**Рис. 7.** Часть команды СНД в зале коллайдера ВЭПП-2000 рядом с детектором:  
В. Дружинин, В. Весенев, А. Образовский, А. Сироткин, И. Сурин, З. Силагадзе, С. Середняков, М. Ачасов, Т. Димова, А. Кульпин, С. Кошуба, В. Голубев, А. Король, К. Мартин, О. Текутьев, Д. Коврижин, А. Васильев, К. Белобородов

И.Б. Логашенко

## 5.2. ДЕТЕКТОР КМД-3

В конце 90-х годов в ИЯФ было принято решение о строительстве ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000. Для проведения экспериментов в двух местах встречи пучков нового коллайдера предполагалось установить два детектора элементарных частиц: КМД-3 и СНД.

Сначала у детектора, который впоследствии стал называться КМД-3, было другое имя – КМД-2М. Связано это с тем, что оба детектора, которые разрабатывались для ВЭПП-2000, представляли собой модернизированные версии детекторов КМД-2 и СНД соответственно, которые успешно отработали на ВЭПП-2М. Детектором КМД-3 изначально назывался другой детектор, который предполагалось установить на фи-фабрику – коллайдер с очень высокой светимостью и энергией пучков около 1 ГэВ в системе центра масс, проект которого активно развивался в институте в начале 90-х годов. По разным причинам фи-фабрика в ИЯФ так и не была построена, и проект детектора для фи-фабрики оказался невостребованным. Когда к середине 2000-х годов стало ясно, что имя КМД-3 «свободно», его дали новому детектору на ВЭПП-2000, наследнику КМД-1 и КМД-2.

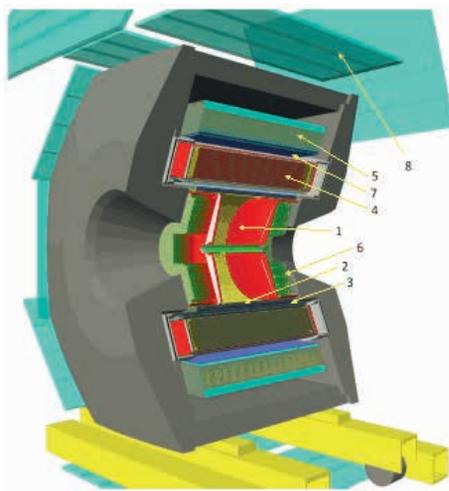
Одной из основных задач нового детектора было измерение сечений рождения адронов в процессе аннигиляции электронов и позитронов и, в частности, сечения рождения пары пионов. Эта же задача стояла и перед детектором КМД-2 и была успешно решена в экспериментах на ВЭПП-2М. В первую очередь такие измерения важны для интерпретации результатов измерения аномального магнитного момента мюона, выполненного в Брукхейвенской лаборатории (США) в конце 90-х – начале 2000-х годов. Величина аномалии с высокой точностью может быть как измерена, так и вычислена в рамках существующей теории – Стандартной модели. Если измеренное значение не согласуется с расчетным, это указывает на неполноту Стандартной модели. Оказывается, что точность вычисления аномалии определяется точностью измерения сечений рождения адронов в  $e^+e^-$  столкновениях именно в области энергий ВЭПП-2М/ВЭПП-2000. Исключительно интересным результатом последнего измерения в БНЛ оказалось то, что измеренное значение превышает расчетное на 3,5–4,3 стандартных отклонения. Это вызвало и продолжает вызывать большой интерес в мире к более точному измерению сечений рождения адронов. В Фермилаб (США) планируется провести новое измерение аномального магнитного момента мюона и улучшить точность приблизительно в 4 раза. Если не появится новых измерений сечений рождения адронов в  $e^+e^-$  столкновениях, то точность вычисления аномалии будет в 2–3 раза хуже, чем точность ее измерения.

Так как ВЭПП-2000 позволяет работать в более широком диапазоне энергий, чем ВЭПП-2М, вплоть до 2 ГэВ в системе центра масс, появилась возможность впервые провести измерение сечений рождения пар

протон-антипротон и нейтрон-антинейтрон в  $e^+e^-$  столкновениях. В области энергий ВЭПП-2000, т.е. в пороговой области рождения этих пар, эти сечения известны с низкой точностью. Для выполнения этих измерений в детектор была добавлена новая времяпролетная система, позволяющая идентифицировать относительно медленно летящие нейтроны.

Проект детектора КМД-3 был завершен к 2001 году. Создание детектора заняло почти десять лет, под общим руководством Б.И. Хазина. Хотя идеологически детектор был модернизированной версией КМД-2, практически все системы разрабатывались с нуля. От предшественника КМД-3 унаследовал только кристаллы ВГО и CsI, Z-камеру и часть электроники сбора данных, которая использовалась только в первые сезоны набора статистики. Детектор предназначался для работы в той же области энергий, что и КМД-2, в нем использовались близкие детекторные технологии, поэтому опыт создания и эксплуатации КМД-2 оказался исключительно полезным.

**Рис. 1.** Схематическое изображение детектора КМД-3 (слева):  
 1 – дрейфовая камера;  
 2 – Z-камера;  
 3 – сверхпроводящий соленоид;  
 4 – цилиндрический LXe калориметр;  
 5 – цилиндрический CsI калориметр; 6 – торцевой ВГО калориметр;  
 7 – времяпролетная система; 8 – мюонная система. Детектор в сборе на комплексе ВЭПП-2000 (справа)



Внешний вид детектора показан на рисунке 1. Системы детектора обычно описывают в том порядке, в котором их пролетает частица, рожденная в центре детектора. Треки заряженных частиц регистрируются дрейфовой камерой (1), окружающей место встречи пучков электронов и позитронов. Для КМД-3 было очень важно одновременно добиться двух важных характеристик системы: высокого пространственного разрешения и высокой эффективности реконструкции треков частиц, вылетающих не из центра детектора. Эти требования определили структуру камеры: чувствительный объем равномерно заполнен 1218 одинаковыми шестигранными ячейками с радиусом около 1 см, в центре которых натянута сигнальная проволочка, а по границам – полевые проволочки. Сигнальные проволочки выполнены из вольфрамо-ренийевого сплава. Сигнал с проволочек считывается с двух сторон, и по отношению амплитуд можно измерить, где пролетела частица. Для того чтобы удерживать в натянутом состоянии такое большое число проволочек, фланцы

камеры должны быть достаточно прочными. При этом они не должны сильно искажать параметры частиц, которые пролетают через них, т.к. за фланцами дрейфовой камеры располагается следующая регистрирующая система – торцевой калориметр. Поэтому фланцы камеры сделаны из углепластика – современного композитного материала, применяемого, например, в авиационной промышленности.

Дрейфовая камера КМД-3 была создана группой под руководством Б.И. Хазина, в которую входили А.С. Попов, Д.А. Горбачев, Ф.В. Игнатов. Большой вклад в разработку программного обеспечения внесли А.Л. Сибиданов, А.В. Каравдина, Е.М. Громов. После начала работы детектора к работе с дрейфовой камерой подключились Е.А. Козырев и С.С. Грибанов. Основные конструктивные элементы камеры были изготовлены в Италии группой профессора Ф. Гранканьоло из Университета г. Лечче, перевезены в Новосибирск, где были натянуты проволочки. Помимо научных сотрудников большой вклад в изготовление внесли инженер И.Г. Снопков и лаборант В.М. Титов, который смог без единой ошибки распаять несколько тысяч кабелей, а также разработал и изготовил оборудование для проверки соединений и оснастку для транспортировки ДК вместе с кабелями.

Сразу за дрейфовой камерой расположена Z-камера (2) – двухслойная пропорциональная многопроволочная камера, спроектированная так, чтобы срабатывать с высокой эффективностью и малой задержкой после прохождения заряженной частицы. Эта система перешла на КМД-3 с КМД-2 после небольших переделок и полного обновления электроники. Очень важная функция Z-камеры – измерение с высокой точностью (0,3–0,7 мм) координаты частицы вдоль оси пучков (оси Z), для чего катоды камеры разбиты на тонкие полоски. Руководил всеми работами, связанными с Z-камерой, Г.В. Федотович, большой вклад внесли тогда еще студенты, а впоследствии молодые сотрудники А.Е. Рыжененков и Д.Н. Шемякин.

Вся трековая система помещена в однородное магнитное поле величиной 1,3 Тесла, создаваемое сверхпроводящим соленоидом (3) длиной 0,9 м и диаметром 0,7 м. Такая конфигурация очень распространена в детекторах элементарных частиц, она позволяет измерять импульс частиц по кривизне их траекторий. Конструкция соленоида значительно отличается от конструкции магнита КМД-2, в ней используются гораздо более технологически сложные решения. Основной упор при разработке сверхпроводящего магнита был сделан на то, чтобы на пути пролетающих через него частиц оказалось как можно меньше вещества. Цилиндрический каркас соленоида толщиной 4 мм выполнен из лёгкого алюминиевого сплава, вместо нержавеющей стали, использованной на КМД-2. На внешней и внутренней поверхностях каркаса проточены винтовые канавки, в которые вклеен сверхпроводящий кабель обмотки. Для того чтобы сверхпроводящий кабель не перегорал при срывах магнитного поля, обмотка соленоида шунтирована большим количеством латунных перемычек. Ввод и вывод тока в соленоид производится с помощью статического сверхпроводящего преобразователя, работа-

ющего по принципу выпрямителя. Большой опыт работы с подобным устройством был получен на КМД-2. При производстве соленоида произошел интересный казус: из-за ошибки рабочего винтовые канавки на обеих поверхностях обечайки были проточены в одну сторону. Возникла проблема: как уложить кабель в канавку, проточенную в противоположном направлении. Производство новой обечайки затянуло бы запуск системы не менее чем на год. Изящный и простой выход предложил Н.М. Рыскулов, и изготовление обмотки было завершено в срок.

Впервые в ИЯФ для охлаждения соленоида был использован высокотехнологичный способ косвенного охлаждения. На внешнюю и внутреннюю поверхности соленоида наклеены полосы из сверхчистого алюминия, обладающего высокой теплопроводностью при низкой температуре. Обмотка соленоида не омывается жидким гелием, как в КМД-2: гелий циркулирует только в медной трубке, которая припаяна к цилиндрическому каркасу соленоида на одном торце. Съём тепла с соленоида осуществляется за счет теплопроводности полос. Она настолько велика, что после охлаждения системы до рабочей температуры градиент температуры обмотки вдоль оси соленоида не превышает 0,3 К. Впервые такой способ охлаждения был предложен проф. А. Ямамото (КЕК, Япония) в конце 1980-х годов, он же предоставил сверхчистый алюминий для КМД-3.

Несмотря на внешнюю простоту, в системе охлаждения применено несколько нетривиальных технологий. Например, охлаждающая трубка на самом деле представляет собой коаксиальную линию: по внутренней трубке гелий из криостата опускается к соленоиду, во внешней трубке находится жидкий гелий и газообразный гелий, испарившийся в системе и возвращающийся обратно. Такой принцип разделения жидкого гелия и парожидкостной смеси обеспечивает циркуляцию жидкого гелия в криогенной системе. При разработке криогенной системы особое внимание уделялось тому, чтобы максимально использовать испарившийся гелий для охлаждения элементов конструкции. Газообразный гелий из криостата не выбрасывается в газгольдер, а пропускается по газопроводным трубкам, от которых охлаждаются два экрана самого криостата, экран сверхпроводящего преобразователя и внутренний экран соленоида. Это позволяет обеспечить динамическую температурную стабилизацию в системе: если теплоприток к жидкому гелию увеличивается, то это приводит к увеличению испарения гелия, а увеличившийся поток газа по трубкам приводит к более сильному охлаждению экранов, что в свою очередь приводит к уменьшению теплопритока и уменьшению испарения жидкого гелия.

Криогенная магнитная система была введена в постоянную эксплуатацию в 2010 году. В работе над криогенной магнитной системой принимал участие большой коллектив. Систему создавали молодые сотрудники А.В. Брагин, С.В. Карпов, А.А. Рубан, которым помогали многоопытные и заслуженные инженеры В.С. Охупкин и Ю.С. Попов. Значительная доля механических работ была выполнена Э.Э. Мархелем и В.Г. Варнаковым. Большую роль на этапах разработки, изготовления и испытаний сыграли

академик Л.М. Барков и представители детекторной команды В.П. Смахтин и Б.И. Хазин. В.С. Охапкин, В.Г. Варнаков и С.В. Карпов продолжают нести основную нагрузку в поддержании работоспособности системы, которая в настоящее время находится в активной эксплуатации.

В общем корпусе с соленоидом располагается калориметр на основе жидкого ксенона. Жидноксеноновый калориметр (4) по праву считается самой интересной и оригинальной подсистемой детектора КМД-3, работа над которой началась задолго до появления проекта самого детектора. Это единственный в мире полномасштабный калориметр на основе жидкого ксенона, работающий по принципу сбора зарядов ионизации. Заряженные частицы, пересекающие слои жидкого ксенона, создают ионизацию, величина которой пропорциональна энергии, теряемой частицей при торможении. Очищенный ксенон не связывает электроны ионизации и, если приложить внешнее электрическое поле, в зазоре между электродами возникает электрический ток. Измеряя величину заряда, осевшего на электродах, можно определить энергию элементарной частицы. Калориметры, основанные на этом принципе, имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными кристаллическими калориметрами. Благодаря тому, что чувствительный объем таких калориметров может обладать большей степенью сегментации, появляется возможность с высокой точностью определять точку конверсии фотона, измерять пространственное распределение энергии в ливне, а также реконструировать треки заряженных частиц. Среди благородных газов ксенон является наиболее привлекательным «рабочим телом» для такого типа систем, поскольку обладает сравнительно малой радиационной длиной (~2,9 см) и не содержит долгоживущих радиоактивных изотопов. Однако ксенон — весьма редкий элемент. При нормальных условиях 1000 м<sup>3</sup> воздуха содержат только 87 см<sup>3</sup> ксенона. Малая распространенность ксенона в природе и, как следствие, его высокая стоимость являются главными препятствиями на пути создания больших калориметров.

Жидкоксеноновый калориметр детектора КМД-3 состоит из корпуса, изготовленного из нержавеющей стали и заполненного жидким ксеноном, и набора цилиндрических электродов. Система электродов ЖК калориметра собрана из семи катодных и восьми анодных соосных цилиндров, разделенных по радиусу одинаковыми зазорами по 10,2 мм. На аноды подается напряжение величиной +1200 В, а катоды и корпус калориметра находятся под нулевым потенциалом. Все цилиндры изготовлены из фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, на поверхности которых профрезерована электродная структура: прямоугольные площадки на анодных цилиндрах и полоски на катодных цилиндрах. Соответствующие площадки со всех анодных цилиндров соединяются общим проводником и образуют «башню», ориентированную на место встречи пучков. Всего в калориметре 264 таких башни. Полное число полосковых каналов в калориметре составляет 2112. Токовые сигналы с анодов и катодов поступают на вход зарядочувствительных усилителей-формирователей, оцифровываются и затем передаются в систему сбора данных детектора КМД-3.

История создания калориметров на основе благородных газов в ИЯФ СО РАН насчитывает не одно десятилетие. Первые попытки работы с жидким ксеноном были начаты в кооперации с ФИАН П.К. Лебедевым (ИЯФ) и С.В. Муравьевым (ФИАН) в 1980-х годах. Эти работы показали, что основной проблемой на пути создания калориметра является получение жидкого ксенона высокой степени чистоты и последующее поддержание заданной чистоты в рабочем объеме. Параллельно с этим А.А. Гребенюк и Н.С. Баштовой вели работы по изготовлению газовых детекторов высокого давления на основе ксенона в экспериментах на СИ, где также требовалось получение чистого ксенона. По инициативе зав. лаб. 2.0 академика Л.М. Баркова эти работы были объединены, что позволило решить проблему очистки ксенона, подобрать нужные материалы для электродов и разработать концепцию электроники калориметра. В 1987 году был изготовлен прототип калориметра емкостью один литр, который подтвердил расчетные параметры.

Одновременно в институте шли работы по созданию большого калориметра на основе жидкого криптона для детектора КЕДР, для чего требовались десятки тонн этого газа. Криптон и ксенон выделяются из воздуха как побочные продукты при производстве кислорода для черной металлургии. Поставки ксенона шли параллельно с поставками криптона, и это в итоге позволило получить достаточное количество ксенона для создания калориметра. Вначале газы получали с предприятий Украины. В дальнейшем для получения достаточного количества газов ИЯФ СО АН выступил инициатором модернизации оборудования на Западно-Сибирском металлургическом комбинате, что позволило за несколько лет произвести достаточные объемы криптона и ксенона для фундаментальных научных исследований. Большую роль в организации взаимодействия института и промышленности сыграл Б.А. Свидлер.

Первый проект жидкоксенонного калориметра предполагал его использование в составе детектора на ф-фабрике, однако, когда стало понятно, что ф-фабрика строиться не будет, было решено создать калориметр для детектора КМД-3. Опыта создания таких систем в институте не было. Многого нужно было создавать с нуля.

Вспоминает руководитель работ А.А. Гребенюк:

*– Заводской ксенон содержал много примесей, а для получения сигналов достаточной амплитуды нужно в первую очередь добиться высокой степени чистоты ксенона. С этого мы и начали работу. Фактически первые несколько лет мы посвятили разработке системы очистки. Идея состояла в том, чтобы насытить газообразный ксенон водородом, нагреть в присутствии катализатора Ni-Cr и пропустить через молекулярное сито (цеолита NaA). В итоге мы добились концентрации электроотрицательных примесей в жидкости на уровне  $10^{-8}$ , что соответствует пробегу электронов ионизации 1,5–2 см. Прототип калориметра и электроники был готов в 1989 году. Последующие годы мы занимались проектированием и изготовлением основных элементов конструкции. Для изготовления электродов нужен был высокоточный фрезерный станок. В стране наступили непростые времена. Не хватало денег на выплату зарплат. Нависла*

*угроза продажи ксенона и закрытия проекта. В этой сложной ситуации ключевую роль сыграл чл.-корр. В.А. Сидоров, который взял на себя ответственность и выделил деньги на покупку уникального «импортного» станка, производимого в Украине. Станок оказался изумительным. Мы, правда, изрядно повозились в разработке технологии, но зато потом быстро за 3 месяца «накатали» все электроды. При этом общая длина фрезеровки составила порядка 100 км!*

Вспоминает ведущий инженер проекта Н.С. Баштовой:

*– Работа над калориметром не обходилась без казусов. В 2003 году мы начали производить пробные заливки калориметра на испытательном стенде. Во время заливки все шло хорошо, но когда криогенная система выходила на режим поддержания температуры, начинался неконтролируемый рост давления в калориметре, который невозможно было объяснить. Что мы только ни делали, каких умных гипотез ни выдвигали – все без толку. Так было потеряно полгода, пока наконец не додумались до простой вещи: шланг, идущий от криостата в калориметр, имел изгиб, образуя колено, в котором из-за повышенного теплопритока образовывалась паровая пробка. Эта пробка не давала ксенону свободно стекать в калориметр. Для решения проблемы достаточно было лишь немного приподнять шланг.*

В 2006 году в калориметре зарегистрировали первые треки космических частиц, и с 2010 года он успешно работает в составе детектора КМД-3. Большой вклад в создание калориметра и его эксплуатацию внесли Ю.Н. Пестов, В.И. Свердлов, П.Ю. Степанов, С.Г. Зверев, Л. Применко, К.Ю. Михайлов, А.В. Анисенков, Е.В. Кравченко, Л.Б. Эпштейн. Создание калориметра было бы невозможно без активной помощи представителей производства ИЯФ и конструкторского отдела М.Н. Егорычева, В.А. Свиридова, Г.С. Филимонова. При работе над калориметром помогли постоянные обсуждения похожих проблем с Ю.А. Тихоновым и В.С. Паниным – разработчиками жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР.

Толщина слоя ксенона, который должна пересечь частица, вылетающая из центра детектора, недостаточна для получения хорошего энергетического разрешения и высокой эффективности регистрации фотонов. Для достижения приемлемого разрешения потребовалось бы увеличить объем ксенона в 2,5–3 раза, что не представлялось возможным по финансовым соображениям. Поэтому снаружи жидкоксеронового калориметра установлен второй слой цилиндрического калориметра (5), сделанный из кристаллов CsI. Полная толщина активного вещества калориметра составляет 13,5 радиационных длин, что обеспечивает поглощение более 90% энергии фотонов с энергией до 1 ГэВ. С учетом большого положительного опыта работы CsI калориметра детектора КМД-2 в детекторе КМД-3 была сохранена компоновка системы и основные идеи конструкции, а также использована большая часть кристаллов предыдущего детектора. Так как калориметр теперь располагался дальше от центра детектора, для его изготовления потребовались дополнительные 256 кристаллов. К счастью, такое количество кристаллов было у нас в запасе со времени создания калориметра КМД-2.

Кроме того, оказалось, что рассеянные магнитные поля в области, где располагались ФЭУ, не пренебрежимы, как показывали ранее расчеты, из-за чего уменьшалось усиление ФЭУ и ухудшалась стабильность их работы, поэтому было решено в качестве фотоприемников использовать кремниевые фотодиоды с рабочей областью  $1 \times 2 \text{ см}^2$ .

CsI калориметр КМД-2 был полностью разобран, все кристаллы распакованы, проверены и заново отполированы. При этом оказалось, что, несмотря на десятилетнюю работу в составе детектора, подавляющее большинство кристаллов пригодны для дальнейшего использования. Затем каждый кристалл был обернут слоем пористого тефлона, являющегося диффузным отражателем, и пленкой алюминизированного лавсана для светоизоляции и экранирования. Благодаря опыту, полученному при создании калориметров WASA и Belle, удалось значительно увеличить эффективность светосбора счетчиков и улучшить однородность световых выходов. С помощью С.Г. Пивоварова и В.А. Игнатъева была разработана новая конструкция линейки и октанта калориметра. В 2007 году все октанты калориметра были собраны и в мае 2008 года установлены в детектор. Активное участие в этой большой работе принимали А.С. Кузьмин, Б.А. Шварц, Л.В. Днепровский, Д.А. Мильштейн, П.В. Кривенький, П.М. Васильев, А.А. Осипов, Д.А. Епифанов, В.Е. Шебалин, А.Н. Крилицын, В.С. Охупкин. Большой вклад в работы по эксплуатации, калибровке и ремонту CsI калориметра КМД-3 внесли Г.П. Разуваев и А.Л. Ерофеев. Нельзя не отметить большую поддержку этой работы заведующего лабораторией 3-3 А.Е. Бондаря и заместителя директора ИЯФ Ю.А. Тихонова.

Похожая ситуация сложилась и с торцевым калориметром (б) на основе кристаллов BGO, который близок по своей конструкции к аналогичной системе детектора КМД-2. Для его изготовления были использованы кристаллы, оставшиеся от КМД-2. Все блоки торцевого калориметра были разобраны, все кристаллы проверены, часть их была заменена на новые, изготовленные в ИНХ СО РАН по улучшенной технологии. Из-за наличия в месте расположения торцевого калориметра сильно неоднородного магнитного поля от фокусирующих соленоидов ВЭПП-2000 оказалось невозможно использовать в качестве фотоприёмников вакуумные фототриоды, которые применялись на КМД-2, поэтому фотоприемники были заменены на кремниевые фотодиоды с площадью чувствительной области  $1 \text{ см}^2$ . Также для калориметра была разработана полностью новая электроника. Кроме того, абсолютно новой системой в торцевом калориметре стала система температурной стабилизации, интегрированная в систему крепления калориметра в детекторе, которая позволяет поддерживать температуру калориметра в пределах  $\pm 1$  градуса. Все работы с калориметром велись командой под руководством Д.Н. Григорьева в составе Р.Р. Ахметшина, В.Ф. Казанина с привлечением инженеров и лаборантов как из лаборатории, так и из конструкторского отдела и экспериментального производства. Значительный вклад в разработку конструкции блоков торцевого калориметра внёс конструктор В.А. Игнатъев. Большую помощь в практическом изготовлении системы термостабилизации оказали В.С. Охупкин и Э.Э. Мархель. Большой вклад в разработку программного

обеспечения внес С.М. Царегородцев. В дальнейшем к команде присоединилась А.Е. Кузьменко.

Между двумя слоями цилиндрического калориметра расположена времяпролетная система (7), сделанная на основе тонких пластин из сцинтилляционной пластмассы. Эта система отсутствовала в первоначальном проекте детектора и была предложена в 2006 году. Схема расположения системы внутри калориметра очень необычна, но расчеты и моделирование показали, что она должна работать. Командой в составе Н.М. Рыскулова, Г.В. Федотовича, М.А. Никулина система была спроектирована в короткий срок и установлена в детектор к началу работы в 2010 году. Программное обеспечение для калибровки системы и анализа данных было разработано А.Е. Рыжененковым и А.Н. Амирхановым. Во время перерыва в работе детектора с 2013-го по 2016 год первоначальная времяпролетная система была заменена на новую, собранную из большего числа счетчиков меньшего размера, произведенных в ИТЭФ в лаборатории М.В. Данилова. В новых счетчиках применена современная методика регистрации света с помощью спектросмещающего волокна и кремниевых фотоумножителей. Более высокая гранулярность нового варианта системы позволила добиться лучшего временного разрешения и более высокой эффективности срабатывания. На этапе запуска к первоначальному коллективу подключились С.С. Грибанов и А.С. Попов.

Окружающая детектор мюонная система (8), разработанная под руководством А.И. Воробьева, также сделана на основе тонких пластин из сцинтилляционной пластмассы, однако для регистрации света в них используются традиционные фотоумножители.

Детектирующие системы детектора КМД-3 были оборудованы новой современной электроникой. Для каждой системы был разработан функционально полный набор аппаратуры – от предусилителей до узлов оцифровки и сбора данных. Молодой коллектив инженеров-электроников (А.А. Рубан, Ю.В. Юдин, А.Н. Козырев) разработал современную комплексную систему электроники, включающую в себя протокол связи, общую архитектуру блоков электроники, конкретную реализацию плат электроники для оцифровки сигналов дрейфовой камеры, плат триггера и т.д. Большую роль в этой работе играла внутриинститутская кооперация: ключевой элемент системы передачи данных, коммутатор-преобразователь от внутреннего протокола к Ethernet был разработан А.Н. Селивановым; плата оцифровки сигналов калориметров была разработана В.М. Титовым и В.М. Аульченко; универсальная плата обработки сигналов триггера была разработана А.А. Талышевым.

Программное обеспечение, разработанное для КМД-2, не могло быть использовано на КМД-3 – за десять лет произошло очень много изменений как в компьютерной инфраструктуре, так и в программных технологиях. Под руководством И.Б. Логашенко для КМД-3 была реализована совершенно новая система сбора данных. Большую роль при этом сыграли студенты физического факультета, в частности, Д.Ю. Биленко, И.Б. Лабутин, Е.А. Павлюков, А.С. Леонов – значительная часть элементов системы являлась их дипломными работами. При создании системы важ-

ную роль играл международный обмен опытом. Например, КМД-3 – один из первых детекторов, управление и слежение за которым производится с помощью веб-технологий. Прообраз подобной системы слежения был сделан в 2000 году для эксперимента g-2 в Брукхейвенской лаборатории (США), потом адаптирован для эксперимента MULAN (PSI, Швейцария), и затем новая версия была создана для КМД-3. В качестве основы системы сбора данных используется программный пакет MIDAS, который был разработан на эксперименте MEG (PSI, Швейцария), и взят оттуда для КМД-3.

КМД-3 является сложным детектором, производящим большие объемы экспериментальных данных. Для обработки набранной статистики потребовалось создать сложный комплекс программного обеспечения для реконструкции и анализа данных и уникальную инфраструктуру для организации вычислений. На момент начала работы детектора в ИЯФ не было достаточно централизованных компьютерных ресурсов для хранения данных с детектора и для их обработки, поэтому для нужд детектора был реализован вычислительный кластер и распределенная система хранения данных с использованием обычных рабочих компьютеров. После появления мощных компьютерных систем в ИЯФ и НГУ вычислительная инфраструктура детектора была модернизирована так, чтобы прозрачным для физиков образом использовать все доступные ресурсы – как собственный кластер, так и доступные суперкомпьютеры. Большой вклад в создание компьютерной инфраструктуры детектора и разработку программного обеспечения внесли В.Ш. Банзаров, А.С. Зайцев, А.В. Анисенков, С.А. Пирогов, С.Е. Гаязов, Ф.В. Игнатов, И.Б. Логашенко.

КМД-3 оказался очень успешным проектом, при работе над которым объединили свои усилия как опытные физики, так и молодые студенты, аспиранты и сотрудники. Опыт, полученный при работе на детекторе КМД-2, помог создать современный и фактически новый детектор КМД-3 в очень ограниченные сроки и начать эксперименты, как только в ВЭПП-2000 появились встречные электрон-позитронные пучки. Огромная работа при сборке и установке детектора проведена инженерами, механиками и лаборантами И.Г. Снопковым, В.С. Мельниковым, Э.Э. Мархелем, В.М. Титовым.

КМД-3 является действующим детектором. На момент подготовки этого текста детектор успешно отработал четыре сезона и продолжает набор данных. Было набрано более  $100 \text{ пб}^{-1}$  во всей области энергий, доступной на ВЭПП-2000. Это в несколько раз больше, чем интеграл светимости, набранный с детектором КМД-2 за все годы его работы. Активно ведется работа по анализу набранных данных, координируемая Е.П. Солодовым. Между набором данных и публикацией первого результата, сечения рождения шести заряженных пионов в  $e^+e^-$  столкновениях (левая нижняя картинка на рисунке 2), прошло всего около одного года. На данный момент опубликовано более десяти работ с новыми результатами, включая сечение рождения протон-антипротонных пар, получен целый ряд предварительных результатов. Благодаря наличию современной экспериментальной установки и активного и опытного коллектива физиков в ближайшие годы на КМД-3 ожидается получение целого ряда наиболее точных измерений в мире в области энергий ВЭПП-2000.

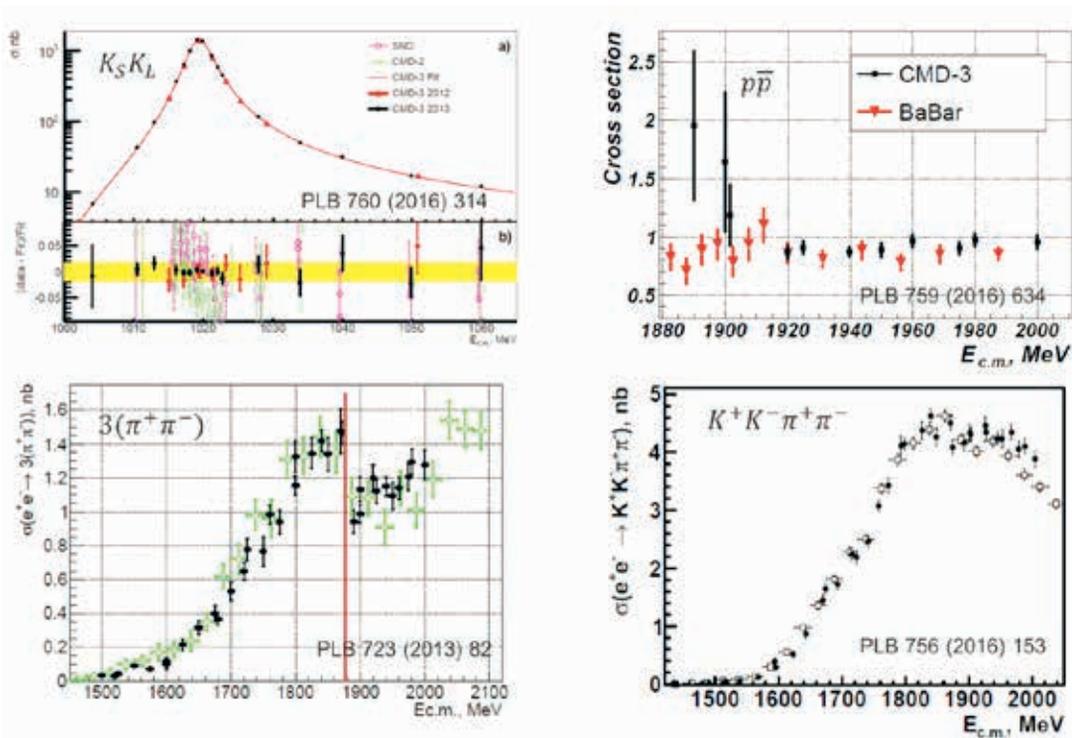
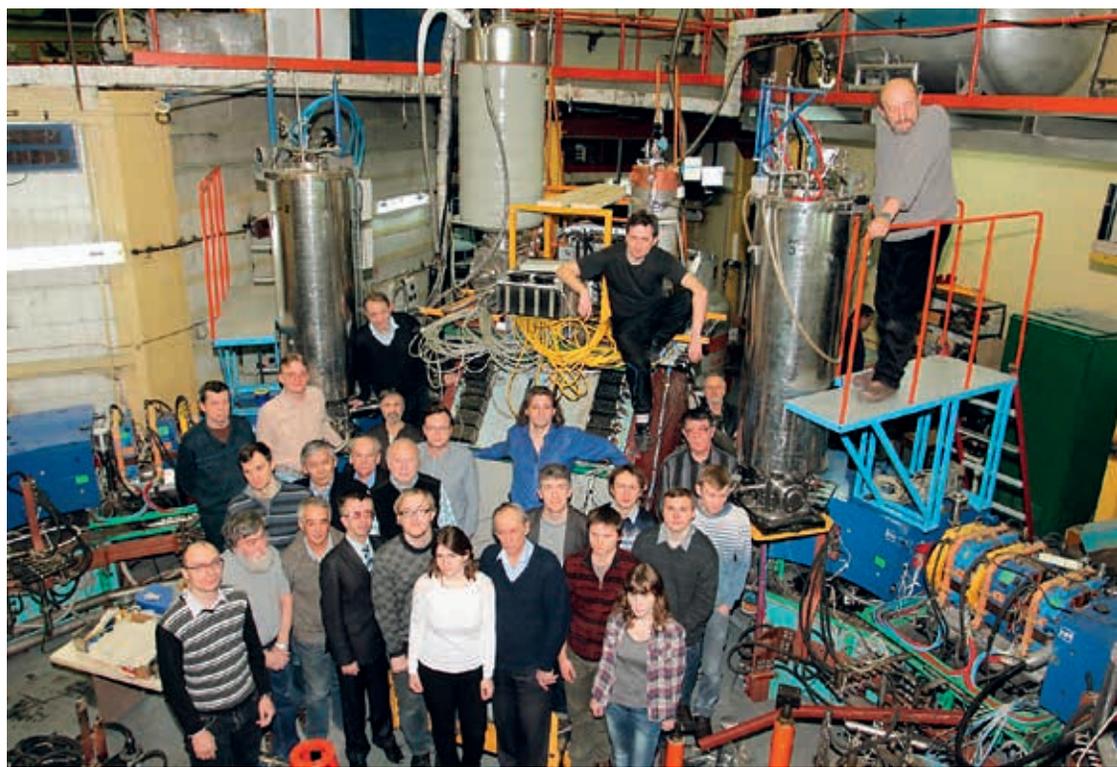


Рис. 2. Некоторые результаты, полученные детектором КМД-3 по данным, набранным в 2011–2012 гг. Показаны сечения в нб для процессов  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ ,  $p \text{ anti-}p$ ,  $3(\pi^+\pi^-)$ ,  $K^+K^-\pi^+\pi^-$  в зависимости от энергии  $E_{c.m.}$

## ЛИТЕРАТУРА

1. E.A. Kozyrev et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  in the center-of-mass energy range 1010-1060 MeV with the CMD-3 detector. arXiv:1710.02989 [hep-ex].
2. R.R. Akhmetshin et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  in the c.m. energy range 1394-2005 MeV with the CMD-3 detector. Phys. Lett. B773(2017)150.
3. R.R. Akhmetshin et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  in the c.m. energy range 920-1060 MeV with the CMD-3 detector. Phys. Lett. B768 (2017) 345.
4. E.A. Kozyrev et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  in the center-of-mass energy range 1004-1060 MeV with the CMD-3 detector at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider. Phys. Lett. B760 (2016) 314.
5. D.N. Shemyakin et al. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  cross section with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider. Phys. Lett. B756(2016)153.
6. R.R. Akhmetshin et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow p \bar{p}$  in the c.m. energy range from threshold to 2 GeV with the CMD-3 detector. Phys. Lett. B759(2016)634.



**Рис. 3.** Часть команды детектора КМД-3 на установке. Слева направо: А.Н. Козырев, В.Г. Варнаков, В.С. Охапкин, П.П. Кроковный, С.В. Карпов, Б.А. Шварц, В.Ш. Банзаров, П.А. Лукин, Ю.Н. Пестов, Ю.В. Юдин, Е.П. Солодов, Г.В. Федотович, А.А. Коробов, Ф.В. Игнатов, О.А. Коваленко, Н.С. Баштовой, А.А. Рубан, И.Б. Логашенко, В.Е. Шебалин, А.Л. Ерофеев, А.Е. Кузьменко, А.С. Попов, Н.М. Рыскулов, А.Е. Рыжененков, А.И. Воробьев, А.А. Гребенюк

7. R.R.Akhmetshin et al. Search for the process  $e^+e^- \rightarrow \eta(958)'$  with the CMD-3 detector, Phys. Lett. B740(2015)273.

8. R.R.Akhmetshin et al. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  in the c.m.energy range 1.5-2.0 GeV with the CMD-3 detector. Phys. Lett. B723(2013)82.

### ДИССЕРТАЦИИ

1. Алексей Владимирович Брагин. Тонкий сверхпроводящий соленоид для детектора КМД-3. Диссертация к.т.н. ИЯФ, Новосибирск, 2009 г.

2. Василий Евгеньевич Шебалин. Реконструкция фотонов и энергетическая калибровка цилиндрического калориметра детектора КМД-3. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2016 г.

3. Равель Равилович Ахметшин. Торцевой электромагнитный калориметр на основе кристаллов BGO для детектора КМД-3. Диссертация к.ф.-м.н. ИЯФ, Новосибирск, 2017 г.

## К ИСТОРИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФВЭ В ИЯФ

Первая вычислительная машина появилась в ИЯФ в 1965 г. Это было связано с началом экспериментов на ВЭП-1 и подготовкой к запуску ВЭПП-2, когда стало понятно, что для некоторых расчётов одной логарифмической линейкой не обойтись. Этой ЭВМ стала Минск-22, средняя мощность которой составляла 5-6 тысяч операций в секунду. В первых экспериментах на ВЭПП-2, которые начались в 1966 году, были использованы искровые камеры с оптическим выводом информации. Первая сотня тысяч фотографий послужила хорошим стимулом для ускорения работ по автоматизации их обработки.

Тогда в Дубне и в Протвино развивали именно направление обработки filmовой информации, но для В.А. Сидорова было очевидным, что наиболее перспективное направление автоматизации эксперимента – это организация непосредственной связи экспериментальной аппаратуры с ЭВМ. Подобная схема позволяет переложить на ЭВМ не только обработку результатов измерений, а и функции управления установкой и ходом эксперимента.

Первым шагом стала разработка искровых камер с памятью на ферритовых кольцах и специализированного контроллера, позволяющего считывать данные и выводить их на перфоленту. В 1968 году вывод на перфоленту был переделан в канал связи с ЭВМ Минск-22. В этих работах принимали участие С.Е. Бару, В.М. Попов и А.В. Романов.

Следующим шагом явилось создание системы хранения на базе цейсовских магнитофонов и буферной памяти емкостью 4096 слов, способной записывать экспериментальные данные независимо от ЭВМ. На самой Минск-22 в 1970 г. была установлена немного доработанная мониторная система с языком Фортран разработки ИФВЭ. В этих работах кроме перечисленных сотрудников участвовал и Э.Л. Неханевич. Тогда был проведен первый эксперимент в режиме online. За полгода работы был набран интеграл светимости в  $13 \text{ нб}^{-1}$ .

В том же году было принято решение о сооружении ВЭПП-2М и создании детектора ОЛЯ с автоматизированным сбором информации. Для него были получены две ЭВМ Минск-32 производительностью в 30 тысяч оп/сек, а также мини-ЭВМ «Параметр», сделанная на интегральных микросхемах по заказу МЭП. Это была одна из первых мини-ЭВМ в стране. У неё оказалось большое будущее в виде М-6000 и серии СМ ЭВМ. Эти машины имели существенно меньшие габариты и требовали меньше хлопот по их обслуживанию. Но небольшая оперативная память (всего 16 кб) и отсутствие внешней памяти резко ограничивали их потенциальные возможности.

Для более удобного их использования в 1975 г. в ИЯФ был разработан комплекс «Радиус». Это был один из первых многомашинных комплексов в стране. Идея его заключалась в организации централизованного банка данных на базе М-6000 с дисковой памятью и подключения к нему периферийных М-6000, обслуживающих установки, и базовых ЭВМ Минск-32, имеющих богатую периферию в виде магнитных лент и быстрых печатающих устройств. В создании комплекса участвовали А.В. Романов, В.А. Гусев, Э.Л. Неханевич, Н.Ф. Денисов, Б.Л. Сысолетин и автор. В экспериментах с детектором ОЛЯ на ВЭПП-2М (1974–1979) было набрано около  $3 \text{ пб}^{-1}$ . С запуском комплекса М-6000 получили возможность загружать программы с внешнего диска и записывать данные на магнитную ленту.

Пока шли эксперименты с детектором ОЛЯ, к запуску готовились два других детектора: нейтральный детектор (НД) и большой магнитный детектор МД-1. Задачи управления и сбора данных возлагались на те же ЭВМ М-6000. К этому времени уже был сформулирован круг задач, выполняемых компьютером, работающим в режиме online с детектором. Для их решения автором была разработана система в виде модульной структуры, позволяющая непрофессиональному программисту организовать несколько взаимодействующих процессов, описать алгоритм взаимодействия с установкой и структуру принимаемой информации, определить команды взаимодействия с машиной.

Это были пионерские работы в области построения проблемно-ориентированных систем реального времени. А метод виртуальной внешней памяти, впервые реализованный нами в 1978 году, впоследствии стал классическим. В этих работах автору помогали А.Н. Кирпотин и студенты А. Зоркольцев и Л. Миленский, а внедрением системы на НД занимался А. Перышкин и на МД-1 – А. Шамов.



**Рис. 1.** Слева: Б.Н. Шувалов за телетайпом. 1975 г.  
Справа: зал ЕС ЭВМ. В.Т. Головин проверяет работу вычислительных машин. 1980 г.

Детектор НД, занявший место детектора ОЛЯ, работал с 1982-го по 1987 год и набрал около 19 пб-1. Детектор МД-1, работавший на ВЭПП-4 с 1982-го по 1985 год, набрал уже около 30 пб-1. Моделирование и обработка данных выполнялась на машинах ЕС ЭВМ (ЕС1040, ЕС1060, ЕС1061), включенных в комплекс Радиус. Ведущим программистом здесь был А.Д. Букин. Первая машина серии ЕС ЭВМ ЕС-1040 появилась у нас в 1978 году, её мощность составляла 250 тыс. оп/сек. В 1980 году мы получили ЕС-1060, производительностью 1 миллион оп/сек, а емкость оперативной памяти – целых 8 мб, но и весила она около 1,5 тонны. Но для обработки данных МД-1 не хватало и мощности ЕС-1060, поэтому был разработан (Г.А. Аксенов и КО) арифметический процессор АП-20, с помощью которого на мини-ЭВМ Электроника-100/25 перекачка выполнялась в 5 раз быстрее.

Комплекс Радиус в 1980 году включал более десятка периферийных машин и большие ЭВМ Минск-32 и ЕС-1040. Автору приятно вспоминать одну из разработок того времени МИСС – многотерминальную интерактивную систему, обеспечивающую одновременную работу до 30 терминалов на системах подготовки данных (СПД). По результатам работ по автоматизации экспериментов Б.Н. Шувалов и Б.Л. Сысолетин защитили кандидатские диссертации (см. часть 2, глава 3).

# ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. СЕГОДНЯШНИЙ ВЗГЛЯД В ЗАВТРА

Е.Б. Левичев, Ю.А. Тихонов

## СУПЕР ЧАРМ-ТАУ (с- $\tau$ ) ФАБРИКА



Е.Б. Левичев

Метод встречных пучков является одним из основных инструментов в физике высоких энергий, и именно эксперименты на встречных пучках позволили создать современную теорию микромира – Стандартную Модель (СМ). На встречных пучках в основном и проходила проверка этой теории. Логическим завершением СМ стало открытие бозона Хиггса в 2012 году в экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. В настоящее



Ю.А. Тихонов

время нет ни одного эксперимента в физике частиц, в котором бы наблюдалось отклонение от СМ. Несмотря на триумф Стандартной Модели, в фундаментальной физике существует целый ряд нерешенных проблем: это иерархия масс частиц (от долей эВ у нейтрино и почти 200 ГэВ у  $t$ -кварка), вопрос о барионной асимметрии вселенной, проблема темной материи и др. Традиционно наши надежды на наблюдение отклонений от СМ (т.н. «новая физика») связываются с экспериментами на встречных пучках при сверхвысоких энергиях (Большой адронный коллайдер), однако до настоящего времени никаких указаний на «новую физику» здесь не обнаружено. Существует также ряд фундаментальных проблем, которые решаются и будут решаться на установках со встречными электрон-позитронными пучками при сравнительно низких энергиях ( $2E=0,3\div 10$  ГэВ), но с высокой светимостью. Такие установки получили название «фабрик» (с- $\tau$ ,  $\Phi$ - и  $B$ -фабрики). На них изучается физика кварков, CP нарушение или, другими словами, асимметрия свойств вещества и антивещества и др. Не исключено, что именно здесь могут быть обнаружены явления за рамками СМ.

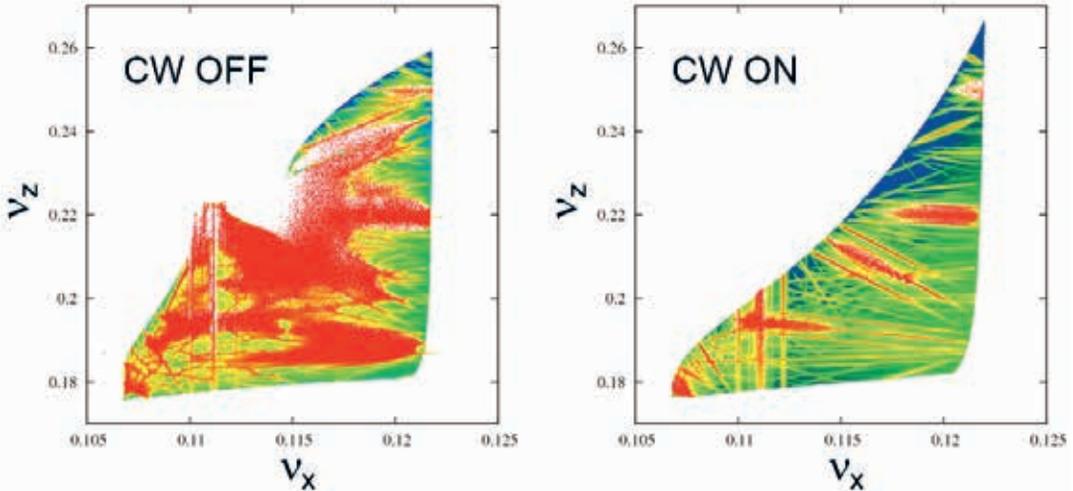
В девяностые годы прошлого столетия в разных лабораториях, занимающихся исследованиями по физике высоких энергий, обсуждались несколько проектов с- $\tau$  фабрик (в т.ч. в ИЯФ с использованием

круглых пучков [1, 2]). Для изучения узких резонансов рассматривались различные варианты монохроматизации столкновения частиц, для точной калибровки энергии – возможность работы с поперечно поляризованными пучками и т.д. Единственным состоявшимся проектом из той эпохи стал коллайдер BEPC II, запущенный в 2009 г. в Пекине в Институте физики высоких энергий IHEP [3]. Его пиковая светимость составляет  $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Возрождение интереса к рассматриваемой тематике и начало работ по проекту с-т фабрики в ИЯФ связано, во-первых, с теми выдающимися результатами, которые были получены на В-фабриках в лабораториях KEK (Япония) и SLAC (США). Несмотря на то, что высокая светимость В-фабрик позволила, используя метод радиационного возврата (предложенный и развитый в ИЯФ [4]), получить интересные результаты и в области низких энергий, создание коллайдера – фабрики, ориентированной на изучение физики очарованных частиц и тау-лептона, по-прежнему чрезвычайно актуально. Во-вторых, рост интереса к созданию с-т фабрики следующего поколения был вызван появлением принципиально новой схемы столкновения пучков в  $e^+e^-$  коллайдерах, которая позволяет поднять светимость на один-два порядка без существенного увеличения интенсивности пучков, размеров установки или уменьшения длины сгустка. Идея была высказана итальянским физиком Панталео Раймонди в 2006 году в связи с изучением возможности создания В-фабрики с высокой светимостью [5, 6].

В новой схеме пучки встречаются под довольно большим углом в несколько десятков миллирадиан. Если при этом горизонтальный эмиттанс и размер пучка в месте встречи малы, то продольный размер области взаимодействия (перекрытия) двух сгустков становится существенно меньше их длины. Это позволяет уменьшить вертикальную бета-функцию в месте встречи до субмиллиметровых значений, не оказывая влияния на hour-glass эффект, и тем самым увеличить светимость больше чем на порядок. Встреча под небольшим углом применялась в первом поколении «фабрик» (DAΦNE, PEP-II, KEKB, BEPC-II), что позволило им работать в многосгустковом режиме. При этом вертикальная бета-функция была порядка длины сгустка, а усилившиеся (из-за угла) синхро-бетатронные резонансы связи [7] препятствовали дальнейшему росту светимости. Однако в схеме столкновения с большим углом и малой бета-функцией механизм возбуждения резонансов связи становится другим, и главную роль здесь начинает играть модуляция вертикальной бетатронной фазы горизонтальными бетатронными колебаниями. Проблему удалось элегантно решить с помощью двух секступольных линз, симметрично расположенных по обе стороны от места встречи на определенных азимутах. Смысл этого шага состоит в том, чтобы вертикальная бетатронная фаза частицы в точке, где она пересекает ось встречного пучка, перестала зависеть от её горизонтальной координаты. При этом подавляются бетатронные и синхро-бетатронные резонансы связи [8, 9], что позволяет получить очень большие значения параметра встречи  $\xi_z \sim 0,15 \div 0,2$  и увеличить светимость ещё в 2-3 раза. Можно показать, что

при таком преобразовании линия минимума вертикальной бета-функции (перетяжка пучка, «waist») перестает быть перпендикулярной оси пучка: она разворачивается и становится параллельной оси встречного сгустка. Этот разворот перетяжки и дал название всей схеме – Crab Waist, или сокращённо CW, а задействованные в ней секступоли получили название «крабовых». Рис. 1, полученный с помощью численного моделирования, демонстрирует работу крабовых секступолей [10].



**Рис. 1.** Разброс бетатронных частот в пучке, вызванный нелинейным взаимодействием со встречным сгустком. Динамические характеристики различных траекторий показаны цветами: красный соответствует стохастическому движению, синий – регулярному. Видно, как в области перекрытия сильных резонансов возникают стохастические области, и как они уменьшаются при включении крабовых секступолей

Новый метод устраняет проблему паразитных мест встречи (поскольку пучки быстро расходятся) и не требует коротких сгустков (что уменьшает опасность коллективных эффектов). Параметры пучков, требуемые для новых фабрик частиц, не выходят за границы уже достигнутых либо в источниках СИ (малый эмиттанс, малый коэффициент бетатронной связи), либо в коллайдерах предыдущих поколений (ток пучка  $\sim 1 \div 2$  А). Начиная с 2008 года CW успешно работает на Ф-фабрике DAΦNE (Италия); результаты экспериментов подтверждают перспективность метода и находятся в хорошем согласии с теорией [11]. Кроме с-т фабрики в Новосибирске, на новом подходе основаны проекты  $e^+e^-$  коллайдеров на сверхвысокую светимость FCC-ee в ЦЕРН [12] и CEPC в Китае [13].

Исходя из физической программы с-т фабрики были сформулированы следующие основные требования к ускорительному комплексу:

- диапазон энергии в системе центра масс от 2 ГэВ до 5 ГэВ, что позволяет вести эксперименты от порога рождения нуклонов и анти-

нуклонов до области семейства  $\psi$ -мезонов и очарованных барионов и использовать результаты ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М;

- светимость фабрики должна быть не ниже  $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в области высоких энергий и  $\sim 10^{34}$  в области низких энергий;

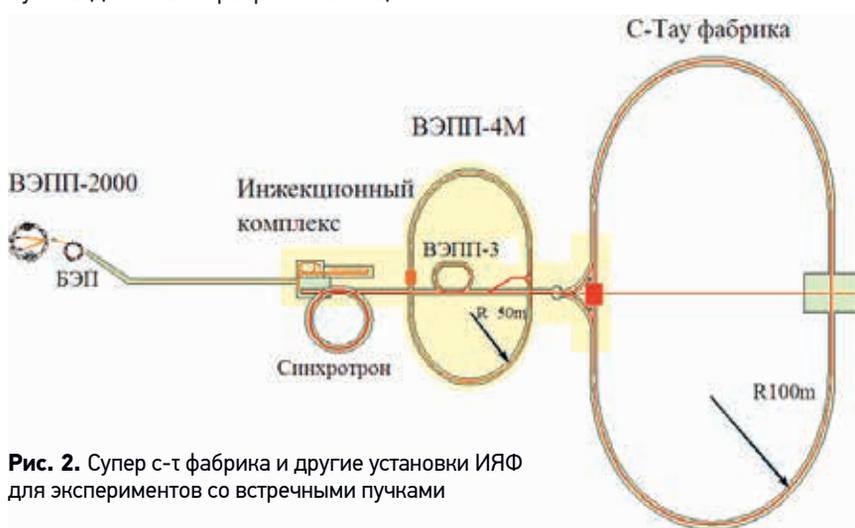
- электронный пучок должен быть продольно поляризован в точке встречи.

- пучки сталкиваются с равными энергиями; асимметрия энергий не требуется;

- монохроматизация встречи не требуется, поскольку соответствующие схемы сложны и существенно уменьшают светимость, при том, что высокая светимость позволяет эффективно исследовать узкие состояния и без монохроматизации;

- поперечная поляризация пучков для калибровки энергии не нужна; достаточно измерять энергию с помощью обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на частицах циркулирующего пучка [14]. Эта методика, впервые примененная к  $e^+e^-$  коллайдерам в ИЯФ, дает относительную точность лучше  $10^{-4}$ , что достаточно для задач с-т фабрики.

Супер чарм-тау фабрика схематично показана на рис. 2; здесь же изображены остальные установки ИЯФ, имеющие отношение к тематике встречных пучков: ВЭПП-2000 с бустером БЭП, ВЭПП-4М с накопителем ВЭПП-3, инжекционный комплекс ИК с синхротроном для подготовки пучков для новой фабрики частиц.



**Рис. 2.** Супер с-т фабрика и другие установки ИЯФ для экспериментов со встречными пучками

Коллайдер Супер с-т фабрики [15] включает два независимых накопительных кольца длиной около 800 м каждое с одним местом встречи, где размещается детектор (во втором месте встречи пучки разводятся по вертикали). Пересечение пучков происходит с углом 60 мрад. Вертикальная бетатронная функция в точке встречи равна 0,8 мм. Основные параметры коллайдера приведены в таблице 1, промежуток встречи Супер с-т фабрики с детектором показан на рис. 3.

Основные проектные параметры с-т фабрики

Таблица 1.

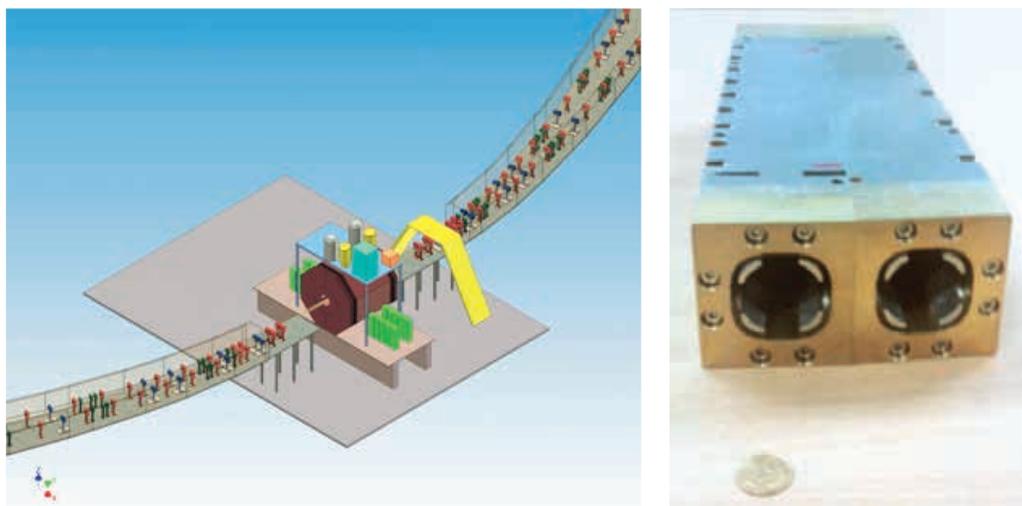
Энергия	1,0	1,5	2,0	2,5	ГэВ
Периметр, П	766,6				М
Коэфф. уплотнения орбит, $\alpha$	9				$\times 10^{-4}$
Ускоряющее напряжение, $V_{RF}$	310	900	990	1000	кВ
Потери энергии на оборот, $U_0$	170	256	343	434	кэВ
Энергетический разброс, $\sigma_E$	10,09	9,953	8,435	7,378	$\times 10^{-4}$
Длина сгустка, $\sigma_s$	1,6	1,06	1	1	см
Время затухания, $\tau_x / \tau_z / \tau_s$	30/30/15				мсек
Коэффициент связи, $k$	0,5				%
Горизонтальный эмиттанс, $\epsilon_x$	8				нм·рад
Вертикальный эмиттанс, $\epsilon_z$	0,04				нм·рад
Число частиц в сгустке, $N_0$	$7 \cdot 10^{10}$				
Число сгустков, $N_b$	390				
Полное число частиц, $N$	$2,73 \cdot 10^{13}$				
Полный ток, $I$	1,7				А
Бета-функции в IP, $\beta_x / \beta_z$	4/0,08				см
Угол встречи, $2\theta$	60				мрад
Параметр встречи, $\xi_z$	0,15	0,15	0,12	0,095	
Светимость, $L \times 10^{35}$	0,63	0,95	1,00	1,00	$\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$

При изменении энергии пучка будут меняться и его параметры, влияющие на светимость (эмиттанс, время затухания, длина сгустка и т.п.). Для оптимизации светимости запланирована постройка на оба кольца нескольких сверхпроводящих магнитных змеек, которые поддерживают постоянными горизонтальный эмиттанс и декременты затухания во всем диапазоне энергий коллайдера.

Одним из ключевых аспектов с-т фабрики является возможность продольной поляризации электронного пучка в месте встречи. Для этого будет использован источник поляризованных электронов, на выходе из которого можно получить любое направление спина, так что с учетом всех дальнейших поворотов в точке инжекции впускаемый пучок будет иметь правильное направление спина. Для получения продольной поляризации в месте встречи основного кольца принята схема с использованием пяти «сибирских змеек» [16], обеспечивающая высокую степень поляризации ( $\geq 80\%$ ) во всем диапазоне энергий.

Серьезной проблемой для любого коллайдера с ненулевым углом пересечения пучков является сложная магнито-вакуумная система финального фокуса. Для схемы встречи CW эта проблема усугубляется; из-за предельно малой вертикальной бетатронной функции в точке встречи

(<1 мм) финальные линзы должны быть предельно короткофокусными, с большим значением градиента и размещаться близко к точке встречи внутри детектора [17]. Учитывая необходимость обеспечения максимального приемного угла детектора, а также то, что в непосредственной близости к точке взаимодействия пучков размещается много другого оборудования (соленоиды для компенсации поля детектора, мониторы светимости, датчики и корректоры положения пучка и т.д.), конструкция линз финального фокуса должна быть очень компактной.



**Рис. 3.** Слева – промежуток встречи с-т фабрики с детектором, справа – ярмо двухапертурной сверхпроводящей линзы финального фокуса

В ИЯФ для проекта с-т фабрики была разработана уникальная двухапертурная сверхпроводящая линза [18], которая может быть поставлена на расстоянии 0,6 м от точки встречи и развивает градиент поля 100 Т/м при апертуре  $\varnothing 26$  мм. Ярмо линзы (правый рис. 3) выполнено из магнитомягкого железа, что позволяет получить поле высокого качества на оси пучков, предотвращает взаимное влияние соседних линз и «перехватывает» рассеянное за пределы линзы поле. Прототип линзы был изготовлен и успешно прошел испытания при криогенной температуре.

Для обеспечения высокой светимости фабрики производительности существующего инжекционного комплекса недостаточно. Планируемый инжекционный комплекс с-т фабрики (не показан на рис. 2) включает несколько интенсивных источников электронов (в т.ч. поляризованных), накопитель-охладитель с малым временем затухания и набор линейных ускорителей для электронных и позитронных пучков. Инжекция планируется только на энергии эксперимента без последующего доускорения пучков в коллайдере (top-up injection).

При электрон-позитронной аннигиляции в диапазоне энергий с-т фабрики рождаются связанные состояния с-кварка и с-антикварка (чармонии), очарованные мезоны, состоящие из с-кварка и одного из лег-

них ( $u$ ,  $d$  или  $s$ ) антикварков, а также очарованные барионы, имеющие в своем составе два легких кварка и  $c$ -кварк. При энергии в с.ц.м. больше 3,6 ГэВ начинают рождаться пары  $\tau$ -лептонов. Основной целью экспериментов на Супер  $c$ -т фабрике является изучение процессов с участием  $c$ -кварков и  $\tau$ -лептонов со статистикой, которая на несколько порядков превышает как уже набранную в этом диапазоне энергии, так и набираемую на китайской  $c$ -т фабрике BEPC II (учитывая, что светимость новосибирского проекта в сто раз больше, чем у китайского коллайдера). На Супер  $c$ -т фабрике можно будет в течение полугода накопить интегральную светимость  $\sim 1$  аб<sup>-1</sup> и произвести примерно  $3 \times 10^9$   $\tau$ -лептонов,  $7 \times 10^9$   $D$ -мезонов и фантастическое число –  $3 \times 10^{12}$   $J/\psi$ -мезонов. Такая статистика позволит провести систематическое изучение практически всех состояний, состоящих из кварков первых двух поколений, включая экзотические. Большая статистика  $D$ -мезонов и  $\tau$ -лептонов даст возможность непосредственно подступиться к исследованию принципиально новых явлений, таких как  $CP$ -нарушение в распадах очарованных адронов и  $\tau$ -лептонов, несохранение лептонного числа и др.

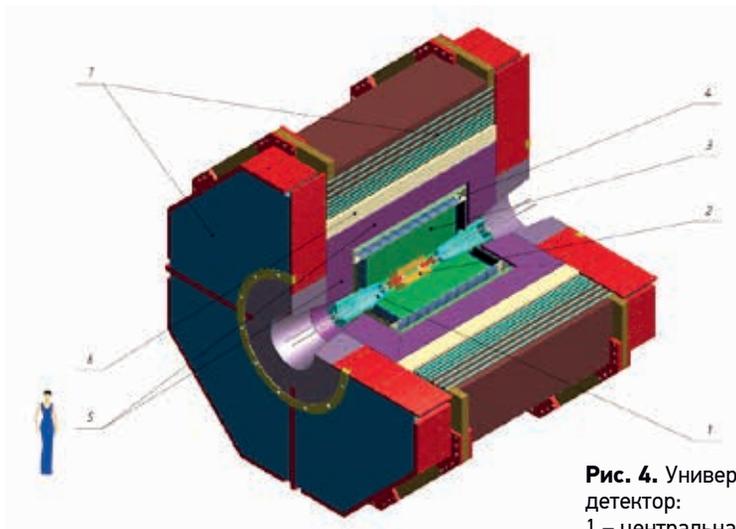
Для реализации потенциала предлагаемого проекта Супер  $c$ -т фабрики необходим универсальный магнитный детектор. При этом детектор должен обладать рядом уникальных характеристик и иметь следующие параметры:

- высокое импульсное разрешение для заряженных частиц и хорошее энергетическое разрешение для фотонов;
- рекордные параметры системы идентификации частиц в сравнении с уже существующими и разрабатываемыми детекторами.
- оцифровывающая электроника и система сбора данных должны быть способны считывать события с частотой 300–400 кГц при средней длине события 30 кБ;
- оцифровывающая электроника должна находиться внутри детектора, для передачи данных будут использоваться оптические линии связи со скоростью 10 гигабит/с;
- конструкция детектора должна обеспечивать быстрый доступ к внутренним системам для ремонта и замены оборудования, время, требуемое на процедуру разборка-ремонт-сборка, не должно превышать 12–24 часов;
- ввод (вывод) магнитного поля детектора не должен превышать 2–3 часов.

Схема детектора показана на рис. 4. Детектор имеет классическую компоновку для экспериментов на встречных пучках.

Необходимо отметить, что практически все методики и подходы, необходимые для реализации проекта детектора для Супер  $c$ -т фабрики, уже опробованы при сооружении других детекторов, эксплуатируемых или создаваемых в мире для проведения экспериментов по физике высоких энергий.

Одним из вариантов системы идентификации может быть разрабатываемая в ИЯФ система ФАРИЧ с рекордными параметрами на основе детектора черенковских колец, с радиатором из многослойного фокусирующего аэрогеля и регистрацией фотонов с помощью кремниевых



**Рис. 4.** Универсальный магнитный детектор:

- 1 – центральная вакуумная камера;
- 2 – вершинная камера;
- 3 – дрейфовая камера;
- 4 – система идентификации;
- 5 – калориметр;
- 6 – сверхпроводящий соленоид ( $B \sim 1$  Тл);
- 7 – ярмо магнита и мюонная система

фотоумножителей. Данная методика до настоящего времени не применялась при создании больших детекторов, поэтому требует проведения масштабных методических исследований с прототипами системы. Кроме того, в настоящее время стоимость кремниевых фотоумножителей крайне высока, однако сегодня технология изготовления таких фотоумножителей находится в фазе быстрого развития [19]. Так например, за последние 5 лет собственные шумы КФЭУ при комнатной температуре ( $25^\circ\text{C}$ ) удалось понизить на порядок и достичь эффективность регистрации фотонов выше 40% в широком оптическом диапазоне (300–700 нм) [20].

Здесь необходимо отметить, что ИЯФ СО РАН имеет большой опыт в применении аэрогеля для целей идентификации. В Институте Катализа СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН налажено производство аэрогеля с лучшим в мире качеством. Аэрогель новосибирского производства используется в детекторе LHCb, работающем на Большом адронном коллайдере, детекторе AMS02, недавно установленном на Международной космической станции, и в ряде других экспериментов как внутри института (детекторы КЕДР и СНД), так и за рубежом [21]. В ИЯФ СО РАН с применением этого материала изготовлен прототип детектора черенковских колец для системы идентификации, на пучках заряженных частиц продемонстрировано превосходное качество  $\mu/\pi$ -разделения при импульсе частиц 1 ГэВ/с, недостижимое ни одним другим известным на данный момент методом идентификации частиц, развитым для экспериментов со встречными пучками [22].

Создание такого уникального комплекса, как Супер с-т фабрика – сложная, многолетняя задача, и ИЯФ СО РАН начал закладывать основу для реализации этого проекта еще в советские времена. Начиная с 1992 г.

было открыто Государственное финансирование проекта: до 2002 г. это был проект ВЛЭПП-100, а с 2007 г. – комплекс ВЭПП-5. В 2015 г. было завершено финансирование данного проекта, и институт существенно обновил и улучшил инженерную и научную инфраструктуру. Завершено создание, осуществлен ввод в эксплуатацию и оформлено право собственности РФ на ряд дорогостоящих объектов недвижимого (объекты капитального строительства) и особо ценного движимого имущества (электрофизические установки: инжекционный комплекс с каналами транспортировки электронных и позитронных пучков; коллаидер ВЭПП-2000 с детекторами КМД-3 и СНД; станции СИ на накопителе ВЭПП-4). К настоящему времени общая стоимость сданных в эксплуатацию объектов, созданных в рамках ФАИП, составляет около 700 млн рублей (в текущих ценах).

Введенный в строй в конце 2015 года новый инжекционный комплекс института, обладающий высокой производительностью в получении позитронов, «интегрирован» в ускорительную инфраструктуру института, что привело к улучшению параметров и повышению результативности экспериментов на действующих коллаидерах института – ВЭПП-4М и ВЭПП-2000, экспериментов с СИ. Параметры и надежность инжекционного комплекса постоянно улучшаются.

Летом 2011 года Правительственная комиссия отобрала шесть проектов класса «Мегасайенс» для реализации на территории Российской Федерации (PIK, NICA, IGNITOR, ИССИ-4, XCELS и Супер С-Тау). Проект ИЯФ Супер с-т фабрики был одобрен Европейским комитетом по ускорителям будущего (ECFA) и получил высокую оценку многих видных экспертов в области физики элементарных частиц.

1 декабря 2016 года была утверждена указом Президента РФ Стратегия научно-технологического развития РФ (СНТР) до 2025 г. Важным пунктом этой стратегии является поддержка создания и развития уникальных научных установок класса «Мегасайенс», крупных исследовательских инфраструктур на территории Российской Федерации. В соответствии с планом реализации этой стратегии к концу 2019 г. должна быть проведена подготовка к принятию решения о реализации проекта Супер с-т фабрики. Завершение формирования международной коллаборации проекта Супер С-Тау – одна из важнейших и трудных задач, которую необходимо решить для принятия положительного решения по реализации проекта.

Возможности по привлечению ресурсов для реализации определенных этапов проекта Супер с-т фабрики, а также принятие Правительством РФ решения о реализации проекта в целом в значительной степени зависят от нашей собственной убежденности в необходимости реализации этого проекта, уверенности в его осуществимости, способности правильно расставить приоритеты, сконцентрировать усилия и консолидировать работу внутри института, организовать продуктивное взаимодействие с партнерами и потенциальными участниками проекта.

Это один из современных «больших вызовов» для нашего института, положительный ответ на который позволит не только сохранить, но и развить ИЯФ как «коллайдерную» лабораторию мирового уровня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.N. Skrinsky. Studies for a Tau-Charm Factory, SLAC-Report-451, October, 1994.
2. C-Tau in Novosibirsk: Conceptual Design Report, BINP, Novosibirsk, 1995.
3. P. Zweber and BES III Collaboration. Charm Factories: Present and Future. AIP Conference Proceedings 1182, 406 (2009).
4. V.P. Druzhinin et al. Hadron Production via  $e^+e^-$  Collisions with Initial State Radiation. Rev. Mod. Phys. 83, 1545 (2011).
5. P. Raimondi, Status of the SuperB Effort, presentation at the 2<sup>nd</sup> Workshop on Super B Factory, LNF-INFN, Frascati, March 2006
6. M. Bona et al. A High-Luminosity Asymmetric  $e^+e^-$  Super Flavor Factory. Conceptual Design Report, SLAC-R-856, INFN-AE-07-02, LAL-07-15, May 18, 2007, e-Print: arXiv: 0709.0451
7. D.V. Pestrikov. Vertical synchrotron resonances due to beam-beam interaction with horizontal crossing. Nucl. Instrum. Meth. A 336 (1993), pp.427-437.
8. P. Raimondi, D. Shatilov, M. Zobov. Beam-Beam Issues for Colliding Schemes with Large Piwinski Angle and Crabbed Waist, LNF-07-003-IR, Feb. 2007, e-Print: physics/0702033.
9. P. Raimondi, D. Shatilov, M. Zobov. Suppression of beam-beam resonances in Crab Waist collisions, Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 23-27 June 2008.
10. D. Shatilov, E. Levichev, E. Simonov and M. Zobov. Application of frequency map analysis to beam-beam effects study in crab waist collision scheme. Phys. Rev. ST Accel. Beams 14 014001 (2011).
11. M. Zobov et al. Test of crab-waist collisions at DAΦNE  $\Phi$ -factory Phys. Rev. Lett. 104 174801 (2010).  
<http://cern.ch/fcc>  
<http://cepc.ihep.ac.cn/>
12. N.Yu. Muchnoi, S. Nikitin, V. Zhilich. Proc. of EPAC 2006, Edinburg, Scotland.
13. E. Levichev. The project of a Tau-Charm Factory with Crab Waist in Novosibirsk. Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.5, No.7 (1 December 2008), pp.554-559.
14. Ya.S. Derbenev, A.M. Kondratenko, S.I. Serednyakov et al. Radiative polarization: obtaining, control, using. Particle Accelerators 8, 115-126 (1978).
15. A.V. Bogomyagkov, E.B. Levichev, P.A. Piminov. Interaction Region Design of Super-CT-Factory in Novosibirsk. Proc. of 2011 PAC, New York, 690-692 (2011).
16. I. Okunev, E. Levichev, P. Vobly et al. Final Focus Quadrupole for the Crab-Waist Tau-Charm Factory. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 23-27 June 2008, pp.2623-2625.
17. D. Renker and E. Lorenz, Advances in solid state photon detectors, 2009 JINST 4 P04004.
18. Nepomuk Otte and Distefano Garcia, A very brief review of recent

SiPM developments, PoS(PhotoDet2015)001, <https://pos.sissa.it/252/001/pdf> A.N. Otte et al., Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers, Nucl. Instr. and Meth. A-846 (2017) 106-125.

19. А.Ф. Данилюк, С.А. Кононов, Е.А. Кравченко, А.П. Онучин. Аэро-гелевые черенковские детекторы в экспериментах на встречных пучках, УФН (2015) Том 185, № 5, с. 540-548.

20. A.Yu. Barnyakov et al., Beam test of FARICH prototype with digital photon counter, Nucl. Instr. and Meth. A 732(2013)352-356.



# Коллайдеры и детекторы в ИЯФ СО РАН

Научное издание

Подписано в печать 18.04.2018 г.

Формат 70x100/16. Усл. печ. л. 34,28. Гарнитура PF DinText Pro.

Тираж 500 экз.

Заказ № 295470.

Отпечатано в типографии «Золотой тираж» (ООО «Омскбланкиздат»).

644007, г. Омск, ул. Орджоникидзе, 34, тел. 212-111,

[www.золотойтираж.рф](http://www.золотойтираж.рф)

