

ФАНО России
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ИЯФ СО РАН
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПО ГОСУДАРСТВЕННОМУ ЗАДАНИЮ
за 2016 год

Новосибирск 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Программа П.14.1. Актуальные проблемы физики высокотемпературной термоядерной плазмы (координатор д.ф.-м.н. А.А. Иванов)	
14.1.1 Осесимметричные открытые ловушки с улучшенным продольным удержанием	8
14.1.2 Развитие мощных инжекторов пучков быстрых атомов для стационарных термоядерных систем	15
14.1.3 Исследование квазистационарных процессов при взаимодействии мощного электронного пучка с плазмой в многопобочном магнитном поле	24
14.1.4 Создание первой очереди плазменной ловушки нового поколения ГДМЛ	39
Программа П.15.1. Фундаментальные проблемы физики элементарных частиц и космологии: теория и эксперимент (координатор чл.-к. РАН Бондарь А.Е.)	
15.1.1 Развитие и применение методов теоретической физики в ФЭЧ и космологии	50
15.1.2 Поиск новой физики в экспериментах при высоких энергиях	56
15.1.3 Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах и редких распадах	70
Программа П.15.2. Электромагнитные и сильные взаимодействия при низких энергиях (координатор: д.ф.-м.н. В.П. Дружинин).	
15.2.1 Разработка новых систем и приборов с использованием методов экспериментальной ядерной физики	80
15.2.2 Изучение процессов рождения и распадов адронов на встречных электрон-позитронных пучках	83
15.2.3 Исследования электромагнитной структуры легких адронов и ядер	93
Программа П.15.3. Коллайдеры и высокопроизводительные фабрики частиц (координатор д.ф.-м.н. Е.Б.Левичев)	
15.3.1 Развитие концепции финальной фокусировки пучков Супер Чарм-Тау фабрики и других высокопроизводительных коллайдеров	101
15.3.2 Развитие методов получения высокой интенсивности электронных и позитронных пучков ускорительного комплекса ВЭПП-4 для экспериментов по ФВЭ, ядерной физике и СИ	106
15.3.3 Развитие метода круглых пучков при работе коллайдера ВЭПП-2000 для экспериментов по физике высоких энергий в широком диапазоне энергий	111
Программа П.15.4. Физика и техника линейных ускорителей заряженных частиц (координатор чл.-к. РАН П.В.Логачев)	
15.4.1 Разработка методов малоракурсной радиографии сверхплотных объектов на основе мощных сфокусированных пучков электронов	118
15.4.2 Исследование и оптимизация эффективности инжекции электронов и позитронов инжекционного комплекса ВЭПП-5	125
15.4.3 Исследование новых методов ускорения заряженных частиц	132
Программа П.15.5. Генерация и использование электронных и ионных пучков для научных, технологических и медико-биологических применений (координатор чл.-к. РАН В.В. Пархомчук)	
15.5.1 Разработка протонных и ионных ускорителей для научных, технологических, медико-биологических исследований и терапии рака	138

15.5.2 Развитие методов электронного охлаждения в установках мегавольтного диапазона	141
15.5.3 Электронные пучки большой мощности для фундаментальных и технологических применений	147
15.5.4 Разработка нейтронного источника на базе сильноточного ускорителя – тандема	155
Программа П.15.6. Физика и техника источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах (координатор ак. Г.Н. Кулипанов)	
15.6.1 Развитие экспериментальных методов на Новосибирском лазере на свободных электронах	166
15.6.2 Разработка и изготовление специализированных генераторов синхротронного излучения с использованием сверхпроводящих или постоянных магнитов	169
15.6.3 Разработка оптимальных вариантов создания источников рентгеновского излучения нового поколения	175
Программа П.15.7. Диагностика био- и наноструктур методами СИ и терагерцового излучения на электронных пучках (координатор д.ф.-м.н. Н.А. Мезенцев).	
15.7.1 Развитие экспериментальных методов исследований с использованием СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М	182
15.7.2 Исследования быстропротекающих процессов с наносекундным разрешением с использованием рентгеновского СИ	192
15.7.3 Развитие методов нанодиагностики на базе Новосибирского ЛСЭ	197
П.2П Комплексная программа СО РАН. Исследование особенностей формирования полупроводниковых и магнитных нанокomпозитов с пространственно-упорядоченным расположением наночастиц, локализованных в калиброванных пористых матрицах, методами, использующими синхротронное излучение	204
П.2П Комплексная программа СО РАН. Лазерно-плазменное ускорение заряженных частиц до ультрарелятивистских энергий	208
П.2П Комплексная программа СО РАН. Развитие методики регистрации космических мюонов в гамма-астрономии высоких энергий	211
П.2П Комплексная программа СО РАН. Разработка методов диагностики для исследования плазмы в открытых ловушках	213
П.2П Комплексная программа СО РАН. Равновесие и устойчивость плазмы с большим бета в аксиально-симметричных магнитных ловушках	219
П31П Комплексная программа СО РАН. Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Установка персонального досмотра для выявления наркокурьеров	222
П.2П Комплексная программа СО РАН. Создание специализированных приборов и устройств для экспериментов с использованием мощного терагерцового излучения Новосибирского ЛСЭ	226
Соглашения о сотрудничестве между ИЯФ СО РАН и зарубежными лабораториями	229
Научное руководство ИЯФ СО РАН	231

Введение

Институт ядерной физики СО АН СССР был создан в соответствии с постановлением Совета Министров СССР в мае 1958 года на базе руководимой Г.И. Будкером Лаборатории новых методов ускорения Института атомной энергии, возглавлявшегося И.В. Курчатовым. В 2015 году директором Института стал член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Павел Владимирович Логачев.

В настоящее время ИЯФ СО РАН – самый крупный академический институт страны (более 2800 сотрудников). Среди 440 научных сотрудников Института – 10 академиков и членов-корреспондентов РАН, более 60 докторов и 170 кандидатов наук. Особенностью ИЯФ является наличие крупного экспериментального производства (около 1000 человек) с высоким уровнем технического и технологического оснащения. Институт ведет активную работу по подготовке научных и инженерно-технических кадров высшей квалификации. ИЯФ является базовым Институтом для семи кафедр физического факультета НГУ и физико-технического факультета НГТУ, на которых обучается около 200 студентов. В аспирантуре ИЯФ, НГУ и НГТУ обучается около 70 человек.

ИЯФ является одним из ведущих мировых центров по ряду областей физики высоких энергий и ускорителей, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. В Институте ведутся крупномасштабные эксперименты по физике элементарных частиц на электрон-позитронных коллайдерах и уникальном комплексе открытых плазменных ловушек, разрабатываются современные ускорители, интенсивные источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах. По большинству своих направлений Институт является единственным в России.

Важнейшими достижениями 2016 года Учёный Совет ИЯФ СО РАН признал следующие результаты:

В области ядерной физики, физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий:

1. В ИЯФ СО РАН в эксперименте с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП - 4М с лучшей в мире точностью исследовано сечение электрон-позитронной аннигиляции в адроны в области энергии 1.84 - 3.05 ГэВ.

2. В эксперименте по поиску новой физики (MEG, PSI) получено ограничение на распад

мюона в электрон и гамма-квант, превосходящее на полтора порядка предыдущее значение.

3. В ИЯФ СО РАН по данным, накопленным в эксперименте с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2М, сделано прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в широком интервале энергий, от 0,60 до 1,38 ГэВ. По измеренному сечению с наилучшей в мире точностью определены вероятности радиационных переходов ρ , ω , $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$.

4. В ИЯФ СО РАН в эксперименте с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 с лучшей в мире точностью измерены сечения процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, $\omega\eta$, $\omega\pi^0$ в области энергии 1,05 - 2,00 ГэВ.

5. В ИЯФ СО РАН в эксперименте с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 впервые наблюдалась реакция $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$. Измерено сечение реакции, показано, что ее доминирующим механизмом является переход через промежуточное состояние $\omega a_0(980)$.

6. В ИЯФ СО РАН в эксперименте с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с лучшей в мире точностью в области энергий 1.92-2.0 ГэВ вблизи порога реакции измерено сечение рождения протон-антипротонных пар в электрон-позитронной аннигиляции.

7. В ИЯФ СО РАН впервые сформулирован последовательный квазиклассический подход для описания процессов квантовой электродинамики в полях тяжелых атомов при высоких энергиях. Этот подход позволил не только вычислить вероятности различных процессов точно по атомному полю в ведущем квазиклассическом приближении, но и сосчитать следующие за главным квазиклассические вклады, а также впервые предсказать величину эффектов, которые отсутствуют при вычислении в главном квазиклассическом приближении.

В области физики и техники ускорителей заряженных частиц, источников СИ и ЛСЭ:

1. Инжекционный комплекс начал в крейсерском режиме снабжать электронами и позитронами коллайдеры ИЯФ СО РАН - ВЭПП-2000 и ВЭПП-4 для проведения экспериментов с максимальной светимостью.

2. Впервые в мире по изменению угла рассеяния дифракционного пика синхротронного излучения измерена динамика деформации монокристалла вольфрама при импульсной тепловой нагрузке длительностью около 100 мкс. Эксперименты проводились по программе исследования материалов для реакторов термоядерного

синтеза.

3. На Новосибирском лазере на свободных электронах создана рабочая станция "накачка-зондирование" и проведены эксперименты по динамической спектроскопии полупроводниковых структур в терагерцовом диапазоне (работа выполнена совместно с ИФМ РАН).

4. На Новосибирском лазере на свободных электронах проведено комплексное исследование лазерного разряда в терагерцовом диапазоне частот.

5. В ИЯФ СО РАН спроектирован и изготовлен электронно-оптический диссектор для регистрации быстрых периодических процессов с временным разрешением 3 пикосекунды (работа выполнена совместно с ИОФ РАН имени А. М. Прохорова).

6. Разработан, изготовлен и успешно испытан новый источник коротких электронных сгустков с большим средним током на основе высокочастотного резонатора с сеточно-управляемым терموкатодом для новосибирского ЛСЭ. Энергия источника в рабочем режиме 320 кэВ (максимальная - 400 кэВ), максимальный заряд одного сгустка 1.5 нКл, минимальная длительность сгустка 200 пс, максимальная частота повторения 90 МГц, средний ток 100 мА.

7. Разработан, создан и запущен в эксплуатацию сверхпроводящий вигглер с новым типом криогенной системы. Вигглер установлен на источник СИ АНКА (Карлсруе, Германия). Изучены возможности эффективного использования азотных тепловых трубок для первичного охлаждения холодной массы.

8. Методом EXAFS-спектроскопии исследованы структурные особенности полупроводниковых и магнитных наноконпозитов с пространственной упорядоченностью наночастиц локализованных в калиброванных пористых матрицах методами с использованием СИ (работа выполнена совместно с ИК СО РАН).

9. Разработан и изготовлен ускоритель электронов в локальной радиационной защите. Ускоритель запущен в эксплуатацию в КНР в составе технологической линии электронно-лучевой обработки компонентов автомобильных шин. По своим параметрам установка превосходит зарубежные аналоги.

10. Реализован способ исследования автоколебаний в реакциях каталитического окисления метана и пропана на никелевом катализаторе. Совместное применение метода рентгеновской дифракции с использованием СИ с методом масс-спектрометрии в режиме *in situ* дало возможность в рамках одного эксперимента опре-

делить взаимосвязь химического состояния катализатора с его каталитическими свойствами (работа выполнена совместно с ИК СО РАН).

11. Изготовлена и завершены испытания системы электронного охлаждения для бустера коллайдера «НИКА» (ОИЯИ).

В области физики плазмы:

1. На установке ГДЛ в экспериментах с горячей ($T \sim 1$ кэВ) плазмой впервые реализованы режимы с большой плотностью нейтрального газа в расширителях, что дает возможность существенно расширить область рабочих параметров нейтронного источника на основе ГДЛ.

2. Впервые в мире при моделировании воздействия импульсных тепловых нагрузок на стенку термоядерного реактора обнаружено, что даже при однородном нагреве на поверхности вольфрама возникают "горячие" участки, подвергающиеся повышенной эрозии. Появление этих участков связано с внутренними разрушениями материала. Это приводит к значительному увеличению скорости эрозии и потока микрочастиц вольфрама при превышении плотности мощности нагрева пороговой величины, допустимой в диверторе токамака ИТЭР.

3. Создан уникальный инжектор сфокусированного пучка атомов водорода и дейтерия для нагрева плазмы мощностью 1 МВт и длительностью работы 2 сек. В инжекторе впервые реализован режим работы с изменением энергии пучка в течение рабочего импульса в пределах 15-30 кэВ с частотой до 250 Гц.

4. На прототипе нейтронного источника для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей впервые достигнута величина тока ускоренного пучка 5 мА при энергии 2 МэВ, что позволяет переходить к клиническим испытаниям.

5. Предложена и теоретически обоснована концепция открытой диамагнитной ловушки для термоядерной плазмы. За счет улучшенного удержания и высокой плотности удерживаемой плазмы она может стать основой для создания реактора на бестритиевых топливах.

6. В экспериментах при интенсивном взаимодействии релятивистского пучка с плазмой на установке ГОЛ впервые установлены закономерности излучения в пучково-плазменной системе для терагерцовой области частот, что позволит в будущем создать мощный импульсный генератор для этой области спектра.

В 2016 году общим собранием членов Российской академии наук доктор физико-математических наук, директор Института Павел Владимирович Логачев и доктор физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией Василий Васильевич Пархомчук были избраны академиками, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Юрий Анатольевич Тихонов и доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Виктор Сергеевич Фадин были избраны член-корреспондентами.

Звание «Профессор РАН» было присвоено четырём сотрудникам: докторам физико-математических наук: Ачасову Михаилу Николаевичу, Ли Роману Николаевичу, Мучному Николаю Юрьевичу и кандидату физико-математических наук Гармаш Алексею Юрьевичу.

Кандидаты физико-математических наук Алексей Сергеевич Аракчеев, Антон Вячеславович Судников и Дмитрий Иванович Сквородин, младший научный сотрудник Дмитрий Сергеевич Сороколетов были удостоены стипендий Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам.

Стипендия Правительства Российской Федерации для студентов и аспирантов была назначена Владимиру Владимировичу Козлову и Олегу Захаровичу Сотникову.

Научный руководитель Института доктор физико-математических наук, академик РАН Александр Николаевич Скринский был признан победителем в конкурсе Совета по грантам при Президенте РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2016).

Победителем в конкурсе грантов Правительства Новосибирской области молодым учёным на проведение мероприятий, направленных на популяризацию науки, в 2016 году был признан проект «Комплекс мероприятий, направленных на популяризацию науки, на базе Института ядерной физики СО РАН» коллектива молодых учёных в составе: Леонид Васильевич Кардапольцев, Леонид Борисович Эпштейн, Данила Алексеевич Никифоров, Андрей Алексеевич Шошин.

В отчетном году в Институте продолжали работу три диссертационных Совета с правом приема докторских (кандидатских) диссертаций. Всего проведено 14 заседаний, на которых были защищены 1 докторская и 13 кандидатских диссертаций.

Для учащихся, студентов, преподавателей школ и вузов, сотрудников других организаций и гостей Института было проведено около 100 экскурсий по установкам Института, которые посетило более 2400 человек, проведены выездные лекции в новосибирских школах.

№ 14.1.1 Осесимметричные открытые ловушки с улучшенным продольным удержанием

Введение

В отчете представлены результаты работ, которые были направлены, с одной стороны, на модернизацию установки ГДЛ [1] с целью увеличения ее экспериментальных возможностей, а с другой стороны, на исследование ключевых проблем удержания плазмы с субтермоядерными параметрами в магнитной ловушке открытого типа (пробкотроне) с осесимметричной конфигурацией. Была существенно модернизирована магнито-вакуумная система установки, а также ее диагностический комплекс, что позволило успешно провести серию запланированных в 2016 году исследований.

Полученные в 2016 году на установке ГДЛ и представленные в отчете результаты позволили достичь значительного прогресса в понимании главных физических процессов, определяющих удержание энергии плазмы с параметрами, приближающимися к параметрам реакторного уровня, в осесимметричном пробкотроне. Кроме того, полученные результаты позволяют решить несколько ключевых вопросов конструкции будущих реакторов ядерного синтеза на основе ловушек открытого типа для магнитного удержания плазмы.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В результате выполнения работ на первых этапах реализации проекта были получены результаты, которые продемонстрировали значительный прогресс в области удержания и нагрева плазмы с высоким относительным давлением. Эти результаты поднимают на новый уровень доказательную базу относительно перспектив реализации реакторов ядерного синтеза на основе ловушек открытого типа для магнитного удержания плазмы (пробкотронов), обладающих наиболее привлекательной с инженерно-физической точки зрения осесимметричной конфигурацией магнитной системы.

Для контроля параметров инжектируемых нейтральных пучков, восстановления линейного профиля плотности плазмы и положения центра плазменного шнура был разработан проект и создана измерительная система, использующая томографический метод. Система регистрации состоит из набора вторично-эмис-

сионных датчиков с коллиматорами, совмещёнными с проволочным калориметром необходимым для измерения ослабления прошедшего пучка от нагревных инжекторов. Регистрируя сигналы с вторично-эмиссионных датчиков в разрядах без плазмы и с плазмой, можно измерить ослабление каждого пучка по восьми разнесённым в пространстве хордам, вычислить линейную плотность плазмы, а затем, используя адекватный алгоритм решения обратной задачи, восстановить плотность плазмы $n(r)$ в плоскости зондирования.

Разработан проект, создан, отлажен и введен в строй анализатор энергетических спектров ионов, покидающих магнитную ловушку через пробки. Прибор позволяет анализировать ионы с энергиями в диапазоне от нескольких эВ до энергии инжектируемых атомарных пучков в ГДЛ (25кэВ). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при развитии АИЦН наблюдается увеличение потока ионов, покинувших ячейку ГДЛ в диапазоне энергий 4 - 12 кэВ. Среднее значение этой величины заметно меньше энергии инжектируемых дейтронов 22 кэВ. Полученный результат согласуется с теорией. Сделан вывод, что потери энергии из ловушки во время развития неустойчивости малы по сравнению с мощностью, захватываемой мишенной плазмой во время ее нагрева мощными атомарными пучками.

На установке ГДЛ проведена серия измерений радиальных профилей относительного давления, электронной температуры и плотности плазмы. Оптимизация условий ЭЦР нагрева позволила достичь рекордных значений электронной температуры ($T_e \approx 0.7$ keV) в ловушках открытого типа, работающих в квазистационарном режиме. Кроме того, по результатам этих измерений удалось сделать очень важный вывод о том, что прирост электронной температуры при дополнительном нагреве хорошо соответствует скейлингу газодинамического удержания плазмы в ловушке.

Другим направлением исследований являлись эксперименты по инжекции электронного пучка в ГДЛ, измерение профилей радиального давления, электронной температуры и плотности. Для этих целей ранее была создана электронная пушка со сферически выпуклым термокатодом из LaV_6 диаметром 20 мм и радиусом кривизны 26 мм. Расчетные параметры электронной пушки для установки ГДЛ: ток 20 А, энергия электронов 50 кэВ, длительность импульса 5 мс. Электронный пучок формируется в магнитоизолированном диоде, полусферический

катод расположен на торце скругленного высоковольтного электрода с диаметром 60 мм, который погружен в продольное магнитное поле 0,12 Тл, анодом пушки служит труба диаметром 100 мм коаксиально окружающая катодный электрод, такая конфигурация позволяет формировать пучок с малым угловым разбросом. В серии опытов найдены устойчивые режимы работы пушки. Мощность нагрева LaB_6 катода электронной пушки составляет 450 Вт, при этом полученный ток пучка был 12,5 А, для ускоряющего напряжения 35 кВ, что близко к расчетному первеансу пушки в $18 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$. Путем увеличения длительности отпирающего ключ светового сигнала были получены пучки с длительностью до 10 мс, что удовлетворяет потребностям ГДЛ по длительности пучка.

Другим направлением исследований на ГДЛ были эксперименты по исследованию равновесных пространственных профилей давления горячих ионов в режимах с высоким относительным давлением плазмы. Исследования проводились при помощи пучково-спектроскопической диагностики, основанной на динамическом эффекте Штарка (MSE), которая измеряла величину локально возмущения магнитного поля в плазме $\Delta B/B$, связанного с высоким относительным давлением. По полученному распределению диамагнитного возмущения можно было восстановить радиальный профиль давления горячих ионов плазмы.

Для моделирования пространственного, углового и энергетического распределения горячих ионов в эксперименте на установке ГДЛ использовался 3х мерный численный код MCFIT+, основанный на методе Монте-Карло. Результаты эксперимента находятся в хорошем согласии с расчетами, которые используют теорию парных кулоновских столкновений и уравнения классической магнитной гидродинамики, что указывает на классический характер удержания горячих ионов в экспериментах с высоким давлением на установке ГДЛ.

2. Монтаж узлов модернизируемой магнито-вакуумной системы на установке ГДЛ. Испытания модернизированных систем на установке ГДЛ, измерение рабочих параметров

2.1 Монтаж узлов модернизируемой магнитной системы на установке ГДЛ, рабочие испытания, результаты измерения параметров.

Целью модернизации магнитной системы ГДЛ была ее адаптация к экспериментам с дополнительным ЭЦР нагревом. На рисунке

2.1 представлено схематическое изображение установки ГДЛ.

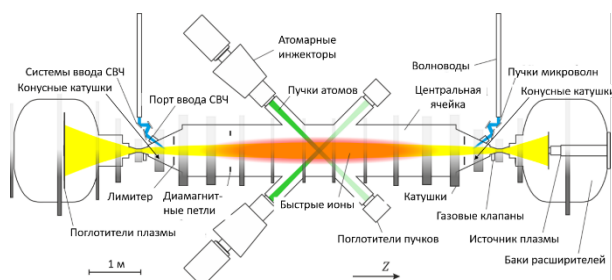


Рисунок 2.1. Схематическое изображение установки ГДЛ.

Ввод пучков СВЧ излучения двух гиротронов с частотой 54,5 ГГц с суммарной мощностью $2 \times 0,4$ МВт производится с двух сторон установки вблизи магнитных пробок под углом к плазме со стороны сильного магнитного поля [2]. Положения поверхностей циклотронного резонанса для частоты 54,5 ГГц, что соответствует магнитному полю $H_{\text{ECRH}} = 1,95 \text{ Т}$, в основном, определяется токами в т.н. конусных катушках (см. Рис. 2.1). Для реализации стабильного дополнительного ЭЦР нагрева плазмы необходима точная настройка положения резонансных поверхностей относительно точки пересечения оси микроволнового пучка с границей плазмы. Это означает на практике, что токи в конусных катушках должны регулироваться с точностью не хуже $\pm 0,5\%$ в диапазоне 25-30 кА. Для генерации тока в конусных катушках, которые были соединены последовательно, был задействован дополнительный конденсаторный накопитель с емкостью 0,15 Т и регулируемым рабочим напряжением до 4,5 кВ. Последовательная сборка конусных катушек была шунтирована системой сильноточных диодов, что позволило реализовать стабильный (с точностью не хуже $\pm 0,5\%$) ток в конусных катушках в течение более 7 мс, что достаточно для реализации ЭЦР нагрева длительностью до 4 мс. Для измерения абсолютных значений токов в элементах магнитной системы с нужной точностью были использованы стандартные измерители, произведенные фирмой LEM. Сигналы от всех измерителей оцифровываются при помощи системы регистраторов формы импульсов, записываются в базу данных эксперимента, затем обрабатываются и визуализируются при помощи специальной программы. На рисунке 2.2 представлены формы импульсов тока во всех элементах магнитной системы установки ГДЛ.

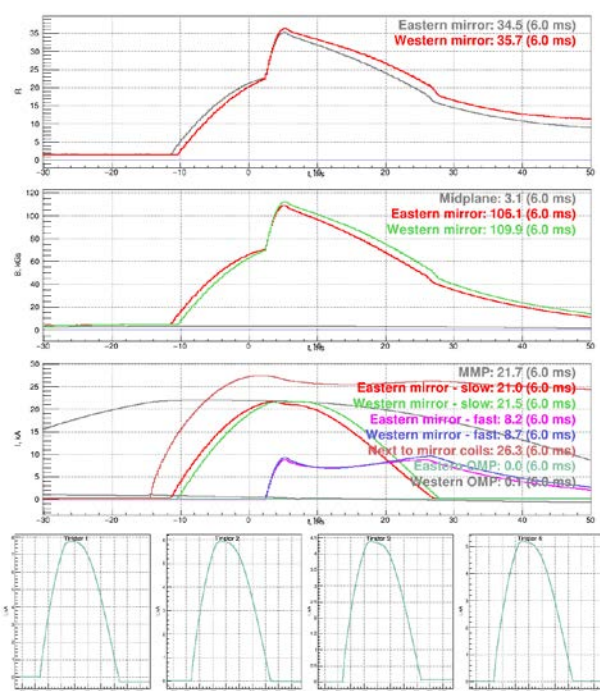


Рисунок. 2.2. Формы импульсов тока во всех элементах магнитной системы установки ГДЛ.

На графике 3 (сверху) форма импульса тока в сборке конусных катушек обозначена как «Next to mirror coils». В данном рабочем «выстреле» максимальное значение тока составляет 26,3 кА. Описанная выше система позволяет реализовать точную настройку положения поверхности резонанса и эффективно использовать микроволновое излучение в качестве дополнительного средства нагрева электронной компоненты плазмы. Как будет показано в следующих разделах, это впервые позволило исследовать ключевые физические процессы, определяющие продольный транспорт энергии в плазме, удерживаемой в пробкотроне в диапазоне электронных температур от 200 до 500 эВ.

2.2 Монтаж узлов модернизируемой вакуумной системы на установке ГДЛ, использование модернизированной системы для обеспечения вакуумных условий в процессе эксперимента.

В ходе модернизации вакуумной системы была произведена замена всех морально устаревших турбомолекулярных насосов ТМН-1500 (в количестве 3 шт.) на современные насосы фирмы Shimadzu (TMP2804). Кроме того, установка была оснащена современной системой «безмасляной» форвакуумной откачки, а также современными масс-спектрометром и теческательем. Проведенная модернизация позволяет использовать систему высоковакуумной откачки в круглосуточном режиме, что суще-

ственно сокращает время, необходимое для подготовки вакуумных условий к эксперименту после вскрытия на атмосферу. Предельный уровень давления остаточного газа перед рабочим импульсом установки составляет $(1-3) \times 10^{-5}$ Па.

3. Монтаж элементов модернизируемого диагностического комплекса на установке ГДЛ. Испытания модернизированных и вновь созданных диагностик в условиях эксперимента на установке ГДЛ, измерение рабочих параметров

В ходе работ 2016 года по этому направлению были существенно расширены возможности диагностического комплекса установки ГДЛ с целью, в первую очередь, обеспечить эффективное выполнение планов экспериментальных работ, направленных на изучение вопросов продольного удержания частиц и энергии плазмы.

3.1 Оптические диагностики в расширителе ГДЛ.

Физическая программа изучения физики продольного удержания плазмы и поперечного транспорта в расширителе-диверторе газодинамической ловушки (ГДЛ) предполагает использование новых бесконтактных диагностик с большим количеством каналов измерения. Одной из таких систем является диагностика многокурсовой томографии плазмы в оптическом диапазоне спектра, ввод в эксплуатацию, которой намечен на начало 2017 г. Разработку полномасштабной диагностики с несколькими десятками линий наблюдения предваряли пилотные эксперименты с прототипом оптической системы, имеющей три линии наблюдения, как показано на рисунке 3.1.

В пилотной версии был испытан и оптимизирован образец трёхканального измерительного модуля на основе лавинных фотодиодов и широкополосных усилителей с малым уровнем шума. Уже пилотные измерения динамики интенсивности излучения атомарной компоненты плазмы в «западном» расширителе ГДЛ в спектральном диапазоне 653-658 нм, сделанные в различных экспериментальных режимах, позволили получить существенные новые данные. Динамика оптических сигналов в расширителе свидетельствует о наличии колебаний плазмы, частотный спектр которых находится в диапазоне десятков килогерц. Измерения по трём линиям наблюдения показывают, что колебания имеют сложную пространственную модовую

структуру. Для её детального изучения необходима локализация измерений порядка 1 см, что будет обеспечено в многоканальной томографической диагностике. Совместно с оптическими измерениями, планируется развитие теории и численного кода для моделирования физических процессов в плазме расширителя. В частности, это позволит преобразовать данные измерения интенсивности излучения плазмы в пространственные профили плотности атомов.

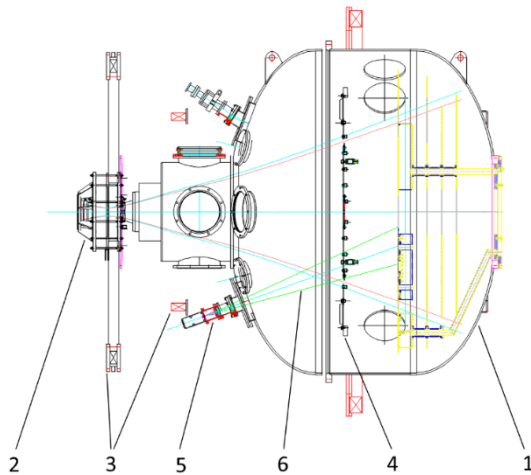


Рисунок 3.1. Схема «западного» расширителя ГДЛ с пилотной трёхканальной версией оптической диагностики для измерения динамики пространственных профилей интенсивности излучения плазмы: 1 – вакуумная камера расширителя, 2 - магнитная пробка, 3 – катушки магнитного поля расширителя, 4 – абсорбер плазмы, 5 – оптическая система регистрации с измерительным модулем на базе лавинных фотодиодов, 6 – линия наблюдения оптической диагностики.

3.2 Система зондовых диагностик в расширителе ГДЛ.

Для измерения параметров плазмы в области расширителей установки ГДЛ и исследования физических процессов, определяющих продольный транспорт частиц и энергии плазмы, была смонтирована система электрических зондов, которая позволяла производить измерения потенциала плазмы и характерной энергии электронов. Зонды были смонтированы на специальных координатных устройствах, позволяющих осуществлять перемещение вдоль оси установки. Кроме того, зонды были оснащены электронными схемами, позволяющими производить измерения в эмиссионном режиме (для измерения потенциала плазмы) и

режиме ленгмюровского зонда с мониторингом его вольт-амперной характеристики (для измерения электронной температуры).

3.3 Импульсные измерители давления нейтрального газа в расширителях.

Важную роль в транспортных процессах, определяющих продольные потери энергии в пробкотроне, играет нейтральный газ в области расширителей. Для измерения формы импульсов давления газа в расширителях в процессе плазменного разряда на установке ГДЛ были смонтированы специально разработанные магниторазрядные импульсные датчики, имеющие временное разрешение ~ 1 мс. Использование этих датчиков совместно с системой инъекции водорода в расширители позволило исследовать влияние концентрации нейтрального газа в области расширителей на параметры плазмы в ловушке (см. следующие разделы).

4. Изучение удержания плазмы на установке ГДЛ с использованием модернизированного диагностического комплекса в условиях нагрева плазмы при помощи атомарной инъекции

К числу первоочередных вопросов, ответы на которые необходимы для проектирования установок следующего поколения на основе пробкотронов, относятся следующие:

1. В какой минимальной степени расширения магнитного потока в области за магнитной пробкой может быть установлен плазменный коллектор (поглотитель), при которой не возникают аномальные потоки энергии вдоль магнитного поля за счет эмиссии холодных электронов с поверхности коллектора и их проникновения в ловушку?
2. Какова величина перепада электрического потенциала в узком дебаевском слое вблизи поглотителя плазмы и возможно ли этот перепад потенциала снизить до значений ниже порога возникновения униполярных дуговых разрядов?

Серия исследований, выполненных в 2016 году на установке ГДЛ, была посвящена, в основном, поиску ответов на эти вопросы. В экспериментах, результаты которых будут представлены ниже, электронная температура в центральной плоскости ловушки измерялась при помощи системы томсоновского рассеяния. Суммарная энергия горячих ионов, рожденных в результате атомарной инъекции, измерялась при помощи диамагнитных зондов. Одиночный

ленгмюровский зонд использовался для измерения потенциала плазмы вблизи специального подвижного коллектора (см. рисунок 4.1). Этот зонд представлял собой проволочную петлю из торированного вольфрама диаметром 0,12 мм и длиной 7 мм. Расстояние между зондом и подвижным коллектором составляло 90 мм. Зонд мог работать как классический ленгмюровский, а также и как эмиссионный. В эмиссионном режиме осуществлялись прямые измерения потенциала плазмы. Кроме того, потенциал плазмы можно было получить их анализа вольт-амперной характеристики зонда в ленгмюровском режиме. Подвижный плазменный коллектор был установлен в бак-расширитель со стороны противоположной источнику плазмы (см. рисунок 2.1). Изменение степени расширения осуществлялось путем передвижения коллектора вдоль оси установки (см. рисунок 4.1). Подвижный коллектор, также, как и неподвижный с противоположной стороны, был заземлен.

Измерения параметров плазмы вблизи поверхности подвижного коллектора производилось в режиме, когда начальная плазма (необходимая для начального захвата атомарных пучков) генерировалась при помощи СВЧ пробоя газа. В этом режиме давление нейтрального газа в расширителях было одинаковым. Электронная температура (T_e) и плотность (n_e) в центральной плоскости ловушки измерялись при помощи системы томсоновского рассеяния в момент 0,5 мс до выключения атомарных пучков. Зависимость T_e и n_e от степени расширения – K показаны в режиме с нагревом плазмы атомарной инжекцией на рисунках 4.2 и 4.3 (ромбы), соответственно.

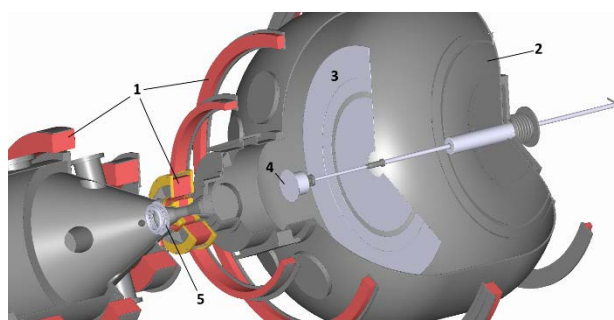


Рисунок 4.1. Схема эксперимента с подвижным плазменным коллектором. 1 – магнитные катушки, 2 – бак расширителя, 3 – поглотитель плазмы, 4 – подвижный коллектор с установленным зондом, 5 – плазменный лимитер.

При степени расширения $K > 40$ электронная температура и плотность, практически, не изменяются, то есть, не зависят от K .

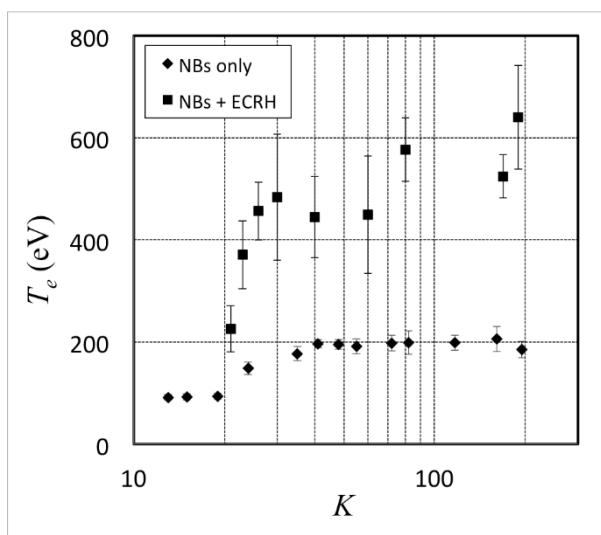


Рисунок 4.2. Зависимость электронной температуры от степени расширения с нагревом только атомарной инжекцией (ромбы) и атомарной инжекцией совместно с ЭЦР нагревом (квадраты).

Неизменность других параметров плазмы в ловушке при $K > 40$ также означает, что эмиссия холодных электронов с коллектора, установленного в позицию с $K > 40$ не оказывает заметного влияния на параметры плазмы в пробкотроне. Только при $K < 40$ плазменный коллектор возмущает параметры удерживаемой в ловушке плазмы.

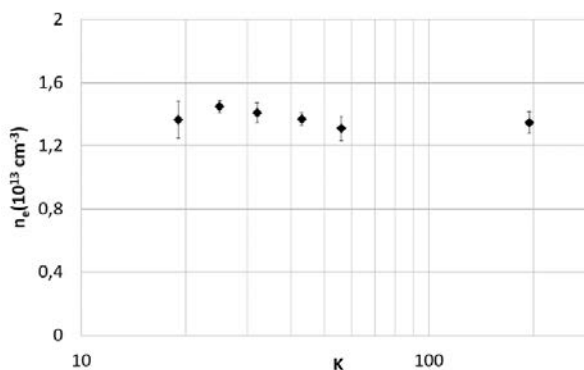


Рисунок 4.3. Зависимость плотности плазмы от степени расширения с нагревом атомарной инжекцией и с дополнительным ЭЦР нагревом.

Потенциал плазмы вблизи коллектора остается на уровне 10–20 В при $K > 70$ (см. рисунок 4.4). Уменьшение K приводит к слабому росту перепада потенциала, который достигает величины 100 В при $K \sim 30$.

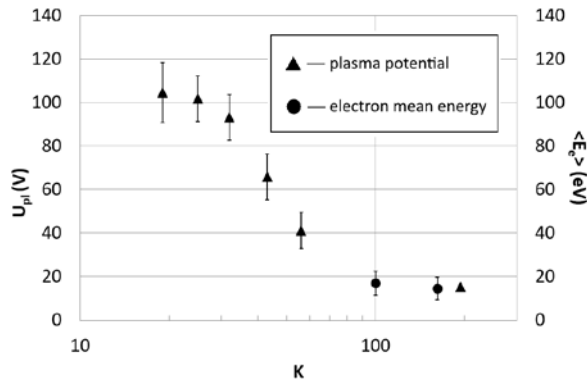


Рисунок 4.4. Потенциал плазмы (треугольники) и характерная энергия электронов (кружки) на расстоянии 70 мм от коллектора в зависимости от степени расширения в режиме с нагревом атомарной инжекцией.

5. Исследование удержания плазмы в условиях дополнительного ЭЦР нагрева и инжекции электронного пучка

В режиме с дополнительным ЭЦР нагревом плазмы также проведены измерения зависимостей параметров плазмы в ловушки от степени расширения в области, где располагался коллектор. В качестве примера результатов этих измерений на рисунке 4.2 показана такая зависимость для электронной температуры. По результатам этой серии измерений также можно сделать вывод об отсутствии аномального продольного транспорта энергии при $K > 40$.

6. Исследование продольного удержания и поперечного переноса двухкомпонентной плазмы с высоким значением β в установке ГДЛ в условиях дополнительного ЭЦР нагрева

Все измерения, представленные в предыдущих разделах выполнены в режимах с достаточно высоким значением относительного давления плазмы $\beta=0,2-0,4$. Следует также заметить, что наиболее существенным каналом потерь энергии в этих режимах является продольный транспорт. Согласно специально проведенной серии измерений, направленной на изучение глобального баланса энергии плазмы, мощность поперечных потерь энергии не превышает 10% от мощности продольных. Наиболее интересными из полученных в этих условиях результатов представляются данные измерений в режимах с дополнительным ЭЦР нагревом. Наблюдаемые значения потенциала и средней энергии электронов свидетельствуют о наличии плазмы с низкой электронной температурой вблизи поверхности поглотителя. Температура

электронов в этой плазме составляет 15-20 эВ, что много меньше соответствующей величины в ловушке. В случае степени расширения более 40 потенциал вблизи коллектора составляет всего несколько десятков Вольт и не увеличивается с ростом K . Это означает, что перепад потенциала в дебаевском слое много меньше значения электронной температуры в ловушке. Эти выводы находятся в хорошем согласии с предсказаниями теории, которые суммированы в работе [3]. Другой важный вывод следует и факта, что в диапазоне степеней расширения $40 < K < 200$ не наблюдается влияние позиции коллектора на основные параметры плазмы в ловушке. Доказательство возможности эффективного нагрева плазмы при относительно низких значениях степени расширения имеет большое практическое значение для проектов ловушек открытого типа следующих поколений, включая установки реакторного класса. В качестве аргумента, подтверждающего этот важный вывод, рисунок 6.1 демонстрирует спектр фотонов лазерного излучения, рассеянных на электронах плазмы. Этот спектр соответствует максвелловскому распределению электронов с температурой $\sim 0,7$ кэВ. Важно заметить, что эта температура получена в режиме с $K = 30$, ее величина оказывается близкой к рекордному значению для пробкотронов, удерживающих плазму в квазистационарном режиме [4].

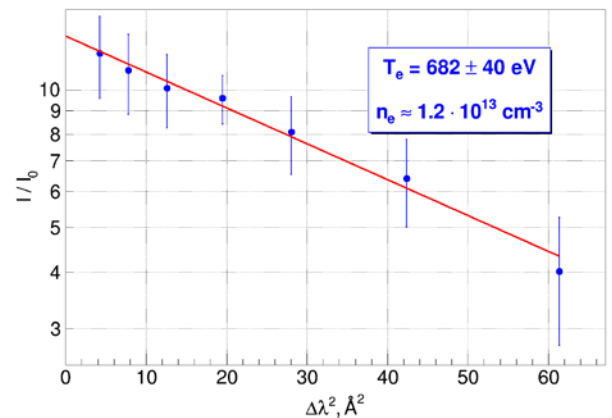


Рисунок 6.1. спектр фотонов лазерного излучения, рассеянных на электронах плазмы.

Список использованных источников

- [1] A.A.Ivanov, V. V. Prikhodko, Gas dynamic trap: overview of the concept and experimental results, Plasma Phys. Control. Fusion 55 063001(2013).
- [2] A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov, O. B. Smolyakova, P.A. Bagryansky, V. I.

Malygin, M. Thumm. Auxiliary ECR heating system for the gas dynamic trap. Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics, no 6, p. 49-51 (2012).

[3] D. Ryutov, Fusion Science and Technology 47, 148 (2005).

[4] P. Bagryansky et al, Phys. Rev. Lett. **114**, 205001 (2015).

№ 14.1.2 Развитие мощных инжекторов пучков быстрых атомов для стационарных термоядерных систем

Введение

В отчете представлены результаты исследований и разработки важных элементов мощного квазистационарного инжектора пучка быстрых атомов водорода с баллистической фокусировкой большой длительности и инжектора пучка быстрых атомов высокой энергии на основе интенсивного пучка отрицательных ионов водорода.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

ИЯФ им Г.И.Будкера СО РАН в последние годы существенно продвинулся в развитии инжекторов пучков быстрых атомов водорода. Создан уникальный инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов водорода с энергией 15 кэВ и мощностью 2 МВт для нагрева плазмы в магнитных ловушках. Разработан, испытан и серийно применяется нагревный инжектор пучка быстрых атомов водорода с мощностью 1 МВт и длительностью импульса 2 с. Разработаны диагностические инжекторы пучков быстрых атомов с длительностью импульса до 10 с, которые используются в ряде ведущих мировых научных центров на установках с магнитным удержанием плазмы. Предложен проект инжектора пучка атомов водорода с энергией до 1 МэВ на основе отрицательных ионов. Проект основан на раздельном формировании и ускорении пучка отрицательных ионов. Задача получения непрерывного пучка быстрых атомов большой энергии (1 МэВ) и большой мощности (~1 МВт) является до сих пор неразрешимой для ведущих мировых лабораторий, занимающихся разработкой и созданием инжекторов пучков быстрых атомов. Для решения этой задачи исследования производились по нескольким направлениям.

Произведен выбор ионно-оптической системы формирования пучка большой длительности с интенсивным водяным охлаждением. В результате ионно-оптических и термодинамических расчетов выбраны варианты трехэлектродной и четырехэлектродной многоселевых ионно-оптических систем для формирования мощных ионных пучков большой дли-

тельности. Электроды этих систем имеют внутренние каналы для интенсивного водяного охлаждения.

Исследовано термомеханическое поведение элементов мощного ионного источника с импульсом большой длительности. С помощью компьютерного кода ANSYS проведены термомеханические расчеты поведения электродов ионно-оптической системы с интенсивным водяным охлаждением. Максимальная температура прогрева электрода составляет 78 °С. Также произведен расчет распределения тепловых деформаций электрода. Полученные величины деформаций являются приемлимыми для аккуратного формирования ионного пучка. Дополнительно рассмотрено термомеханическое поведение фарадеевского экрана высокочастотного плазменного эмиттера. Для снятия тепловой нагрузки с экрана требуется прокачка воды по тонкостенным продольным каналам.

Разработаны наиболее критичные системы элементов питания мощного ионного источника, такие как высоковольтный модулятор и высокочастотный генератор для питания антенны плазменного эмиттера. В выбранном варианте модулятора стабилизация напряжения обеспечивается последовательно включенными ячейками на основе биполярных транзисторов с изолированными затворами. В настоящее время разработан и испытан вариант высокочастотного генератора с использованием мощной тетродной лампы. Кроме того, разрабатывается вариант высокочастотного генератора на основе транзисторов.

Исследовано термомеханическое поведение элементов атомного драйвера для интенсивных источников ионов H⁻ с помощью компьютерного кода ANSYS (распределения температуры и напряжений для разрядного канала, анода и прикатодной вставки). В соответствии с расчетами наибольший нагрев испытывает прикатодная вставка. Для окончательного уточнения термомеханического поведения элементов атомного драйвера требуется экспериментальное определение тепловых нагрузок на элементы атомного драйвера.

Произведена оптимизация катодного узла атомного драйвера. В оптимизированном варианте катодного узла атомного драйвера, эмиттирующие борид лантановые диски нагреваются за счет непосредственного теплового контакта шайбами из терморасширенного графита (граффлекса), расположенными между дисками. Граффлексовые шайбы нагреваются за счет протекания тока в поперечном направлении. Такая конструкция катода вследствие исключения перегрева элементов является надежной.

Проведены расчеты траекторий заторможенных ионов в рекуператоре ионных пучков. Входящие ионы с энергией 1 МэВ аккуратно тормозятся и без потерь попадают на поверхность коллектора, находящегося под потенциалом 22 кВ. Эффективность рекуператора, таким образом, составляет 97.8%. Подавление потока вторичных электронов с поверхности коллектора осуществляется специальным электродом.

Произведены расчеты электрической прочности и тепловых нагрузок элементов рекуператора, оптимизация его конструкции. В выбранном варианте рекуператора максимальная величина напряженности электрического поля не превышает 20 кВ/см и не является критичной. Мощность потока ионов на коллектор с площадью $\sim 4000 \text{ см}^2$ составляет $\sim 60 \text{ кВт}$ и эффективно снимается водяным охлаждением.

2. Подготовка инжектора к испытаниям

Схема нагревного инжектора с мощностью пучка быстрых атомов 1 МВт и длительностью импульса 2 с приведена на рис 2.1, фотография инжектора – на рис 2.2.

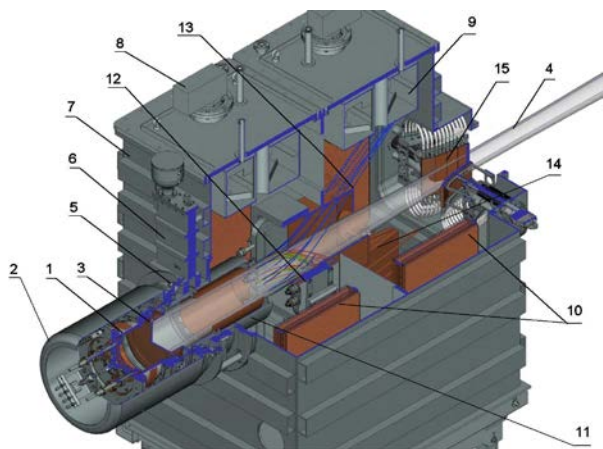


Рисунок 2.1 Схема инжектора: 1 - ВЧ источник плазмы, 2 - магнитный экран, 3 - ионно-оптическая система, 4 - пучок быстрых атомов, 5 - прицельное устройство, 6 - шибер ионного источника, 7 - вакуумный танк, 8 - головки криокулера, 9 - бак с жидким азотом, 10 - криопанели, 11 - нейтрализатор, 12 - отклоняющий магнит, 13 - диафрагма, 14 - приемник положительных ионов, 15 - калориметр.

Наиболее важным элементом инжектора является ионный источник. В ионном источнике для формирования ионного пучка используется плазменный ВЧ - эмиттер, подобный описанному в [1] и оригинальная многочелевая ионно-оптическая система с баллистической фокусировкой, исследования которой представлены в

работе [2]. Фотографии ВЧ эмиттера и ионно-оптической системы представлены на рис. 2.3.

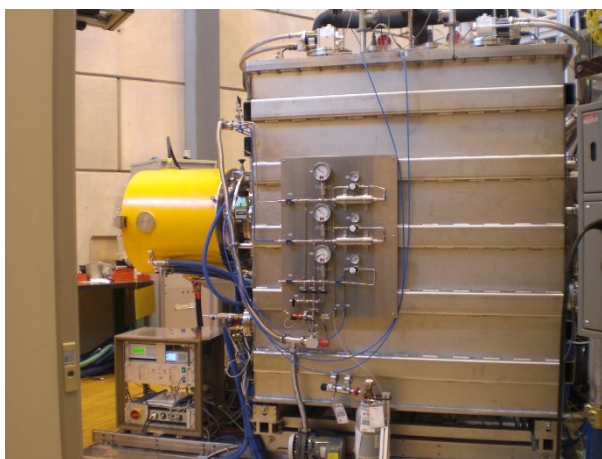


Рисунок 2.2 Фотография инжектора.

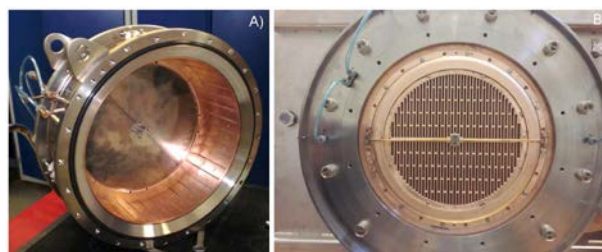


Рисунок 2.3 Плазменный ВЧ эмиттер и ионно-оптическая система ионного источника.

В процессе подготовки инжектора к испытаниям были отлажены и проверены все элементы инжектора и системы питания.

3. Получение мощного пучка быстрых атомов

Первое включение инжектора производилось при энергии пучка 15 кэВ. Затем по мере получения беспробойных импульсов энергия и ток пучка увеличивались согласованным образом. Для выхода инжектора на рабочие параметры потребовалось около 1000 импульсов. На рис. 3.1 показаны осциллограммы параметров инжектора, формирующего пучок атомов водорода с мощностью 1 МВт и длительностью импульса 0.45 с, на рис 3.2 осциллограммы для пучка атомов дейтерия с мощностью 1 МВт и длительностью импульса 2 с.

4. Изучение параметров полученного мощного пучка

В процессе выхода инжектора на рабочие параметры мощность и длительность пучка быстрых атомов были незначительными и для оперативного контроля профиля пучка исполь-

зовался набор вторично-эмиссионных детекторов. Пример измерения профиля пучка быстрых атомов набором вторично-эмиссионных детекторов приведен на рис. 4.1. При приближении к рабочим параметрам инжектора профиль пучка по измерению прироста температуры воды, проходящей через панели калориметра. Результат измерения калориметром зависимости ширины пучка быстрых атомов от первеанса ионного пучка представлен на рис. 4.2. Измеренная кривая имеет ясно выраженный минимум, что свидетельствует о высоком качестве ионно-оптической системы инжектора.

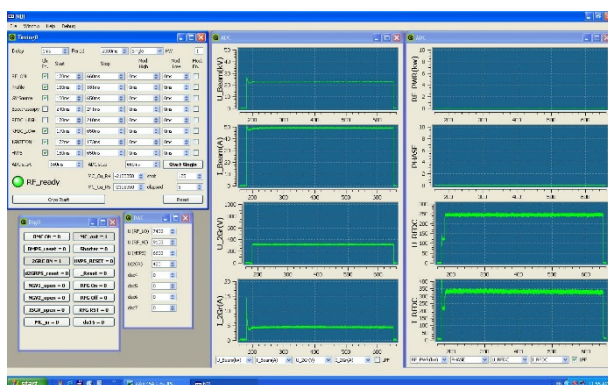


Рисунок 3.1 Осциллограммы параметров инжектора, формирующего пучок атомов водорода с мощностью 1 МВт и длительностью импульса 0.45 с.

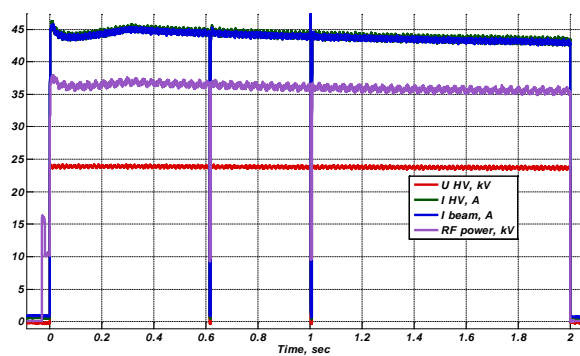


Рисунок 3.2 Осциллограммы параметров инжектора, формирующего пучок атомов дейтерия с мощностью 1 МВт и длительностью импульса 0.45 с.

В полученном пучке быстрых атомов кроме атомов с полной энергией E присутствуют также атомы с энергией $E/2$ и $E/3$. Измерения состава пучка производились методом доплеровской спектроскопии. Результат измерений представлен на рисунке 4.3. Доля мощности пучка атомов с полной энергией составляет 76%.

При формировании пучка быстрых атомов дейтерия были выполнены измерения по-

тока нейтронов из инжектора. Полный нейтронный выход из инжектора составил $1.5 \pm 0.2 \times 10^8$ нейтронов/(А·с) при энергии 30 кэВ. Около 30% нейтронов образуются в нейтрализаторе, остальные нейтроны – на калориметре.

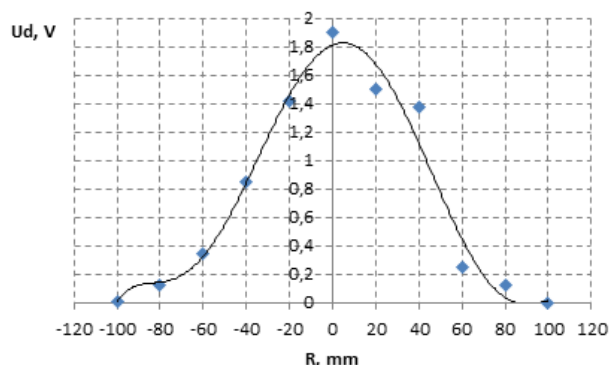


Рисунок 4.1 Профиль пучка быстрых атомов, измеренный набором вторично-эмиссионных детекторов.

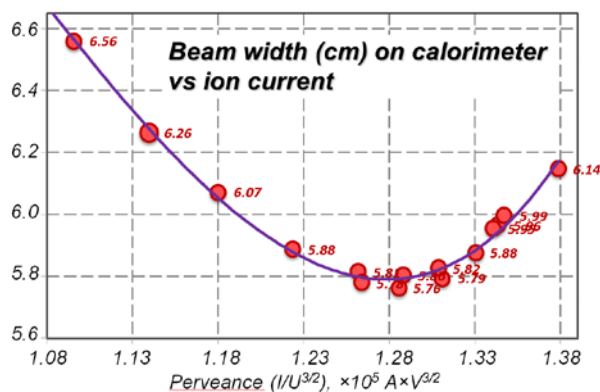


Рисунок 4.2 Измеренная калориметром зависимость ширины пучка быстрых атомов от первеанса ионного пучка.

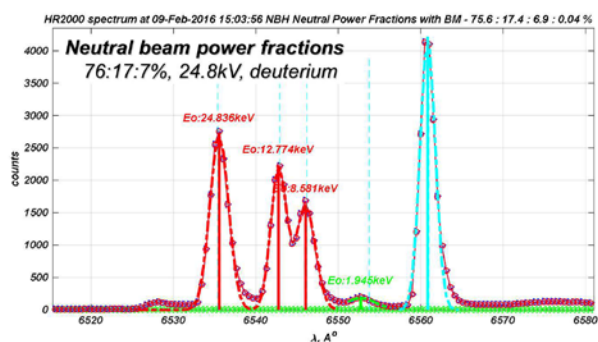


Рисунок 4.3 Измеренный доплеровский спектр атомов пучка дейтерия.

5. Разработка системы плазменных драйверов для источника

Общая схема источника отрицательных ионов с током пучка до 9 А [3] показана на рис. 5.1. Источник состоит из четырех ВЧ плазменных драйверов, увеличенной расширительной

камеры, пятиэлектродной ионно-оптической системы, магнитной системы, цезиевой и водородной систем (не показаны на схеме).

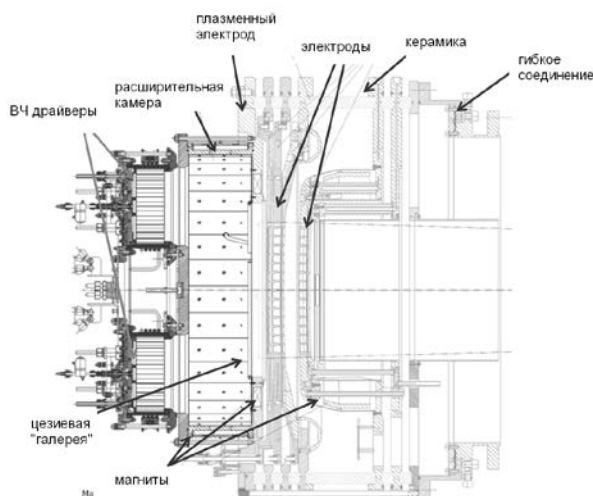


Рисунок 5.1 Вид источника отрицательных ионов в разрезе.

Высокочастотный плазменный драйвер, схематически показанный на рис. 5.2, предназначен для создания плазмы в ионном источнике. Плазма в драйвере генерируется при возбуждении ВЧ поля с частотой 1 МГц во внешней соленоидальной антенне. Из драйвера плазма переносится в расширительную камеру, и бомбардирует плазменный электрод, на поверхность которого реализуется конверсия частиц плазмы в отрицательные ионы. Цилиндрическая камера драйвера изготовлена из оксида алюминия, антенна - из изолированной медной трубки, охлаждаемой водой. На задней панели драйвера расположены четыре ввода жидкости для нагрева-охлаждения внутреннего защитного экрана (экран Фарадея) и два ввода для охлаждения заднего фланца. В центральной части фланца смонтирован модуль поджига ВЧ разряда. К модулю поджига присоединяется электромагнитный клапан для напуска водорода. Плазменный драйвер потребляет до 50 кВт ВЧ мощности. Подобные ВЧ драйверы широко используются для создания плазмы в ионных источниках положительных ионов водорода для нагревных инжекторов [2] и имеют высокую надежность.

6. Выбор системы подачи цезия в источник

Генерация отрицательных ионов происходит за счет конверсии положительных ионов и нейтральных атомов на поверхности сетки ионно-оптической системы с низкой работой выхода. Образующиеся отрицательные ионы вытягиваются ионно-оптической системой и

формируются в пучок. Чистая поверхность металла имеет недостаточно низкую работу выхода для генерации нужного количества отрицательных ионов. Для снижения работы выхода поверхность плазменной сетки покрывают тонким слоем цезия.

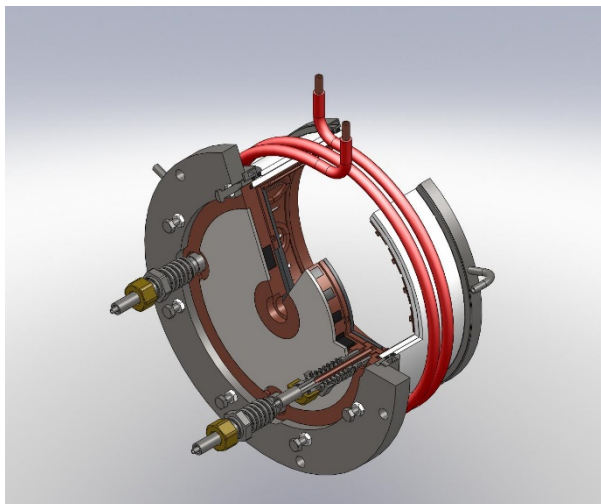


Рисунок 5.2 Схема высокочастотного плазменного драйвера.

Система инжекции, работающая на металлическом цезии, имеет два основных элемента, имеющих индивидуальные системы контроля температуры: печь, в которую помещается контейнер с жидким цезием, и длинный паропровод с инжекционным соплом на конце. При нагреве печи помещенный в нее чистый металлический цезий начинает испаряться, и образуется поток цезия в камеру источника через паропровод. Интенсивность испарения зависит от температуры печи, следовательно, именно она в первую очередь определяет цезиевый поток. Стенки паропровода должны быть нагреты до температуры не ниже температуры печи, так как в противном случае, на них будет происходить конденсация цезия. Однако это свойство также может быть использовано для управления интенсивностью потока. Вакуумный клапан позволяет изолировать объем печи от камеры источника, что обеспечивает возможность заправлять печь цезием без нарушения вакуума в камере, а значит без остановки работы источника.

Основные требования к системе подачи цезия состоят в следующем:

- Обеспечение дозированной подачи паров цезия и транспортировка паров до рабочей поверхности.
- Оперативная заправка металлического цезия или цезия в ампулах без нарушения вакуума в установке.

- Размещение источников питания под потенциалом ускоряющего напряжения порядка 100 кВ.

- Наличие тепловой развязки между системой подачи цезия и корпусом источника.

Схема выбранной системы цезирования приведена на рис. 6.1. На рис. 6.2 показано расположение галереи раздачи в камере источника. Вид части цезиевой системы со стороны атмосферы представлен на рис. 6.3.

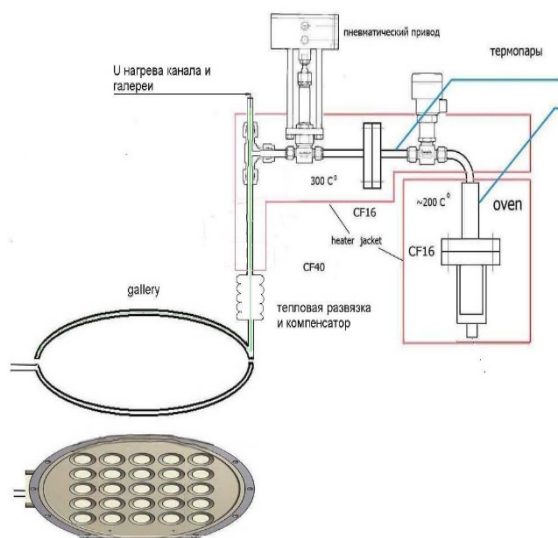


Рисунок 6.1 Схема системы цезирования.

На основании проведенных стендовых работ были определены параметры всей цезиевой системы, способ и мощность нагрева всех элементов тракта на уровне, исключающем возможность конденсации паров цезия на внутренних стенках тракта. распределения диаметров отверстий в галерее. Разработана конструкция, позволяющая проводить регламентные работы и оперативную заправку цезием в ампулах или с непосредственной заливкой металла. Достаточно равномерный выход паров цезия из галереи размером в половину окружности получился с отверстиями диаметром 0.3 мм и шагом 1 см. Измеренное термоионизационным датчиком распределение потока цезия из галереи по азимуту представлено на рисунке 6.4.

Галерея на половину окружности была изготовлена из трубки диаметром 6 мм с толщиной стенки 0.2 мм из нержавеющей стали. Внутренний диаметр галереи - 150 мм. Падение интенсивности выхода паров к концу галереи составляет около 15 %, величину падения можно снизить можно уменьшить за счёт повышения газокINETического давления паров внутри галереи.

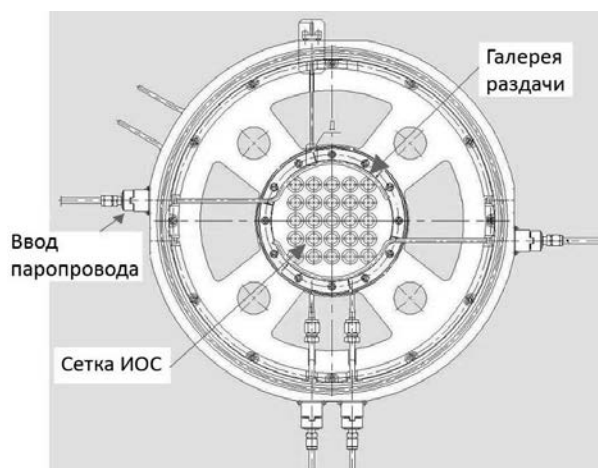


Рисунок 6.2 Расположение галереи раздачи в камере источника.



Рисунок 6.3 Вид части цезиевой системы со стороны атмосферы (без теплозащиты).

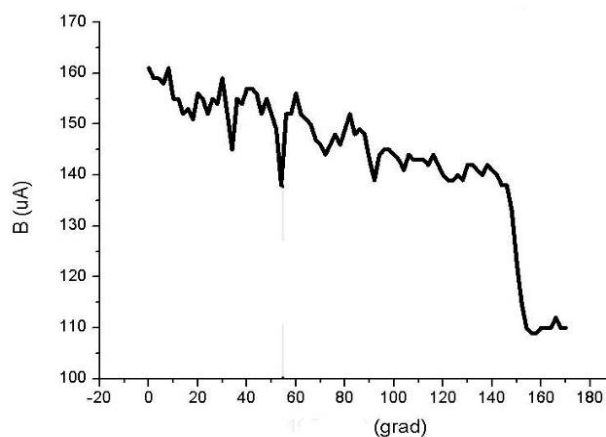


Рисунок 6.4 Распределение потока цезия из галереи по азимуту.

Особое внимание было уделено вопросу зарастания отверстий соединениями цезия с различными газами, содержащимися в объеме инжектора на повышенных давлениях. Эксперименты показали, что для того, чтобы отверстия не зарастали, после работы инжектора требуется некоторое время для очистки внутренних поверхностей от цезия. При этом нагрев испарителя выключен, а весь цезиевый тракт находится при рабочей температуре. Таким образом, требуется специальный сценарий включения и выключения цезиевой системы. Также было показано, что при столь низкой пропускной способности отверстий в галерее система работоспособна.

7. Выбор и оптимизация ионно-оптической системы формирования интенсивного пучка отрицательных ионов

Для формирования пучка ионов H⁻ разработана многоапертурная пятиэлектродная ионно-оптическая система. Ионно-оптическая система является вакуумно плотной - держатели электродов уплотнены через витоновые кольца на керамические кольцевые изоляторы и стянуты стержнями из напряженного армированного стеклотекстолита. Подобная конструкция ионно-оптической системы широко и успешно используется в разработанных в Институте ядерной физики инжекторах пучков быстрых атомов для диагностики и нагрева плазмы на положительных ионах. Электроды ионно-оптической системы имеют интенсивное водяное охлаждение. Ионно-оптическая система источника отрицательных ионов показана на рис. 7.1.

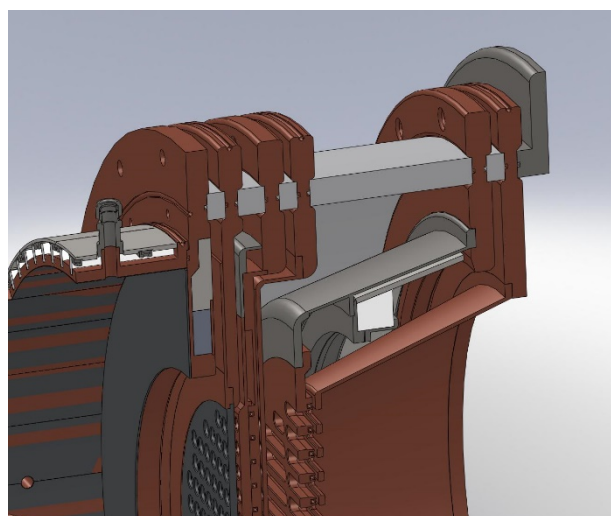


Рисунок 7.1 Разрез ионно-оптической системы источника отрицательных ионов.

Формирование пучка ионов H⁻ в ионно-оптической системе будет осуществляться в

142-х элементарных ячейках. На рис. 7.2 показана оптимизированная в результате численных расчетов элементарная ячейка ионно-оптической системы. Квазипирсовский край в цилиндрическом отверстии плазменного электрода обеспечивает начальную фокусировку элементарного пучка. Вытягивающий электрод с круглыми апертурами выполняет двойную функцию. С одной стороны, напряжение на плазменном электроде оптимизирует прохождение пучка в первом зазоре. С другой стороны, вытягивающий электрод является поглотителем потока электронов, извлеченных вместе с ионами H⁻. Ускоренные электроны попадают на вытягивающий электрод за счет отклонения поперечным магнитным полем. За вытягивающим электродом установлен электрод для подавления вторичной электронной эмиссии с вытягивающего электрода. Апертуры в ускоряющем и заземленном электроде являются щелевыми для исключения попадания потока быстрых атомов, образовавшихся в результате обдирки отклоненных магнитным полем ионов H⁻. Предусматривается подача положительного напряжения на ускоряющий электрод для подавления потока ионов вторичной плазмы в ионно-оптическую систему.

Результаты двумерных расчетов ячейки источника ионов приведены на рис. 7.3. Электроды и эквипотенциали показаны красными линиями, продольное распределение электрического поля – зеленая кривая, траектории ионов – синие линии. В правом верхнем углу рисунка – радиальное распределение плотности тока пучка (синяя кривая) и фазовый портрет пучка (зеленые точки) на расстоянии 140 мм от плазменной сетки. Основные эквипотенциали построены с шагом 3 кВ, а вблизи запирающего электрода – 200 В. Потенциал плазменной сетки -120 кВ, потенциал экстрактора -108 кВ, запирающий потенциал +1 кВ.

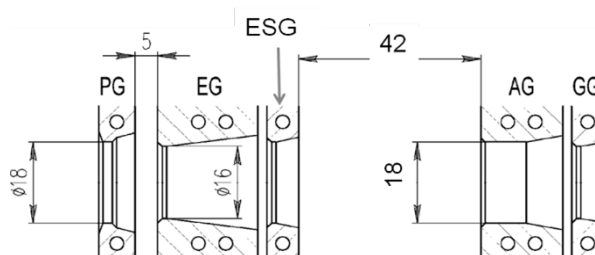


Рисунок 7.2 Элементарная ячейка ионно-оптической системы.

На рис. 7.4 показаны расчетные траектории электронов в ячейке в магнитном поле фильтра напряженностью ~ 100 Гс. Видно, что

магнитное поле фильтра аккуратно отклоняет сопутствующие электроны на вытягивающий электрод.

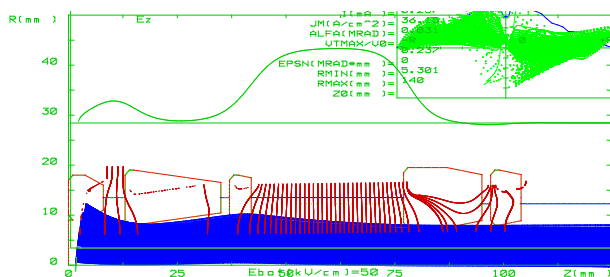


Рисунок 7.3 Результаты двумерных расчетов элементарной ячейки источника ионов.

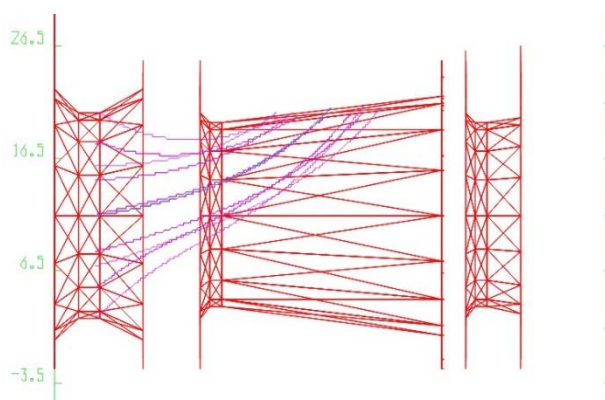


Рисунок 7.4 Траектории сопутствующих электронов в ячейке.

8. Испытания магнитных элементов инжекторного тракта

В низкоэнергетическом тракте инжектора атомов высокой энергии на основе отрицательных ионов [3] имеется два секторных магнита (рис. 8.1), предназначенных для параллельного смещения пучка перед вводом его в ускорительную трубку для последующего ускорения до энергии 1 МэВ. Трансформация сечения пучка при смещении - “круг-в-круг”. Каждый магнит (рис. 8.2) состоит из С-образного магнитопровода, полюсных наконечников секторной формы и двух корректирующих катушек. Основное поле создается двумя слоями постоянных магнитов между каждым полюсным наконечником и магнитопроводом. Материал постоянных магнитов - NeFeB с рабочей температурой до 180°C и остаточной индукцией $B_r=11.3$ кГс. Корректирующие катушки намотаны медной трубкой для возможности водяного охлаждения и служат также термостабилизатором для постоянных магнитов и магнитопровода.

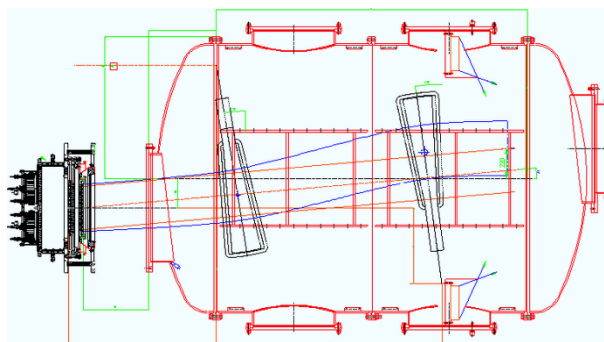


Рисунок 8.1 Расположение секторных магнитов в вакуумной камере низкоэнергетического тракта.



Рисунок 8.2 Фотографии секторного магнита. Вверху – верхний полюс магнита со снятой катушкой, видны постоянные магниты. Внизу - секторный магнит в сборе.

Контрольные измерения магнитного поля проводились в центре межполюсного за-

зора на оси пучка, а также на поверхности полюсных наконечников вблизи центра. Расчетные требуемые значения поля на оси пучка в центре составляли – 224 Гс и 178 Гс для дальнего и ближнего к ИОС магнитов соответственно. В результате измерений обнаружилось, что в контрольной точке на оси пучка в центре магнита поля оказались выше расчетных – 260 Гс и 210 Гс вместо соответственно 224 Гс и 178 Гс. Это связано с тем, что использованные постоянные магниты имеют большее значение параметра B_r .

Измерение магнитного поля в контрольной точке показало его линейную зависимость от тока корректирующих катушек. При величине тока 92 А и 122 А для ближней и дальней катушек соответственно, достигается требуемое расчетное поле в зазоре для комплекта секторных магнитов.

В таблице 8.1 представлена измеренная в контрольной точке зависимость поля от тока катушки для ближнего к ионно-оптической системе секторного магнита. Из таблицы следует, что каждые 100А корректирующего тока снижают магнитное поле на 34 Гс.

9. Экспериментальное изучение ускорения ионов в трубке

Ускорительная трубка предназначена для доускорения вышедшего из низкоэнергетического тракта пучка отрицательных ионов водорода с энергией до 120 кэВ. Ускорительная трубка состоит из девяти высоковольтных электродов, потенциал на которых увеличивается с шагом 110 кВ от 120 кВ до 1 МВ. Электроды трубки изготовлены из меди и охлаждаются водой.

Таблица 8.1. Зависимость поля от тока катушки для ближнего к ионно-оптической системе секторного магнита, измеренная в контрольной точке.

Ток, А	H, Гс
0	214
30	204
50	197
100	180
150	163

Измеренное пространственное распределение поля между полюсами магнитов с точностью 2 % соответствует расчетному.

Были выполнены успешные экспериментальные исследования доускорения ионов

на прототипе ускорительной трубки с энергией доускорения 120 кэВ, показанном на рис. 9.1. Проводилось доускорение пучка положительных ионов водорода с энергией 30 кэВ и током до 10 мА. Ускоряющее электрическое поле в прототипе трубке составляло 25 кВ/см. Токооседание на электродах трубки было незначительным, высоковольтные пробой отсутствовали. Фазовые характеристики ускоренного ионного пучка близки к расчетным.



Рисунок 9.1 Экспериментальная установка для изучения доускорения ионов в трубке.

В настоящее время высоковольтная ускорительная трубка инжектора атомов высокой энергии на основе отрицательных ионов собрана и присоединена к вакуумной камере низкоэнергетического тракта (рис. 9.2).

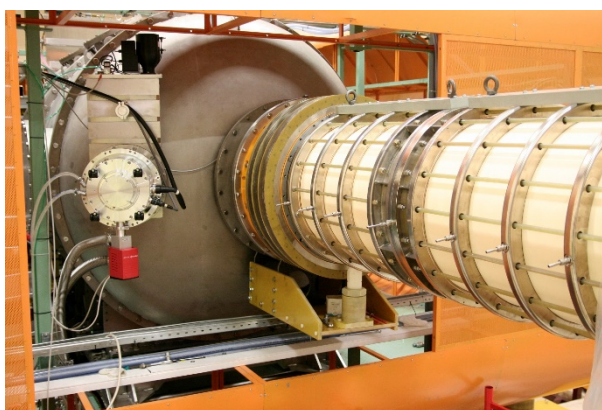


Рисунок 9.2 Ускорительная трубка, присоединенная к вакуумной камере низкоэнергетического тракта.

10. Исследования эффективности рекуператора ионов

В выбранном варианте рекуператора для ионных пучков инжектора атомов водорода высокой энергии на основе отрицательных ионов имеются объективные причины для достижения высокой энергетической эффективности.

Этими причинами являются умеренная величина тока ионов и узкое энергетическое распределение ионов, обусловленное использованием низкоэнергетического тракта. Остаточный ток ионов после плазменного нейтрализатора оценивается величиной ~ 3 А. Результаты численных двумерных вычислений замедления 1 MeV, 3 А пучка ионов в рекуператоре (рис. 10.1) показывают что возможно замедление ионов пучка до энергии 30 кэВ, и может быть достигнута высокая эффективность рекуперации 96-97%.

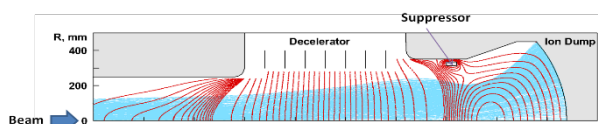


Рисунок 10.1 Результаты двумерных расчетов рекуперации ионов. Ионный коллектор со сферическим дном снабжен запирающим электродом, находящимся под потенциалом 22 кВ относительно коллектора. Остаточная энергия ионов на коллекторе составляет 32 кВ.

Общая энергетическая эффективность инжектора атомов водорода высокой энергии на основе отрицательных ионов помимо рекуперации определяется еще рядом факторов - энергопотреблением элементов инжектора, эффективностью нейтрализации пучка отрицательных ионов, потерями пучка отрицательных ионов вследствие обдирки на остаточном газе и на лимитирующих диафрагмах, эффективностью преобразования тепловой энергии, поглощенной в элементах инжектора в электрическую. На рис. 10.2 показана расчетная общая эффективность инжектора в зависимости от эффективности плазменного нейтрализатора и эффективности высоковольтного модулятора. Величина полной эффективности инжектора составляет 80-90%.

Заключение

Работы, успешно выполненные в 2016 году, являются принципиально важными для создания мощных перезарядных инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов водорода для нагрева плазмы с большой длительностью импульса и для разработки инжектора атомов высокой энергии на основе интенсивного пучка отрицательных ионов.

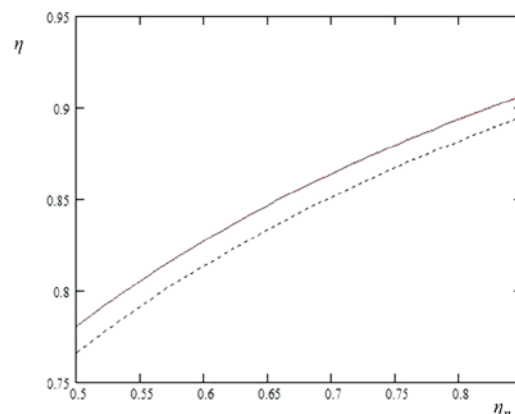


Рисунок 10.2 Зависимость общей эффективности инжектора в зависимости от эффективности плазменного нейтрализатора. Верхняя кривая соответствует эффективности высоковольтного модулятора 98%, нижняя – 96%.

Список использованных источников

- [1] A.Sorokin, V.Belov, V.Davydenko, P.Deichuli, A.Ivanov, A.Podyminogin, I.Shikhovtsev, G.Shulzhenko, N.Stupishin, M.Tiunov. Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating. Rev. Sci. Instrum., v.81, N2, 2010, 02B108.
- [2] V. Davydenko, V. Amirov, A. Gorbovsky, P. Deichuli, A. Ivanov, A. Kolmogorov, V. Kapitonov, V. Mishagin, I. Shikhovtsev, A. Sorokin, N. Stupishin, A. N. Karpushov, A. Smirnov, and R. Uhlemann. Multi-slit triode ion optical system with ballistic beam focusing. Review of Scientific Instruments, Vol.87, 2016, 02B303.
- [3] A.A. Ivanov, G.F. Abdrashitov, V.V. Anashin, Yu.I. Belchenko, A.V. Burdakov, V.I. Davydenko, P.P. Deichuli, G.I. Dimov, A.N. Dranichnikov, V.A. Kapitonov, V.V. Kolmogorov, A.A. Kondakov, A.L. Sanin, I.V. Shikhovtsev, N.V. Stupishin, A.V. Sorokin, S.S. Popov, M.A. Tiunov, V.P. Belov, A.I. Gorbovsky, V.V. Kobets, M. Binderbauer, S. Putvinsky, A. Smirnov, and L. Sevier. Development of a Negative Ion-based Neutral Beam Injector in Novosibisk. Rev. Sci. Instrum., v.85, N2, 2014, 02B102.

№ 14.1.3 Исследование квазистационарных процессов при взаимодействии мощного электронного пучка с плазмой в многопробочном магнитном поле

Введение

Данная научно-исследовательская работа (НИР) по теме № 14.1.3 Исследование квазистационарных процессов при взаимодействии мощного электронного пучка с плазмой в многопробочном магнитном поле (№ 0305-2014-0003) является комплексным исследованием, которое проводится на инфраструктуре единственной в мире многопробочной ловушки ГОЛ-3 в ИЯФ СО РАН.

В состав комплекса ГОЛ-3 входит несколько отдельных электрофизических установок, которые в зависимости от программы исследований могут работать либо совместно, либо по отдельным научным программам. Научные тематики, исследования по которым в настоящее время проводятся на комплексе ГОЛ-3, включают в себя физику нагрева и удержания плазмы в многопробочной магнитной ловушке, физику и технику генерации мощных электронных пучков микросекундного и миллисекундного диапазона длительностей, физику генерации электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов в вакуумных и плазменных структурах, физику воздействия мощных электронных и плазменных потоков на перспективные конструкционные материалы первой стенки и плазмоприёмников будущих термоядерных реакторов.

В соответствии с общим планом работ, в 2016 году исследования проводились по шести отдельным научным направлениям:

1. Расчет и проектирование камеры инжекции мощных нейтральных пучков в многопробочную ловушку.

2. Экспериментальная проверка метода заполнения многопробочной ловушки стартовой плазмой из дугового источника.

3. Развитие экспериментальных и теоретических методов исследования генерации электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе.

4. Исследование схемы двухстадийной генерации электромагнитного излучения на установке ЭЛМИ в области частот выше 0.5 ТГц.

5. Экспериментальное изучение подходов к повышению параметров электронного пучка с

плазменным эмиттером применительно к задачам мощного импульсного теплового воздействия на материалы первой стенки термоядерных установок.

6. Развитие новых оптических методик диагностики поверхности и приповерхностной области при мощном импульсном тепловом воздействии на металлическую мишень.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Одним из направлений являлось моделирование и разработка нового поколения инжектора электронного пучка с плазменным эмиттером в импульсно-периодическом режиме. Разработана концепция источника мощного электронного пучка миллисекундного диапазона для нагрева плазмы в открытых магнитных ловушках. Многоапертурный ускорительный диод источника использует плазменный катод на основе дугового разряда в газе. Электронный пучок транспортируется вдоль сходящегося магнитного поля в линейную плазменную ловушку, где предполагается проводить испытание материалов первой стенки для будущих термоядерных реакторов и исследования нагрева плазмы пучком. В работе была определена структура диода и выполнена оценка основных параметров. Для создания условий эффективной релаксации пучка в плазме (высокой локальной плотности тока), пучок предполагается сделать модулированным – как пространственно, т.е. состоящим из многих отдельных «струй», так и по времени, за счет импульсно-пакетного режима работы. В результате проведенной работы показано, что выбранная схема построения генератора электронного пучка позволяет совместить противоречивые требования высокой локальной плотности тока электронного пучка в ловушке с умеренной средней нагрузкой поверхности диода. Полученное техническое решение позволяет получить электронный пучок с требуемыми параметрами.

Вторым направлением являлась подготовка новой экспериментальной базы для проведения экспериментов по исследованию плазмы при инжекции атомарных пучков с мощностью порядка 1 МВт в многопробочную ловушку ГОЛ-3. Было принято решение о проведении модернизации установки ГОЛ-3 с целью адаптации установки к задаче квазистационарной инжекции нейтральных пучков с мощностью масштаба 1 МВт. В этой версии установки, получившей наименование ГОЛ-NB, планируется проведение экспериментальной

проверки эффективности работы многопробочной магнитной системы для удержания умеренно столкновительной плазмы с низким уровнем турбулентности. В отчетный период был завершён физический проект центральной ловушки. Произведён расчет магнитной системы, выполнены расчёты механических деформаций центральной ловушки в разных режимах работы, завершено рабочее проектирование вакуумного бака центральной ловушки. Проводились работы по созданию вспомогательных систем и узлов.

Третьим направлением работ было исследование импульсного пучкового воздействия большой мощности на перспективные конструкционные материалы первой стенки и плазмприёмников будущих термоядерных реакторов. Основные параметры электронного пучка на мишени: плотность мощности $10 - 20 \text{ ГВт/м}^2$ на размере $1 - 2 \text{ см}^2$ и при длительности воздействия $0,1 - 0,2 \text{ мс}$. Параметр нагрева мишени (heat flux parameter) при этом достигает величины $F_{\text{HF}} \approx (1 - 3) \times 10^2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$. Создан уникальный стенд для исследования импульсного теплового воздействия на материалы стенки экспериментальных термоядерных реакторов и проведены первые в мире эксперименты по динамике эрозии вольфрама в процессе нагрева его поверхности мощным импульсным потоком тепла. Проведены первые эксперименты по пучковому воздействию на мишени из нержавеющей стали и вольфрама при различных интенсивностях пучкового воздействия.

Четвёртое направление связано с разработкой проекта генератора терагерцового излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия с высоким уровнем турбулентности. Эксперименты на установке ГОЛ-3Т были сосредоточены на регистрации частотного спектра и поляризации излучения, эмитируемого из плазмы с различной плотностью в интервале частот $100 - 500 \text{ ГГц}$, и сопоставлении результатов этих измерений с предсказаниями теоретического рассмотрения генерации излучения в пучково-плазменной системе с соответствующими параметрами.

Пятое направление работ было сосредоточено на научных исследованиях по поиску условий эксперимента на установке ЭЛМИ, при которых волновые потоки электромагнитного излучения на выходе из каналов двухканального планарного МСЭ были бы синхронизованы как по частоте, так и по фазе колебаний. Благодаря использованию сильной связи между электродинамическими системами двухканального МСЭ в эксперименте осуществлена практически полная синхронизация выходящих из

каналов волновых потоков не только по генерируемой частоте, но и по фазе колебаний.

2. Расчет и проектирование камеры инжекции мощных нейтральных пучков в многопробочную ловушку

В настоящее время в ИЯФ им. Будкера СО РАН создается многопробочная ловушка ГОЛ-NB – см. рис. 2.1. Основной научной задачей ГОЛ-NB является прямая демонстрация подавления продольных потерь частиц и энергии из ловушки при помощи секций с многопробочным магнитным полем, присоединяемых к центральной ловушке газодинамического типа [1,2]. Нагрев плазмы в ГОЛ-NB будет проводиться методом нейтральной инжекции с мощностью до $1,5 \text{ МВт}$. За отчетный период проведено численное моделирование динамики параметров плазмы в центральной ловушке установки.

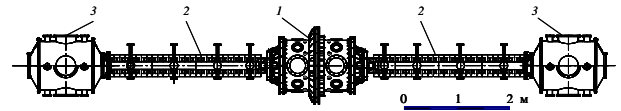


Рисунок 2.1 Общий вид проектируемой установки ГОЛ-NB. Обозначения: 1 – центральная ловушка, 2 – секции с многопробочным магнитным полем, 3 – баки концевых расширителей.

Моделирование было проведено при помощи кода DOL [3]. Вычисления производились для специальной «минимальной» конфигурации установки, в которой вместо многопробочных соленоидов к центральной ловушке присоединены классические короткие магнитные пробки – см. рис. 2.2. В этом случае фактически реализован самый неблагоприятный сценарий работы ГОЛ-NB, в котором отсутствует дополнительное подавление вытекающего в пробки плазменного потока. Полное описание результатов моделирования приведено в [4].

Математическая задача, лежащая в основе кода DOL, состоит из следующих компонентов: решение баунс-усредненного кинетического уравнения для популяции быстрых частиц, создаваемых с помощью нагревных инжекторов; решение уравнений баланса частиц и энергии фоновой плазмы; решение кинетического уравнения для функции распределения нейтральных частиц. Баунс-усреднение кинетического уравнения означает замену «истинной» функции распределения быстрых частиц на

усредненную по периоду циклотронного вращения и баунс-осцилляций частиц. Магнитное поле в ловушке определяется из соотношения поперечного равновесия в параксиальном приближении, учитывается только вклад быстрых частиц. Уравнения баланса фоновой плазмы включают в себя энергообмен между фоновыми ионами и электронами, энергообмен между фоновыми компонентами и быстрыми ионами, продольные потери частиц и энергии, а также потери в результате взаимодействия с нейтральной компонентой, создаваемой в результате инжекции быстрых атомов. Поддержание плотности фоновых частиц осуществляется с помощью постоянного потока ионов. Распределение плотностей фоновых ионов и электронов, а также электростатического потенциала вдоль ловушки находятся из системы уравнений, определяемых бoльцмановским распределением и квазинейтральностью.

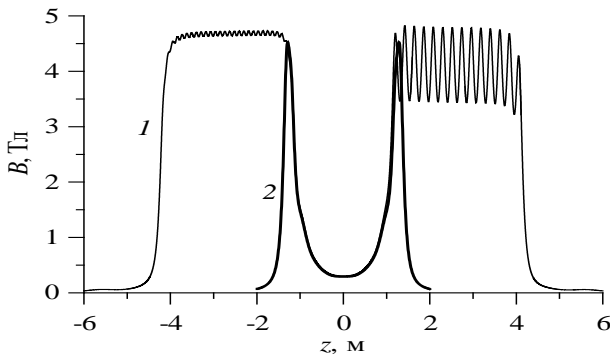


Рисунок 2.2 Зависимость индукции магнитного поля на оси от продольной координаты в полной конфигурации установки (1) и в референсном режиме (2). Для случая (1) левый соленоид показан в конфигурации с однородным магнитным полем, правый – в многопробочной конфигурации.

В модель закладывались следующие физические параметры: магнитная индукция в центральной плоскости $B_{\min} = 0,29$ Тл, в пробке $B_{\max} = 4,5$ Тл (пробочное отношение по вакуумному магнитному полю $R = 15,5$), начальная плотность и температура электронов и ионов мишенной водородной плазмы $n_e = n_i = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = T_i = 3$ эВ, радиус плазмы в центральной плоскости 20 см, поток ионов холодной плазмы для поддержания баланса вещества $I_c = 1000$ экв. А, энергия и ток нейтральной инжекции атомов водорода $E_b = 25$ кэВ и $I_b = 60$ А, инжекция перпендикулярна магнитной оси, угловая расходимость нейтрального пучка $\Delta\theta = 1^\circ$, координата инжекции $z_b = 40$ см, диаметр нейтрального

пучка $d_b = 16$ см, пробочное отношение в точке инжекции $R_b = 1,2$.

На верхней части рисунка 2.3 показана динамика основных параметров плазмы при указанных условиях для численного эксперимента. Постепенное уменьшение плотности плазмы на отрезке времени 1 – 2 мс приводит к некоторому росту электронной температуры во время инжекции. Постепенное уменьшение плотности фоновой плазмы и рост электронной температуры приводят к замедлению обмена энергией между электронами и ионами фоновой плазмы, и как следствие этого – к уменьшению температуры ионов фоновой плазмы.

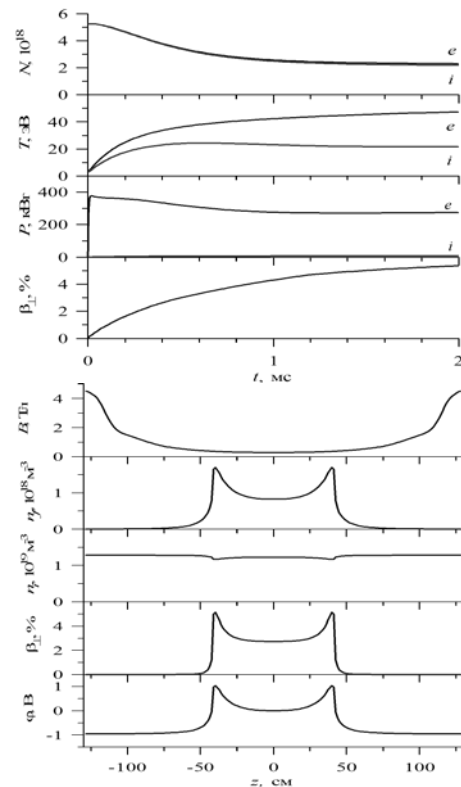


Рисунок 2.3 Вверху: динамика основных параметров плазмы (полное количество электронов и ионов мишенной плазмы в ловушке N , температура электронов и ионов мишенной плазмы T , мощность, передаваемая от быстрых частиц электронам и ионам мишенной плазмы P , максимальное значение относительного давления плазмы β_{\perp}). Индексы e и i у кривых соответствуют электронной и ионной компонентам. Внизу: продольные профили для момента $t = 2$ мс (магнитное поле на оси B , плотность быстрых ионов n_f , плотность ионов мишенной плазмы n_i , поперечное относительное давление быстрых ионов β_{\perp} , амбиоплярный потенциал относительно центра ловушки ϕ).

На нижней части рисунка 2.3 представлены продольные профили некоторых параметров в этом же расчете, нарисованные для момента $t = 2$ мс. Видно, что быстрые ионы действительно локализованы в области, ненамного превышающей по размерам расстояние между точками инжекции. В области существования быстрых ионов возникает небольшой амбиполярный потенциал, который в данном конкретном варианте численного эксперимента по амплитуде много меньше электронной и ионной температур.

Оценка возможного влияния соленоидов с многопробочным магнитным полем проводилась при вводе в расчеты феноменологического параметра, который имеет физический смысл коэффициента, показывающего ослабление продольного потока частиц фоновой плазмы по сравнению с режимом классической газодинамической ловушки. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.4. Как и следовало ожидать, при искусственном уменьшении продольных потерь постепенное уменьшение плотности плазмы в ловушке сначала стабилизируется, а при высоких коэффициентах подавления плотность начинает расти в течение всего импульса инжекции. Одновременно во всех случаях увеличиваются температура плазмы, величина относительного давления и улучшается (в результате роста плотности по сравнению с основным сценарием) коэффициент захвата нейтральных пучков.

Представленные в этой главе результаты численного моделирования показывают согласие с результатами ранее проведенных расчетов по простой стационарной модели энергоданса [1]. Впервые получена динамика основных параметров плазмы, определены требования к системе поддержания баланса вещества. При анализе результатов моделирования в качестве стартовой плотности в основном сценарии выбрана величина $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, которая соответствует возможностям создаваемого для установки дугового источника низкотемпературной стартовой плазмы [5]. На основании проведенного численного моделирования уточнены параметры проектируемых вакуумной камеры и магнитных катушек установки ГОЛ-NB.

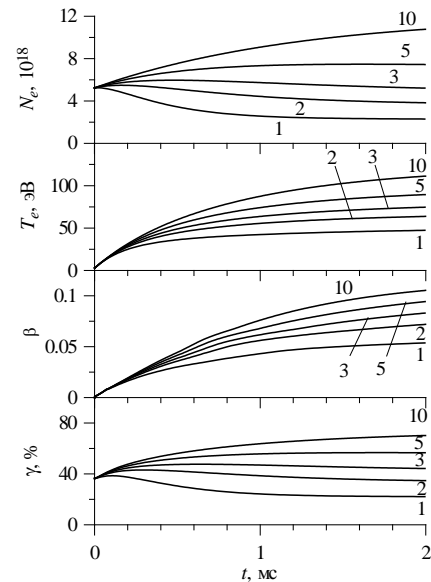


Рисунок 2.4 Динамика основных параметров при различном коэффициенте подавления потока плазмы, вытекающего в пробку (указан цифрами возле кривых, цифра 1 соответствует отсутствию эффекта от многопробочных секций). Сверху вниз: полное количество электронов, температура электронов, максимальная величина поперечного относительного давления плазмы, коэффициент захвата частиц нейтрального пучка.

3. Экспериментальная проверка метода заполнения многопробочной ловушки стартовой плазмой из дугового источника

Создание установки ГОЛ-NB [1,2] требует предварительного исследования правильности некоторых технических решений. Одной из таких задач является создание низкотемпературной стартовой плазмы, которая станет затем начальной мишенью для захвата нейтральных пучков. Ранее на установке ГОЛ-3 для создания стартовой плазмы с плотностью до 10^{22} м^{-3} использовался специальный сильноточный разряд вдоль магнитного поля на всю длину плазменной камеры, который не подходит для новой установки. В новой схеме создания стартовой плазмы предполагается использовать дуговой источник, расположенный с одного конца ловушки, с помощью которого будет создаваться мишенная плазма в центральном соленоиде ГОЛ-NB. Для реализации такого сценария эксперимента требовалось продемонстрировать успешную транспортировку плазменной струи на расстояние ~ 3 м через вакуумную камеру небольшого диаметра, в которой давление остаточных и десорбированных газов может являться серьезным мешающим фактором.

Дуговой источник плазменной пушки имеет традиционную конструкцию, состоящую из катода, анода и набора изолированных металлических шайб, которые приобретают плавающий потенциал во время работы. Эксперименты проводились на отдельной секции плазменной системы установки ГОЛ-3, которая была выделена из состава установки и подготовлена к независимой работе. Основная магнитная система длиной около 6 м состоит из 55 стандартных катушек соленоида установки ГОЛ-3, расположенных с шагом 11 см. При помощи отдельной катушки варьировалось магнитное поле в области расположения дугового источника плазмы. Основным соленоид мог быть включен в однородной или многопробочной конфигурации (пробочное отношение 1,4) с регулируемым средним магнитным полем $B_s = 0,5 - 4,6$ Тл. Поле на плазменной пушке также регулировалось так, что коэффициент магнитного сжатия плазменной струи варьировался в пределах $R = 5 - 60$.

Основными диагностиками в данных экспериментах являлись: диагностический инжектор нейтрального пучка с 10-канальным измерителем профиля прошедшего пучка (DNBI, $z = 190$ см), интерферометры (на основе CO_2 лазера: $z = 379$ см и СВЧ: $z = 610$ см) и спектрометр с пространственным разрешением ($z = 296$ см). На рисунке 3.1 представлена динамика плотности плазмы по измерениям при помощи DNBI. После включения тока дуги, в течение некоторого времени наблюдается увеличение плотности плазмы в объеме. При относительно небольших значениях пробочного отношения $R \approx 5$ (средняя часть рис. 3.1), рост плотности плазмы прекращается приблизительно к середине длительности тока дуги, затем плотность стабилизируется. При более высоких пробочных отношениях (нижняя часть рис. 3.1) рост плотности продолжается в течение более длительного времени.

Итоговая зависимость плотности плазмы от величины сжатия потока R приведена на рисунке 3.2. Согласно спектральным измерениям можно увидеть, что при пробочных отношениях $R \approx 5$ обычно наблюдались только самые легко возбуждаемые линии, а именно H_α 656,28 нм и дублет СII (657,805 и 658,288 нм, потенциал ионизации 11,3 эВ). Такой спектр соответствует электронной температуре плазмы масштаба 2 эВ. При увеличении степени сжатия плазменной струи до $R \approx 20-30$ наблюдалось постепенное появление других линий, см. рис. 3.3, имеющих более высокий потенциал возбуждения и относящихся к ионам более высокой зарядности. Такие линии появляются сначала в

центральной области, а затем область свечения увеличивается по радиусу.

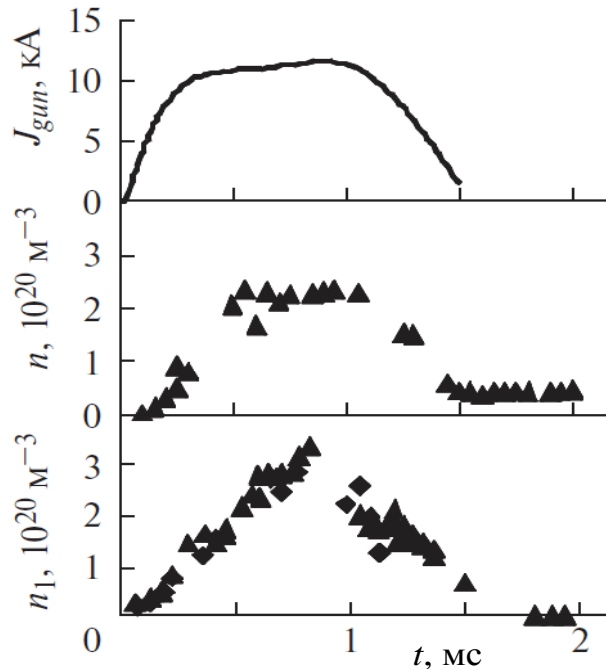


Рисунок 3.1 Динамика плотности плазмы на оси, измеренная на $z = 190$ см. Сверху вниз: ток плазменной пушки J_{gun} , плотность на оси n (поле на пушке $B_a \approx 0,1$ Тл, поле соленоида $B_s \approx 0,5$ Тл, пробочное отношение $R \approx 5$), плотность на оси с вычетом газового гало n_1 (при $B_a \approx 0,25$ Тл, $B_s \approx 4,5$ Тл, $R \approx 18$).

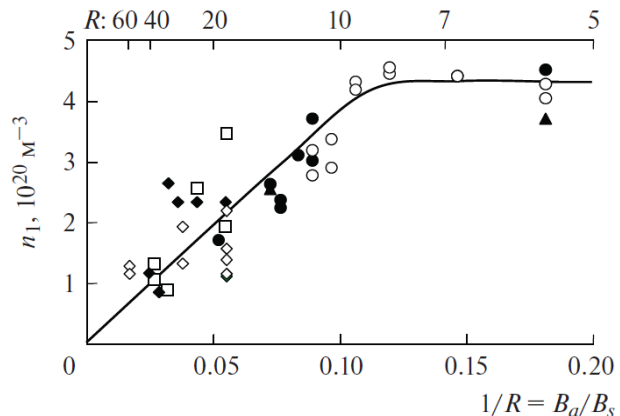


Рисунок 3.2 Зависимость максимальной плотности плазмы в $t = 0,9$ мс от пробочного отношения. Разными символами показаны измерения, относящиеся к разным экспериментальным сериям с варьированием величины и продольного профиля магнитной индукции в соленоиде. Непрерывной кривой показана линия тренда.

Для некоторых линий примесей может наблюдаться кольцеобразная структура, связанная с тем, что в приосевой области ионы данного элемента приобретают более высокую

среднюю зарядность и соответственно излучение с данной длиной волны пропадает. Спектральные измерения свидетельствуют о росте температуры плазмы с ростом R . Появление спектральной линии четырехкратно ионизированного кислорода OV (650,024 нм, потенциал ионизации 113,9 эВ) свидетельствует о возрастании температуры электронов до величины масштаба 10 эВ.

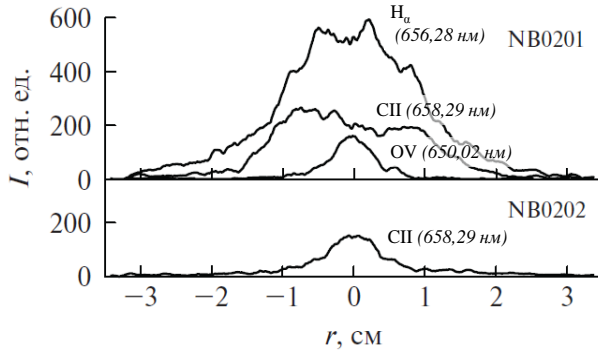


Рисунок 3.3 Зависимость яркости свечения I некоторых спектральных линий от радиуса хорды r для двух экспериментов: NB0201 (при $B_a \approx 0.1$ Тл, $B_s \approx 3$ Тл, $R \approx 31$) и NB0202 (при $B_a \approx 0.08$ Тл, $B_s \approx 3$ Тл, $R \approx 38$). Спектры измерялись в $t = 0.4$ мс.

В результате проведенных экспериментов продемонстрирована работоспособность новой схемы создания низкотемпературной стартовой плазмы [5,6]. При транспортировке плазменной струи в однородном магнитном поле с индукцией 0,5–4,5 Тл на расстояние 3 м плотность плазмы на оси составила $(1-4) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, при этом пробочное отношение по отношению к аноду дугового источника варьировалось в диапазоне от 5 до 60.

4. Развитие экспериментальных и теоретических методов исследования генерации электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе

Для детального исследования условий, необходимых для эффективной генерации субмиллиметрового электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе, была сооружена специализированная установка ГОЛ-3Т. Плазменный столб диаметром 6 см, длиной $L \approx 2,4$ м и плотностью $n_e = 2 \times 10^{14} - 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ создается с помощью продольного сильноточного разряда в открытой магнитной ловушке с гофрированным магнитным полем с индукцией в пробках $B = 4,7$ Тл. Релятивистский электронный пучок с током $I \approx 10$ кА при энергии электронов $E_e \approx 0,8$

МэВ генерируется ускорителем У-2. Использование соответствующей магнитной системы преобразования сечения пучка и его последующего сжатия обеспечивает в плазменном столбе плотность тока пучка $1 - 2 \text{ кА/см}^2$. Общая схема эксперимента ГОЛ-ПЭТ на установке ГОЛ-3Т представлена на рисунке 4.1.

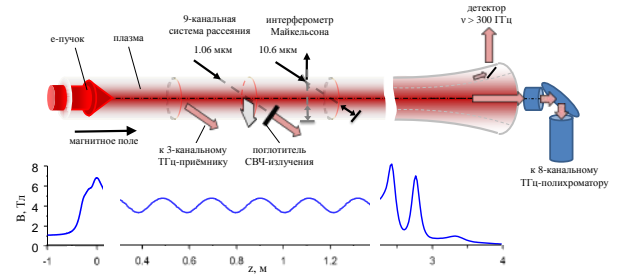


Рисунок 4.1 Общая схема эксперимента по генерации субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3Т и распределение аксиального ведущего магнитного поля вдоль оси установки (нижний график).

Измерение плотности плазмы в экспериментах осуществляется при помощи комплекса лазерных диагностик. Радиальный профиль плотности плазмы измеряется на расстоянии $z = 0,83$ м от входной пробки, с помощью диагностики, основанной на томсоновском рассеянии. Динамика средней плотности плазмы измеряется с помощью интерферометра Майкельсона ($z = 1,16$ м). Ток электронного пучка в различных местах установки измеряется при помощи импульсных трансформаторов тока, в то время как энергия инжектируемого пучка в плазму определяется исходя из величины напряжения в диоде ускорителя У-2. Передача энергии от электронов пучка к плазме вычисляется исходя из измерений диамагнитных зондов, расположенных вдоль плазменного столба. Излучение в интервале частот от 90 до 600 ГГц, выходящее из плазменного столба вдоль его оси, анализируется при помощи 8-канального полихроматора. Кроме того, ряд одиночных детекторов, оснащенных полосовыми пропускающими фильтрами на разные частоты из указанного интервала, позволяют осуществлять одновременную регистрацию электромагнитного излучения из различных сечений плазменного столба по длине установки.

В серии экспериментов, проведенных в 2016 году (предварительные результаты которых докладывались в [7,8]), основное внимание было сосредоточено на выявлении закономерностей, которые характеризуют влияние градиентов плотности плазмы по сечению плазмен-

ного столба, где проходит релятивистский пучок, на интенсивность эмиссии в области верхнегибридной частоты и её удвоенного значения. Примеры двух вариантов распределения плотности плазмы по диаметру плазменного столба, зарегистрированных с помощью восьмиканальной системы томсоновского рассеяния, приведены на рисунке 4.2.

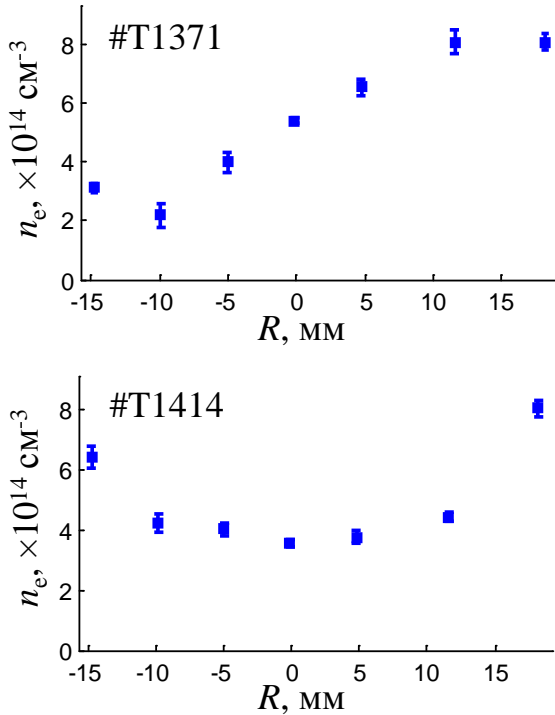


Рисунок 4.2 Два варианта распределения плотности плазмы по диаметру плазменного столба в момент времени $t = 0,8$ мкс от начала инъекции РЭП для выстрела T1371 (верхний график) и выстрела T1414 (нижний график).

Видно, что в выстреле № T1371 плотность плазмы монотонно растет от 2×10^{14} до $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ при изменении координаты R от -10 мм до 10 мм по диаметру в пределах сечения электронного пучка. В то же время в выстреле № T1414 она остается практически неизменной величины (около $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) при изменении R в тех же пределах: от -10 мм до 10 мм.

Пример сигналов с детекторов, зарегистрированных в четырех каналах восьмиканального полихроматора, установленного, как показано на рисунке 4.1, на выходе электронного пучка из плазменного столба, представлен на рисунке 4.3. Видно, что эмиссия излучения продолжается около 4 мкс, что соответствует времени интенсивного увеличения энергосодержания в плазме при инъекции пучка в плазменный столб. Это увеличение энергосодержания следует из нарастания сигналов с диатомных датчиков, охватывающих плазменный столб.

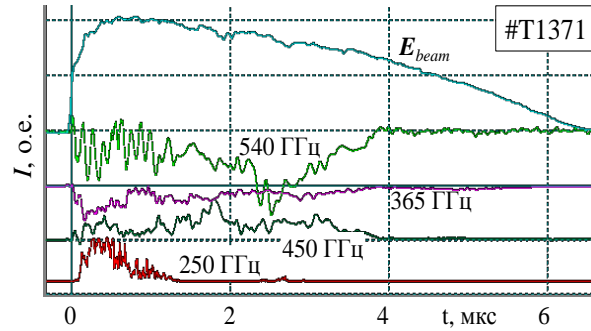


Рисунок 4.3 Осциллограммы, демонстрирующие в выстреле T1371 изменение во времени спектральной плотности излучения в диапазоне частот от 200 до 600 ГГц, что соответствует областям верхнегибридной плазменной частоты и её удвоенного значения.

Как было ранее установлено, основная мощность излучения находится в двух спектральных областях, соответствующих верхнегибридной плазменной частоте и её удвоенному значению. Для описываемых экспериментов с плотностью плазмы около $(4 - 8) \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ эти области частот лежат, соответственно, в окрестности интервалов 200 – 270 ГГц и 400 – 540 ГГц. Результат анализа сигналов с детекторов, регистрирующих излучение в этих интервалах частот, по серии экспериментов с варьируемым распределением плотности по сечению плазменного столба представлен на рисунке 4.4. Здесь представлена величина спектральной плотности мощности в пучке излучения, поступившем в полихроматор, для двух указанных на рисунке значений частоты как функция среднего по сечению пучка относительного градиента плотности плазмы $(dn_p/dR)/n_p$. При построении этой зависимости были использованы результаты измерений в выстрелах пучком, когда плотность плазмы на рассматриваемом диаметре плазменного столба не выходила за пределы значений $(4 - 8) \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Из представленного на рисунке результата видно, что спектральная плотность мощности на удвоенной частоте (канал 450 ГГц) на порядок величины меньше, чем на верхнегибридной частоте (канал 250 ГГц). С повышением градиента плотности плазмы по диаметру плазменного столба происходит рост интенсивности излучения, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы как на частоте верхнегибридных плазменных колебаний, так и удвоенном значении этой величины. Этот рост в большей степени проявляется на удвоенной частоте, эмиссия которой обусловлена слиянием двух

плазменных колебаний в одну электромагнитную волну.

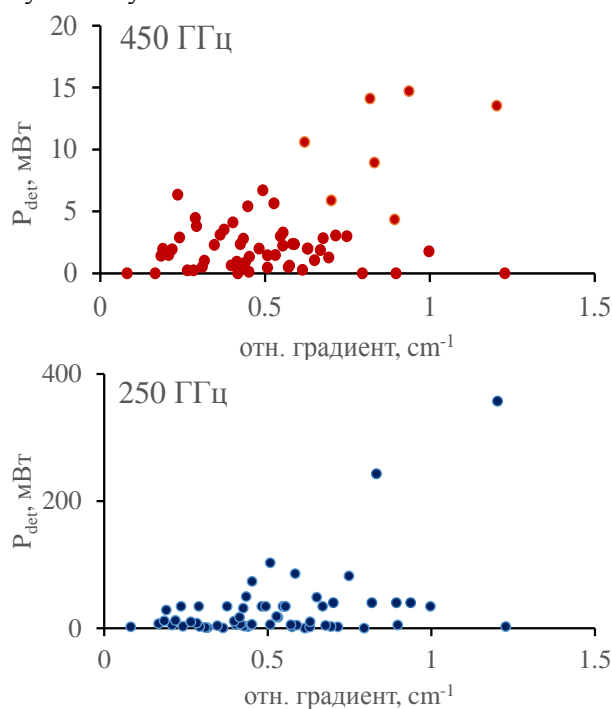


Рисунок 4.4. Зависимость интенсивности излучения (в относительных единицах) для верхнегибриной частоты и удвоенного его значения от относительного градиента плотности плазмы по диаметру плазменного столба.

На данном этапе работы, проводимые теоретические исследования сосредоточены на задаче об эмиссии излучения перпендикулярно оси пучково-плазменной системы в условиях, когда ее поперечный размер соизмерим с длиной волны излучения (см. [9-13]). По этой причине результаты этих исследований не могут быть использованы для прямого сопоставления с результатами описанных выше экспериментов.

5. Исследование схемы двухстадийной генерации электромагнитного излучения на установке ЭЛМИ в области частот > 0.5 ТГц

Концепция лазеров и мазеров на свободных электронах (ЛСЭ, МСЭ), в которых в качестве накачки используется интенсивная электромагнитная волна, развивается в течение длительного времени (см. напр., [14,15]). Преимуществом такой накачки, по сравнению с традиционной на основе ондуляторных полей, является более короткий пространственный период. Это позволяет даже при умеренных значениях γ -фактора электронов в пучках получать рассеянное излучение в ТГц-диапазоне. Действи-

тельно, в соответствии с преобразованием Доплера в случае поперечного рассеяния длина волны рассеянного излучения составляет $\lambda_s \approx \lambda_i / 2\gamma^2$, а при встречном рассеянии – $\lambda_s \approx \lambda_i / 4\gamma^2$. Таким образом, при энергии электронов пучка 0,8 – 1,1 МэВ ($\gamma \sim 2,6 - 3,2$) и длине волны накачки $\lambda_i = 4$ мм частота рассеянного излучения будет лежать в диапазоне 1 – 1,5 ТГц в схеме с поперечным рассеянием, а при использовании встречного рассеяния 2 – 3 ТГц. Следует отметить, что для реализации МСЭ с электромагнитной накачкой перспективно использование схем с внутриврезонаторным рассеянием, когда генерируемая относительно низкочастотная волна используется в качестве волны накачки в процессе встречного комптоновского рассеяния на этом же или на параллельном электронном пучке. Экспериментальные исследования подобных двухстадийных схем приведены в [16-19].

В настоящее время в ИЯФ СО РАН на базе ускорителя «ЭЛМИ» развивается проект мощного двухстадийного генератора ТГц-диапазона, состоящего из низкочастотной (НЧ) и высокочастотной (ВЧ) секций, запитываемых двумя параллельными ленточными пучками [20,21]. В первой из них реализован мазер на свободных электронах с традиционной накачкой квазистационарным магнитным полем, генерирующий импульсы 4-мм излучения с мощностью 30 – 50 МВт и длительностью до 200 нс. Генерируемое в НЧ-секции мм-излучение направляется с помощью волнового дефлектора в ВЧ-секцию генератора, где рассеивается на втором ленточном пучке с преобразованием частоты в ТГц-диапазон.

За прошедший год в рамках выполнения госзадания нами проведены следующие работы.

5.1. НЧ-секция

1. Осуществлена оптимизация на основе компьютерных расчетов геометрии элементов электродинамической системы НЧ-секции, а именно одномерного и двумерного брэгговских отражателей, проведены модернизация и «холодное» тестирование всей электродинамической системы в целом.

2. Разработана и реализована новая технология для прецизионного изготовления элементов электродинамической системы.

3. Выполнены моделирование, разработка и тестирование волнового дефлектора, предназначенного для перевода мм-излучения из НЧ-секции в ВЧ-секцию ТГц-генератора.

4. Проведено сопоставление результатов компьютерного моделирования и «холодных» измерений частотных свойств элементов электродинамической системы. На рис. 5.1 в качестве примера приведены результаты для одномерного, двумерного рефлекторов и дефлектора, которые показывают их хорошее согласие в рабочей полосе частот лазера 74 – 75 ГГц. Кроме того, в «холодном» тестировании измерены частоты собственных мод резонатора, которые с высокой точностью совпадают с расчетными значениями.

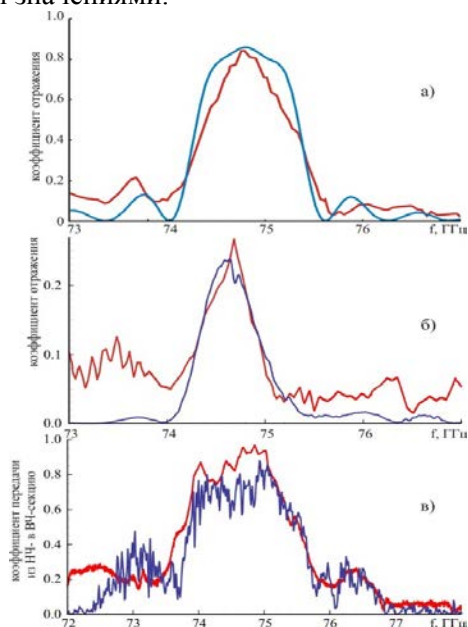


Рисунок 5.1 Коэффициенты отражения оптимизированных а) одномерного, б) двумерного брэгговских отражателей; в) эффективность передачи дефлектором волны из НЧ- в ВЧ-секции двухстадийного генератора. Красные линии - измерения, синие – расчет.

5.2 ВЧ-секция

Для преобразования бегущей волны в квазистоячую разработан и изготовлен волновой трансформатор на основе одномерных брэгговских структур, имеющих сбой фазы в нарезке. Эффективность накопления энергии волны в нем продемонстрирована расчетами (см. рис. 5.2).

5.3 Диагностика

1. Проведена модернизация диагностик для измерения параметров мм-излучения в НЧ-секции генератора.

2. В рамках создания диагностики для измерения параметров ТГц-излучения подготовлен к измерениям криогенный болометр субмм-излучения в диапазоне 0,1 – 3 ТГц с временным разрешением 1 нс, а также набор полосовых фильтров на основе частотно-селективных

тонкопленочных структур для интервала 0,5 – 1,0 ТГц с шириной полосы пропускания около 10% при подавлении излучения на краях полосы не хуже 30 Дб [22].

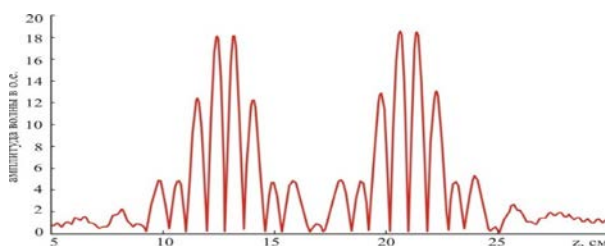


Рисунок 5.2 Распределение амплитуды поля по направлению движения пучка в волновом трансформаторе.

6. Экспериментальное изучение подходов к повышению параметров электронного пучка с плазменным эмиттером применительно к задачам мощного импульсного теплового воздействия на материалы первой стенки термоядерных установок

Эксперименты по генерации длинноимпульсных мощных электронных пучков в многоапертурном источнике с плазменным эмиттером были продолжены в 2016 г. в приложении к задаче имитации мощного импульсного теплового воздействия на конструкционные материалы первой стенки термоядерного реактора. Эксперименты проводились на специально оборудованном для выполнения материаловедческих исследований стенде, схематично изображенном на рис. 6.1.

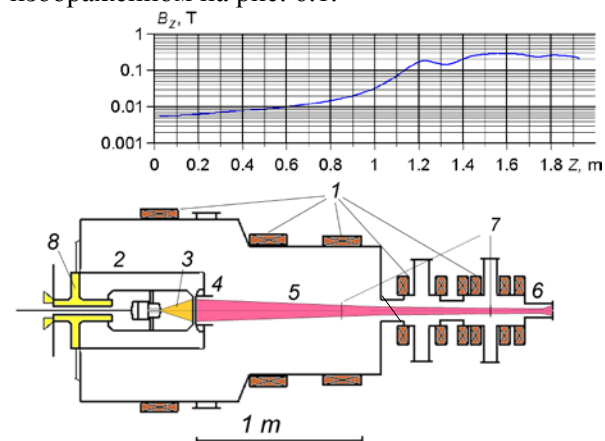


Рисунок 6.1 Сверху: распределение магнитного поля по длине ($z = 0$ – катод). Внизу 1 м метрия эксперимента: 1–катушки магнитного поля, 2–дуговой генератор внутри высоковольтного электрода, 3–эмиссионная дуговая плазма, 4–анод диода, 5–электронный пучок, 6–приемник пучка (цилиндр Фарадея), 7–расположение мишеней, 8–проходной высоковольтный изолятор.

Электронный пучок из источника транспортировался на мишень в продольном магнитном поле, плавно нарастающем вдоль оси установки. Таким образом, пучок подвергался адиабатическому магнитному сжатию с целью достижения плотности мощности ~ 10 ГВт/м² на испытываемой металлической мишени при субмиллисекундной длительности импульса. Задачей этапа 2016 года являлось повышение мощности и длительности облучения мишени пучком и выявление факторов, ограничивающих длительность импульса пучка, воздействующего на мишень.

Увеличение мощности импульса было достигнуто за счет увеличения энергии электронов пучка. Для этого был модернизирован многоапертурный ускорительный диод источника и усовершенствована схема высоковольтного модулятора. В цепь высоковольтного питания была добавлена защитная индуктивность $L = 7$ мГн с обратным высоковольтным лавинным диодом (*LD*-снаббер), что исключило быстрый рост тока при случайных «провалах» импеданса плазмэмиссионного диода, тем самым существенно снизив вероятность пробоя. В результате была увеличена до ~ 100 кВ/см напряженность электрического поля в ускоряющем зазоре, и было увеличено до уровня свыше 100 кВ ускоряющее напряжение.

Для обеспечения стабильной работы плазменного катода при высокой напряженности электрического поля, была изготовлена новая версия многоапертурной электронно-оптической системы ускорительного диода. Диаметр отверстий в катодном электроде был уменьшен до 2 мм, что уменьшило влияние возросшего ускоряющего электрического поля на дуговой разряд, повысив стабильность последнего. Величина ускоряющего зазора была увеличена до 12 мм.

Для выяснения факторов, ограничивающих длительность импульса пучка, была проведена серия из 347 экспериментов по транспортировке пучка в ведущем магнитном поле с разной степенью компрессии. В них была частично подтверждена гипотеза о влиянии отраженных электронов на электрические пробои в диоде. Дополнительными экспериментами было показано, что длительность пучка уменьшается при увеличении пробочного отношения, тока и мощности пучка (рис. 6.2).

С увеличением пробочного отношения уменьшается также доля проходящих на коллектор электронов пучка I_{cf}/I_e (рис. 6.3). Сопоставляя зависимости, наблюдаемые на рисунке 6.3, можно сделать вывод о том, что отражен-

ные магнитным полем электроны, составляющие долю тока пучка $(1 - I_{cf}/I_e)$, возвращаясь на анод, бомбардируют его и нарабатывают на его поверхности плазму, которая приводит к пробоем диода и окончанию импульса пучка. Часть отраженных электронов проникает в диод сквозь анодные апертуры, что также нарушает оптику диода и ведет к преждевременному пробоем зазора.

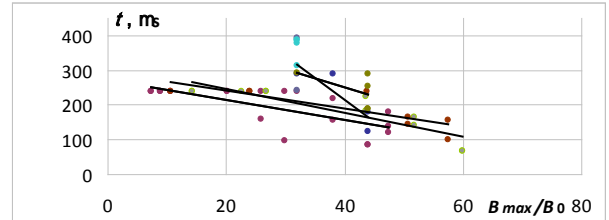


Рисунок 6.2 Зависимость длительности пучка от пробочного отношения. Приведены различные серии экспериментов, отличающиеся цветом, и их аппроксимации линейной зависимостью. Разброс точек связан со случайным характером времен пробоя диода, с разбросом токов и напряжений в диоде от серии к серии и внутри серий.

Из данных результатов должно также следовать, что пробой в диоде наступает, когда энергия, выделенная на аноде отраженной частью пучка, превышает некоторое критическое значение, определяемое расплавом, и испарением материала анода, и ионизацией его паров до критической плотности плазмы, достаточной для нарушения работы диода. Однако этот вывод не подтверждается при обработке осциллограмм для выявления зависимости длительности импульса от возвращаемой на анод энергии отраженных электронов пучка. Возможно, в этом процессе надо учесть и плазму, приходящую с мишени. Также возможно, что нужно эту динамику исследовать численно и учитывать не возвращенную на анод энергию пучка, а ее плотность на поверхности анода и коллектора (или мишени, когда она установлена). Численное моделирование транспортировки пучка проводилось кодом POISSON-2 для реальных параметров одного из рабочих импульсов с пробоем диода, при величине пробочного отношения ведущего магнитного поля $R = 60$. Осциллограммы для него приведены на рис. 6.4.

После переходных процессов в начале импульса до коллектора доходит 65% тока катода, еще $\sim 10\%$ теряется в диоде, остальное ($\sim 25\%$ от тока катода) отражается магнитным полем. Было проведено несколько модельных расчетов с разными токами пучка а) с учетом

всех компонент собственных и внешних электрических и магнитных полей, а также б) расчетов в предположении полной компенсации объемного заряда пучка. Найдены предельные токи, при которых начинается отражение электронов пучка магнитной пробкой. Они составили ~ 25 А и ~ 190 А для случаев а) и б), соответственно. Это означает, что в эксперименте происходит частичная ($\sim 40\%$) компенсация пространственного заряда пучка плазмой транспортного канала.

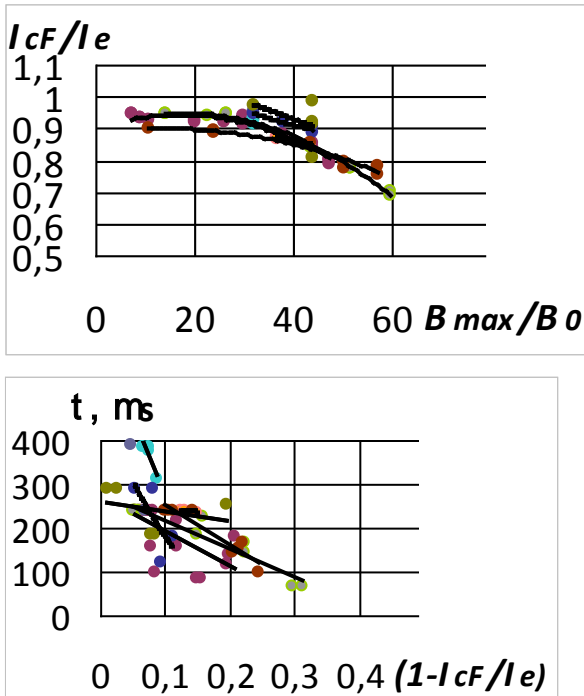


Рисунок 6.3 Вверху: зависимость токопрохождения пучка (I_{cF}/I_e – отношение тока коллектора к току эмиссии катода) от пробочного отношения. Внизу: зависимость длительности импульса от отраженной магнитной пробкой доли пучка.

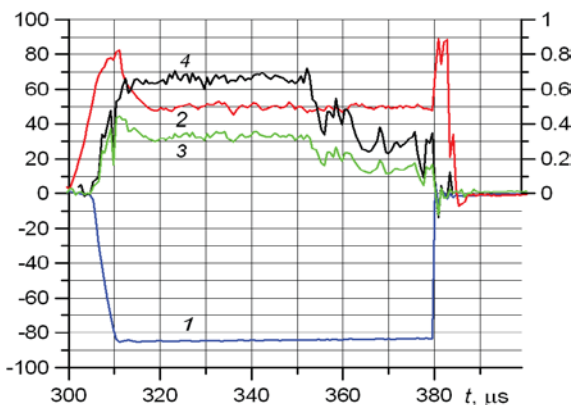


Рисунок 6.4 Осциллограммы импульса пучка. 1 – потенциал катода [кВ]; 2 – ток катода I_e [А]; 3 – ток коллектора I_{cF} [А]; 4 – отношение I_{cF}/I_e .

Экспериментально установлены предельные параметры электронного пучка, формируемого в источнике с плазменным катодом и мультиапертурной диодной системой. В устойчивых режимах генерации пучка и его транспортировки до коллектора при магнитном поле на диоде $\sim 0,006$ Тл и коэффициенте сжатия $R = 30\text{--}40$ получено максимальное напряжение на диоде ~ 105 кВ при токе пучка 55 А, эмиссионный ток до 64 А при напряжении 79 кВ и энергосодержание в пучке 1,8 кДж при длительности импульса 400 мкс.

Исследовалась зависимость длительности импульса пучка от давления газа (аргона) в транспортном канале. Задавая давление в системе напуска газа и момент открытия импульсного клапана, можно было управлять распределением давления в дуговом источнике плазмы и в диоде. Типичное начальное давление остаточного газа в камере источника перед импульсами пучка составляло $(6\text{--}8)\times 10^{-4}$ Па. Эксперименты показали, что при увеличении давления аргона в диоде и в области транспортировки длительность импульса начинала заметно сокращаться при давлении $\sim 5\times 10^{-3}$ Па.

По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что существующая схема генерации электронного пучка по своим параметрам близка к оптимальному состоянию. Дальнейшая оптимизация может лишь несущественно улучшить параметры. Схема ускорителя диодного типа с мультиапертурными анодом и катодом предполагает их близкое расположение – при напряжении на диоде около 100 кВ диодный зазор должен быть ~ 10 мм. Такое расположение требует оптимальной геометрии и относительно небольшого диапазона вариаций допустимых параметров катодной и анодной плазмы для генерации пучков с малым фазовым объемом. Основным недостатком используемой схемы генерации электронного пучка, ограничивающим длительность пучка, является неуправляемость параметрами анодной плазмы (в отличие от регулируемой катодной) при том, что источников анодной плазмы несколько (остаточный газ, мишень, поверхности анода) и малый зазор между металлическими поверхностями электродов.

7. Развитие новых оптических методик диагностики поверхности и приповерхностной области при мощном импульсном тепловом воздействии на металлическую мишень

Важной особенностью, созданной в ИЯФ СО РАН установки для испытания воздей-

ствия на материалы мощных импульсных тепловых нагрузок, возможных в будущих термоядерных реакторах, является использование электронного пучка в качестве источника нагрева. Низкий уровень сопутствующего светового излучения в этом случае делает возможным применение обширного спектра оптических *in-situ* диагностик, при помощи которых можно получать данные об эрозии поверхности вольфрама и об образующихся микрочастицах непосредственно во время импульса.

Для этих целей был разработан и использован впервые в подобных экспериментах набор диагностик, включающий, в частности, быструю съёмку в инфракрасной (ИК) области спектра и в свете лазерной подсветки вольфрамового образца в процессе его нагрева, и методику рассеяния излучения непрерывного лазера на микрочастицах, вылетающих с нагретой поверхности.

Как показали эксперименты, поверхность облучаемого образца нагревается неравномерно даже при плавном распределении по поверхности падающей на неё мощности нагрева. Это связано с тем, что, начиная с первых импульсов нагрева, на поверхности образца появляется сеть трещин, и края трещин имеют большую температуру, чем окружающая их поверхность.

Сравнение изображений мишени при лазерной подсветке во время нагрева и после него показывает, что в этих горячих точках состояние поверхности меняется во время нагрева, что, вероятнее всего, связано с началом плавления вольфрама в этих областях. На верхней части рис. 7.1 на ИК-изображение горячей мишени, на котором отчётливо видна более яркая сеть трещин, наложено изображение пятна лазерного излучения, границы которого маркированы окружностью, показанной зелёной пунктирной линией. Яркие пятна внутри окружности возникают только во время нагрева и расположены в местах трещин и их пересечений. На нижней части рис. 7.1 приведено изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), участка поверхности, помеченного красным прямоугольником на нижней части рис. 7.1. Хорошо видно, что места повышенной интенсивности светоотражения соответствуют, в основном, пересечениям трещин, т.е. областям с наиболее высокой температурой поверхности.

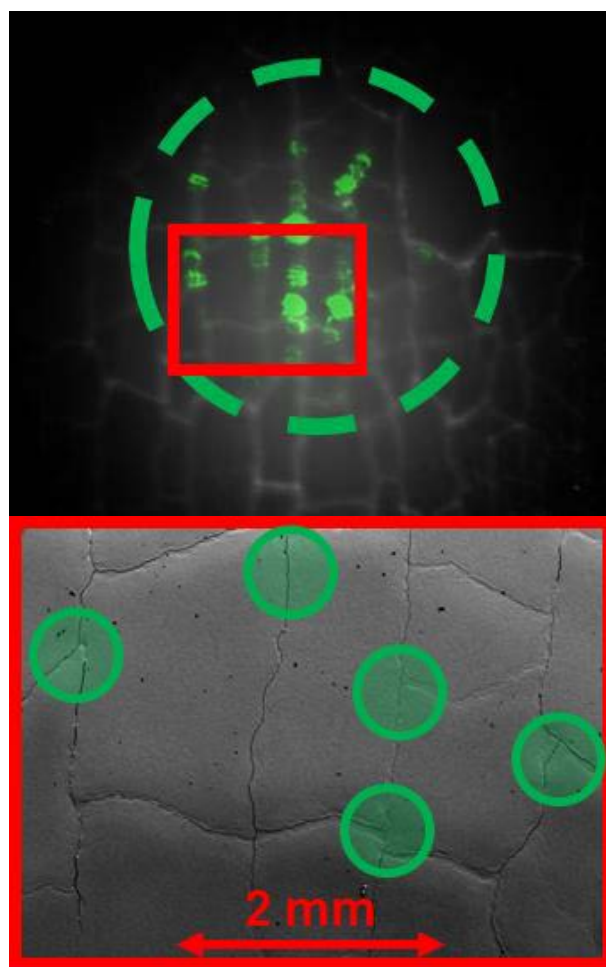


Рисунок 7.1 Вверху: чёрно-белый снимок поверхности вольфрамового образца во время его нагрева, на который наложена показанная зелёным картинка отражения излучения (532 нм) от мишени. Границы лазерного пятна на мишени отмечены окружностью, показанной пунктирной линией. Внизу: полученная с помощью СЭМ фотография участка мишени, отмеченного красным прямоугольником на верхней части рисунка. Участки с повышенной интенсивностью отражения лазерного излучения, помечены зелёными кружками, они соответствуют пересечениям трещин.

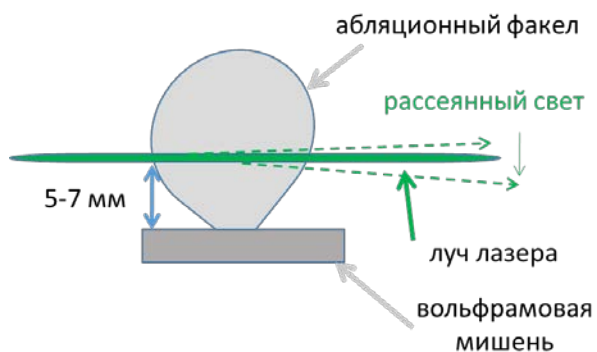


Рисунок 7.2 Схема эксперимента по рассеянию излучения непрерывного лазера на микрочастицах, вылетающие с поверхности мишени.

Для анализа потока микрочастиц с поверхности стенки, наиболее опасного для работы термоядерного реактора продукта эрозии его металлической стенки, была разработана и применена методика многоканальной регистрации распределения по углам интенсивности рассеяния излучения (532 нм) непрерывного лазера. Излучение лазера пропусклось вдоль поверхности образца из вольфрама, как показано на рис. 7.2.

Интенсивность света, рассеянного на непрозрачной микрочастице с характерным размером d , значительно превосходящим длину волны излучения, рассеивается на характерный угол $\sin(\theta)=1.22(d/\lambda)$. Поэтому измеряя интенсивность рассеяния под разными углами, можно оценить динамику изменения характерного размера частиц и интенсивность потока частиц в месте расположения лазерного луча. Пример осциллограммы сигналов рассеяния лазерного излучения для трех углов рассеяния приведён на рис. 7.3. Характерные размеры частиц, соответствующие используемым углам рассеяния показаны на врезке. Верхняя осциллограмма показывает ход во времени плотности мощности, поглощённой поверхностью образца.

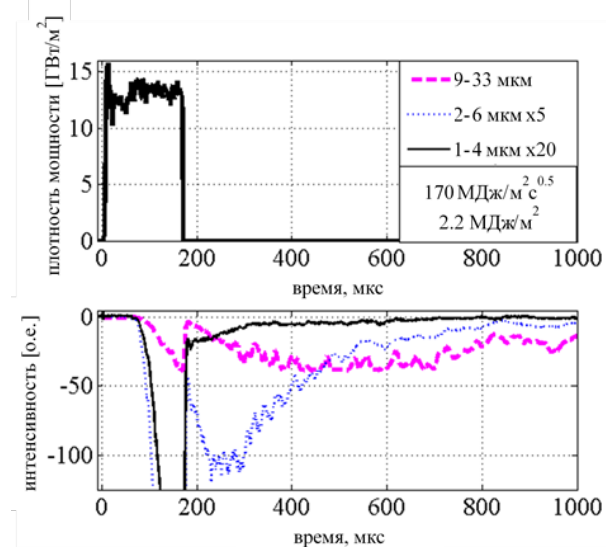


Рисунок 7.3 Осциллограмма сигнала лазерного рассеяния. Более крупные частицы достигают области занятой лазерным пучком позже более мелких, что говорит о их меньшей скорости движения.

Заключение

В соответствии с общим планом работ по данной тематике, в 2016 году исследования проводились по шести отдельным научным направлениям. Первые два направления связаны с продолжающимися работами по развитию материальной базы научных исследований

– созданию новой многопробочной ловушки ГОЛ-NB в составе комплекса установок ГОЛ-3. На новой установке предполагается проведение экспериментов по исследованию плазмы при инжекции атомарных пучков с мощностью порядка 1 МВт в центральную газодинамическую ловушку с многопробочными секциями магнитной системы. За отчетный период были проведены расчет и проектирование камеры инжекции мощных нейтральных пучков в многопробочную ловушку, проведена экспериментальная проверка метода заполнения многопробочной ловушки стартовой плазмой из дугового источника. Два других направления работ направлены на развитие методов генерации мощного импульсного электромагнитного излучения миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн. В 2016 году проводились экспериментальные и теоретические исследования методов исследования генерации электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе, а также исследовалась схема двухстадийной генерации электромагнитного излучения на установке ЭЛМИ в области частот выше 0.5 ТГц. Продолжено экспериментальное изучение подходов к повышению параметров электронного пучка с плазменным эмиттером применительно к задачам мощного импульсного теплового воздействия на материалы первой стенки термоядерных установок. Физика процессов, протекающих вблизи поверхности и в приповерхностной области при мощном импульсном тепловом воздействии на металлическую мишень, изучалась при помощи новых оптических методик диагностики.

По всем перечисленным отдельным научным задачам выполнены запланированные на данный этап мероприятия; проведено большое количество экспериментов на отдельных электрофизических установках комплекса ГОЛ-3. Полученные результаты в целом подтверждают правильность научных предположений и технических решений, которые были заложены на этапе планирования данной научно-исследовательской работы.

Список использованных источников

- [1] Postupaev, V.V., Burdakov, A.V., Ivanov, A.A. Outlook for new experimental program on multiple-mirror confinement in GOL-3 with NBI-heated plasma // Fusion Science and Technology. – 2015. – V. 68. – № 1. – P. 92–98.
- [2] Postupaev, V.V., Batkin, V.I., Beklemishev, A.D., Burdakov, A.V., Burmasov, V.S., Chernoshtanov, I.S., Gorbovsky, A.I.,

- Ivanov, I.A., Kuklin, K.N., Mekler, K.I., Rovenskikh, A.F., Sidorov, E.N., Yurov, D.V. Status of GOL-NB project // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1771. – P. 020001.
- [3] Юров, Д. В., Приходько, В. В., Цидулко, Ю. А. Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – № 3. – С. 217–233.
- [4] Postupaev, V.V., Yurov, D.V. Modeling of reference operating scenario of GOL-NB multiple-mirror trap // Plasma Physics Reports. – 2016. – V. 42. – № 11. – P. 1013–1023.
- [5] Postupaev, V.V., Batkin, V.I., Burdakov, A.V., Ivanov, I.A., Kuklin, K.N., Mekler, K.I., Rovenskikh, A.F. Experiments on the Transportation of a Magnetized Plasma Stream in the GOL-3 Facility // Plasma Physics Reports. – 2016. – V. 42. – № 4. – P. 319–326.
- [6] Ivanov, I.A., Batkin, V.I., Burdakov, A.V., Burmasov, V.S., Kuklin, K.N., Mekler, K.I., Polosatkin, S.V., Postupaev, V.V., Rovenskikh, A.F. Transportation of plasma jet in GOL-NB multiple-mirror trap // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1771. – P. 030004.
- [7] Arzhannikov, A.V., Annenkov, V.V., Burdakov, A.V., Burmasov, V.S., Ivanov, I.A., Kasatov, A.A., Kuznetsov, S.A., Makarov, M.A., Mekler, K.I., Polosatkin, S.V., Postupaev, V.V., Rovenskikh, A.F., Sinitsky, S.L., Sklyarov, V.F., Stepanov, V.D., Timofeev, I.V., Thumm M.K.A. Beam-plasma system as a source of powerful submillimeter and terahertz radiation (experimental and theoretical studies) // Oral presentation paper at 11th Internat. Conf. on Open Magnetic System for Plasma Confinement. – 8–12 August 2016. – Novosibirsk.
- [8] Аржанников, А.В., Бурдаков, А.В., Бурмасов, В.С., Иванов, И.А., Касатов, А.А., Кузнецов, С.А., Макаров, М.А., Меклер, К.И., Полосаткин, С.В., Поступаев, В.В., Ровенских, А.Ф., Синицкий, С.Л., Скляров, В.Ф., Степанов, В.Д., Тимофеев И.В. Особенности пространственного и углового распределения эмиссии ТГц-излучения из плазменного столба при интенсивном пучково-плазменном взаимодействии // Устный доклад на IV Всероссийской Микроволновой Конференции. – Москва. – 23-25 ноября 2016 г.
- [9] Timofeev, I.V., Annenkov, V.V., Volchok, E.P. Mechanisms of enhanced electromagnetic emission in laboratory beam-plasma systems // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1771. – P. 070002.
- [10] Volchok, E.P., Timofeev, I.V., Annenkov, V.V. Theory of electromagnetic wave generation via a beam-plasma antenna // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1771. – P. 070008.
- [11] Annenkov, V.V., Timofeev, I.V., Volchok, E.P. Particle-in-cell simulations of 100 keV electron beam interaction with a thin magnetized plasma // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1771. – P. 070011.
- [12] Annenkov, V.V., Timofeev, I.V., Volchok, E.P. Simulations of electromagnetic emissions produced in a thin plasma by a continuously injected electron beam // Physics of Plasmas. – 2016. – V. 23. – № 5. – P. 053101.
- [13] Annenkov, V.V., Volchok, E.P., Timofeev I.V. Generation of high-power electromagnetic radiation by a beam-driven plasma antenna // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2016. – V. 58. – № 4. – P. 045009.
- [14] Pantell, R.H., Soncini, G., Puthoff H.E. Stimulated photon-electron scattering // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1968. – V. 4. – № 11. – P. 905-907.
- [15] Kehs, R., Carmel, J., Granatstein, V.L., Desler, W.W. Free-electron laser pumped by powerful traveling electromagnetic wave // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1990. – V. 18. – № 3. – P. 437-446.
- [16] Жуков, П.Г., Иванов, В.С., Рабинович, М.С., Райзер, М.Д., Рухадзе, А.А. Вынужденное комптоновское рассеяние волн на релятивистском электронном пучке // ЖЭТФ. – 1979. – Т. 76. – № 6. – С. 2065-2074.
- [17] Carmel, J., Granatstein, V.L., Gover, A. Demonstration of a two stage backward wave-oscillator free-electron laser // Physical Review Letters. – 1983. – V. 51. – № 7. – P. 566-569.
- [18] Bratman, V.L., Denisov, G.G., Ginzburg, N.S., Smorgonsky, A.V., Korovin, S.D., Polevin, S.D., Rostov, V.V., Yalandin, M.I. Stimulated scattering of waves in microwave generators with high-current relativistic electron beams: simulation of two-stage free-electron lasers // International Journal of Electronics Theoretical and Experimental. – 1985. – V. 59. – № 3. – P. 247-289.
- [19] Peskov, N.Yu., Kaminsky, A.K., Kalynov, Yu.K., Kuzikov, S.V., Kornishin, S.Yu.,

- Perelshtein, E.A., Savilov, A.V., Sedykh, S.N. Sub-millimeter Bragg FEM based on moderately relativistic electron beam: project and first experiments // 2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics. – 2007. – Cardiff, UK. – V. 2. – P. 837-838.
- [20] Аржанников, А.В., Бобылев, В.Б., Гинзбург, Н.С., Иваненко, В.Г., Калинин, П.В., Кузнецов, С.А., Песков, Н.Ю., Сергеев, А.С., Сеницкий, С.Л., Степанов, В.Д. Одноканальные и многоканальные планарные мазеры на свободных электронах // Известия ВУЗов: Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – №. 10. – С. 907-913.
- [21] Arzhannikov, A.V., Ginzburg, N.S., Kalinin, P.V., Kuznetsov, S.A., Peskov, N.Yu., Rozental, R.M., Sinitsky, S.L., Stepanov, V.D., Thumm, M., Zaslavsky, V.Yu., Zotova, I.V. Intercavity scattering scheme for two-stage generation of submillimeter radiation on the base of planar 2D Bragg FEM // Proc. VI International workshop «Strong Microwaves in Plasmas». N. Novgorod, Russia. – 2006. – V. 1. – P. 228-232.
- [22] Кузнецов, С.А., Аржанников, А.В., Гельфанд, А.В., Зоренко, А.В., Горшунов, Б.П. Многоканальная радиометрическая система для регистрации субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5. – №. 3. – С. 5-19.

№ 14.1.4 Создание первой очереди плазменной ловушки нового поколения ГДМЛ

Введение

В отчете представлены результаты работ по разработке проекта термоядерного реактора на основе линейной магнитной системы. Концепция линейной термоядерной ловушки нового поколения - ГДМЛ – была предложена в 2011 году. Это концепция базировалась на полученных ранее на установках ГДЛ и ГОЛ-3 результатах, продемонстрировавших возможность значительного улучшения продольного удержания плазмы за счет концевых многопробочных секций, эффективное подавление электронной теплопроводности при инжекции в плазму электронных пучков и использовании торцевых расширителей, а также стабилизацию плазмы с большим газокINETическим давлением с помощью введения радиальных потенциалов. Основными направлениями работ по проекту, необходимых для создания установки ГДМЛ, являлось развитие техники инжекции в плазму мощных электронных пучков, разработка и проверка способов стабилизации плазмы в осесимметричной системе, а также исследование поведения материалов под действием потоков плазмы и мощных тепловых нагрузок, ожидаемых в термоядерном реакторе. При этом в ходе выполнения проекта были предложены кардинально новые решения, позволяющие существенно повысить эффективность открытой линейной ловушки как термоядерного реактора. К таким решениям относятся схема “диамагнитной” ловушки, дающая возможность значительного увеличения эффективного пробочного отношения и, как следствие, времени удержания плазмы, а также винтовые многопробочные секции, реализующие эффективное продольное удержание и пинчевание плазмы. Аналитические оценки достижимых параметров плазмы в системе ГДМЛ показывают существенное преимущество новой версии. Расчётная термоядерная эффективность всей системы может вырасти на порядок, до $Q_{DT} > 1$, и более, в зависимости от успешности винтового многопробочного удержания при низкой плотности плазмы и стабильности режима диамагнитного пузыря.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В процессе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования с использованием инфраструктуры уникальной научной установки “Комплекс длинных открытых ловушек (Комплекс ДОЛ)”. Работы проводились по трем направлениям.

Первым направлением была разработка физического проекта плазмоприемников для установки ГДМЛ. Критическим вопросом создания плазмоприемников является их ресурс, который в значительной степени определяется эффектами термоциклирования (поток энергии на плазмоприемник ~ 20 МВт/м²). Для описанных в литературе устройств теоретически оцененный ресурс составлял $\sim 10^4$ импульсов. В то же время на установке ГДМЛ тепловая нагрузка на плазмоприемники будет складываться из квазистационарной тепловой нагрузки от потока плазмы, вытекающей из ловушки (ионы с энергиями несколько кэВ), и импульсно-периодической нагрузки от электронного пучка (электроны с энергией десятки кэВ) с длительностью импульса 10-100 мкс и скважностью 10-100. Информации о поведении конструкционных материалов под действием такой нагрузки в настоящее время нет, в связи с этим на установке ГОЛ-3 были проведены эксперименты по импульсному тепловому воздействию на различные материалы в условиях, близких к ожидаемым на установках ГДМЛ.

Еще одним важным вопросом является скорость эрозии поверхности плазмоприемников. Если принять, что поток энергии на плазмоприемник равен 20 МВт/м² и средняя энергия иона в потоке равна 4 кэВ, поток частиц на поверхности равен $2.5 \times 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Физическое распыление, при коэффициенте распыления 0,02, приводит к эрозии 20 нм за импульс или 0,2 мм за 10^4 импульсов. Существенно большая скорость эрозии может возникать из-за накопления водорода в материале плазмоприемников, в частности, вследствие блистеринга (так же рассматривалось в исследовании).

Вторым направлением было исследование возможных способов подпитки и рециркуляции вещества в установке ГДМЛ. Получено, что наилучшим вариантом работы системы подпитки газом является ионизация газа на периферии плазменного шнура в расширителе и его инжекция в центральный соленоид с помощью плазменной пушки. В частности, для этого плазмоприемник в области границы плазмы может быть удален в область слабого поля, а перифе-

рийный слой плазмы может нагреваться с помощью ВЧ-нагрева. Рассмотрен и другой сценарий работы в котором применяется откачка газа в расширителе и подпитка плазмы через газ-бокс в многопробочной секции вблизи центрального соленоида. Максимальная концентрация газа в расширителе оценивается как $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для обеспечения такого вакуума скорость вакуумной откачки в расширителе должна составлять $1.75 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$. Такая откачка может быть обеспечена только геттерированием газа на поверхности расширителя (например, с помощью титанирования поверхности), площадь поверхности геттера должна составлять 400 м^2 . Альтернативными вариантами являются использование криооткачки, нераспыляемых геттеров или других материалов с высокой скоростью диффузии водорода, или титанирование в процессе разряда.

Третьим направлением работ было моделирование режимов нагрева плазмы в центральной ячейке при инъекции нейтральных пучков. Научно-исследовательские работы проводились с помощью одномерного кода DOL, ранее разработанного для моделирования нестационарных параметров плазмы в открытых осесимметричных ловушках. Модель и соответствующий код DOL были использованы для определения максимально достижимого к.п.д. термоядерных реакций Q в источнике нейтронов на основе ГДМЛ для приложений атомной энергетики, причем была проведена оптимизация параметров установки с использованием алгоритмов Хука-Дживса и дифференциальной эволюции.

Полученный в ходе работы научный и научно-технический задел имеет высокую значимость как для продолжения фундаментальных научных исследований, так и для практического применения полученных результатов, например, для использования открытой ловушки с инъекцией популяции быстрых ионов в качестве источника нейтронов - драйвера для подкритического реактора деления.

2. Исследования функционирования электронного пучка с плазменным катодом с целью удлинения длительности инъекции без пробоев свыше 100 мкс

На базе существующего в ИЯФ СО РАН (в составе комплекса ГОЛ-3) источника с дуговым плазменным эмиттером реализована новая схема формирования электронного пучка. Ранее применявшаяся в ИЯФ схема представляла со-

бой мультиапертурный диод, катод и анод которого были выполнены в виде плоских молибденовых «решеток» гексагональной структуры с 241 соосно выполненным круглым отверстием. Диаметр катодных отверстий составлял 3 мм, эффективный диаметр мультиапертурной структуры – 83 мм (прозрачность около 30%), зазор между электродами – 10 мм. В ходе выполнения работ по проекту была изготовлена новая диодная система (Рис. 2.1 и 2.2), аналогичная используемой в источниках электронного пучка типа SOLO (ИСЭ СО РАН, г. Томск). Эмиссионный (катодный) электрод был выполнен в виде мелкоячеистой плетеной сетки из нерж. стали с размером ячейки около 0.3 мм (прозрачность около 50%) и диаметром сетки 80 мм, анодный электрод был выполнен в виде трубы дрейфа из нерж. стали с внутренним диаметром 90 мм и длиной 350 мм. Минимальное расстояние от сетки до анодного электрода составляло 40 мм. Помимо замены ускорительного диода, остальная конструкция источника (в том числе дуговой генератор эмиссионной плазмы с полым анодом-экспандером плазмы) была оставлена прежней, без изменений.

Источник пучка был установлен на существующий экспериментальный стенд, т.е. использовалась та же самая магнито-вакуумная система, что и в предшествовавших экспериментах с мультиапертурным диодом. Импульс ускоряющего напряжения $\sim 100 \text{ кВ}$ подавался на катодный (эмиссионный) электрод, анодный же электрод был заземлен. Генерация электронного пучка происходила в осевом магнитном поле $\sim 5 - 10 \text{ мТл}$, далее пучок транспортировался в вакуумную камеру соленоида в нарастающем магнитном поле (до 0.3 Тл в максимуме) и поглощался в цилиндре Фарадея (ЦФ) в конце соленоида. Таким образом, в процессе транспортировки пучок подвергался адиабатическому сжатию по плотности тока в 30 – 60 раз.

После этапа высоковольтной тренировки новой электродной системы был проведен цикл экспериментов по генерации электронного пучка и определению максимально достижимых режимов пучка, инжектируемого в пробочном магнитном поле в экспериментальную камеру. В ходе экспериментов регистрировался ток дугового разряда, создающего эмиссионную плазму, полный ток в цепи ускоряющего напряжения (ток эмиссии), ток на ЦФ, ток на анодную трубу дрейфа, а также напряжение на диоде.

Величина тока эмиссии пучка определялась заданием тока дугового разряда, длительность импульса задавалась с помощью срезающего разрядника в цепи высоковольтного питания (кроубара), либо ограничивалась пробоем

диола вследствие нарастающих по времени процессов плазмообразования на коллекторе (ЦФ), в тракте транспортировки и т.п. Поскольку целью представляемых экспериментов было определение максимально достижимых параметров инъекции, длительность пучка в них ограничивалась именно пробоем диода.

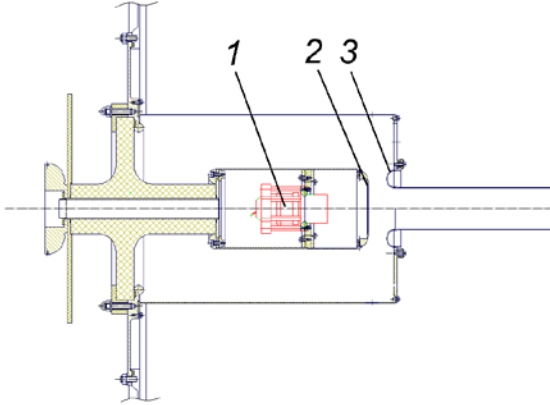


Рисунок 2.1. Источник пучка с сеточным катодом: 1–генератор плазмы; 2–катодный электрод с мелкоячеистой сеткой; 3–анодная труба дрейфа.

Напуск рабочего газа дугового разряда (аргона) производился импульсно быстрым электромагнитным клапаном. Типичное остаточное давление газа в камере источника в промежутке между импульсами пучка составляло $\sim 6 - 8 \cdot 10^{-4}$ Па. При необходимости это давление могло быть повышено путем плавного уменьшения, с помощью вакуумного шибера, скорости откачки камеры турбомолекулярным насосом, так, что аргон не успевал полностью откачиваться в промежутке между рабочими импульсами пучка.

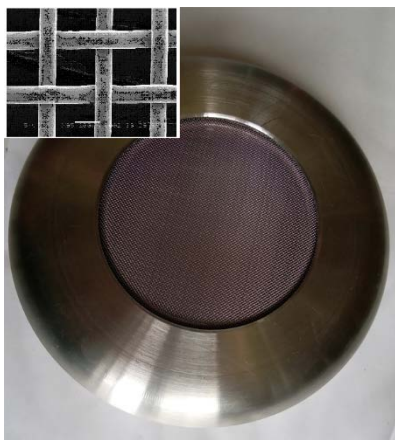


Рисунок 2.2. Сетчатый катод и фрагмент катодной сетки (увеличено в 50 раз).

В ходе экспериментов, при максимально достижимом ускоряющем напряжении, путем увеличения тока дугового разряда постепенно

повышался ток эмиссии пучка. Как показали эксперименты, максимально достигнутая длительность импульса инъекции находилась в обратной зависимости от тока эмиссии. На рисунках 2.3 и 2.4 приведены типичные осциллограммы для пучков, полученных в диоде с мультиапертурными электродами и в системе с мелкоячеистым сеточным катодом и анодной трубой дрейфа (выстрелы #496 и #1059, соответственно). Сопоставление режимов производилось для импульсов одинаковой длительности при равных прочих условиях на стенде (вакуум, магнитное поле и т.п.).

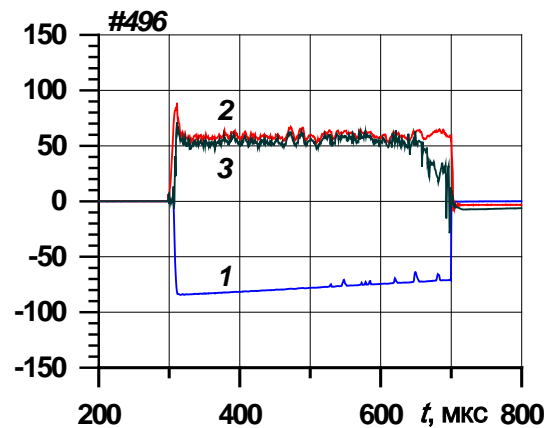


Рисунок 2.3. Осциллограммы для мультиапертурного диода: 1 – потенциал катода [кВ]; 2 – эмиссионный ток [А]; 3 – ток ЦФ [А].

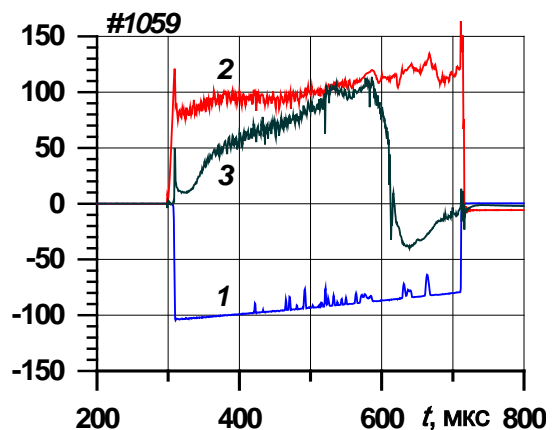


Рисунок 2.4. Осциллограммы для диода с сеточным катодом и анодной трубой: 1 – потенциал катода [кВ]; 2 – эмиссионный ток [А]; 3 – ток ЦФ [А].

Импульс напряжения имел трапециевидную форму, его спад обусловлен разрядом накопительной емкости источника ускоряющего напряжения, "пички" на осциллограммах обусловлены работой цепей защиты диода, предотвращающей переход быстрых «провалов» импеданса диода в пробой. Как видно из осциллограмм, в случае мультиапертурного ди-

ода ток эмиссии и ток на ЦФ практически постоянны во времени и совпадают на протяжении почти всего импульса. Прохождение тока на ЦФ в магнитном поле с коэффициентом компрессии по потоку 30 составляет ~95%. Максимально достижимые ток эмиссии и напряжение на диоде при длительности импульса ~0.4 мс имеют величину около 60 А и 85 кВ, соответственно. Для «новой» системы с мелкосеточным катодом и анодной трубой ток на ЦФ вначале значительно меньше тока эмиссии, затем монотонно нарастает и приблизительно через 0.2 мс практически сравнивается с ним. Быстрый спад и переплюсовка тока ЦФ в конце импульса обусловлены, по-видимому, процессами плазмообразования на коллекторе – сигнал от рентгеновского датчика (сцинтиллятор с ФЭУ), расположенного снаружи ЦФ, показывает, что ток пучка на коллектор длится вплоть до конца импульса напряжения. Расхождение токов эмиссии и ЦФ полностью обусловлено током электронов на анодную трубу дрейфа, что подтверждается соответствующими измерениями (осциллограмма тока на анод здесь не показана, чтобы не усложнять рисунок).

Наблюдаемая динамика токов допускает следующую интерпретацию: в самый начальный период импульса (~10 мкс) в системе существует вакуумное распределение электрического поля, при этом около 90% тока пучка оседает на анодную трубу (что согласуется с результатом численного моделирования, выполненного с помощью пакета POISSON-2 в предположении однородной эмиссии по катодной сетке). Возникающее далее нарастание тока пучка, приходящего на ЦФ, связано с образованием так называемого «плазменного анода», что приводит к изменению картины электрического поля в диоде и приближению геометрии эффективного ускоряющего зазора к плоской – аналогично тому, как это происходит в источниках типа SOLO. Плазма в анодной трубе образуется как при ионизации остаточного газа, так и газа, десорбированного электронами пучка с поверхности анодной трубы. Следует подчеркнуть, что наблюдаемое увеличение прохождения, вплоть до полного, тока пучка на ЦФ не может быть объяснено только лишь возникновением зарядовой компенсации пучка (что также проверялось численным моделированием). При сопоставимой длительности около 0.4 мс, максимальное значение тока пучка достигало величины 100А, что существенно больше, чем в случае мультиапертурного диода. При этом ускоряющее напряжение составляло 105 кВ и ограничивалось лишь возможностями системы высоковольтного питания (для мультиапертурного

диода устойчивые режимы работы достигались при напряжениях не выше 91 кВ). Энергосодержание пучка, прошедшего на ЦФ, определенное по осциллограммам на рисунках 2.3 и 2.4, как формальный интеграл от произведения тока ЦФ на напряжение по времени до момента закоротки тока ЦФ ($t \sim 650$ мкс и $t \sim 600$ мкс, соответственно), составляет 1.41 кДж для мультиапертурного диода и 1.82 кДж для диода типа SOLO. Принимая во внимание, что ток пучка на коллектор не прекращается в момент срыва сигнала тока ЦФ и продолжается до конца импульса напряжения, можно оценить энергосодержание как ~1.6 кДж и ~2.89 кДж, соответственно, то есть отношение энергозапасов пучка оценочно может достигать величины ~1.8 для сравниваемых типов диодных систем.

При длительности пучка ~ 0.15 мс ток эмиссии мог быть увеличен до 150 А в максимуме. Соответственно, при уменьшении тока эмиссии до уровня ~ 40А длительность пучка на ЦФ составляла величину около 1.2 мс, при этом ток ЦФ выходил на уровень около 22 А через ~ 0.2 – 0.3 мс и далее оставался постоянным до конца импульса.

Несмотря на достигнутое значительное повышение энергозапаса пучка в схеме с мелкоячеистым сеточным катодом и анодной трубой дрейфа (или, что эквивалентно, длительности импульса при той же величине энергозапаса), экспериментально проявленным недостатком этой схемы является затянутый (~ 0.2 мс) фронт тока, проходящего на ЦФ, что связано, по-видимому, с медленным формированием «плазменного анода». С целью ускорить этот процесс, были проведены эксперименты при повышенном остаточном давлении аргона в объеме, где размещался источник пучка. Однако, при повышении давления до величины ~ $5 \cdot 10^{-3}$ Ра возникло заметное сокращение длительности импульса пучка по причине пробоя диода, при том, что не наблюдалось уменьшения затянутости фронта тока.

Новая схема генерации электронного пучка в условиях инжекции пучка в линейную магнитную ловушку проявляет как сравнительные достоинства, так и недостатки. Однако, в случае решения задачи эффективного создания плазменного анода в трубе дрейфа, она представляется перспективной для получения пучков большей длительности и мощности, в сравнении с существующим мультиапертурным диодом. Новизна полученных результатов заключается также в том, что была экспериментально продемонстрирована адекватность угловых характеристик электронов пучка, получаемого в сеточном диоде установок типа SOLO, задачам

с адиабатической магнитной компрессией пучка с коэффициентом ~ 50 по плотности тока.

3. Теоретические исследования и математическое моделирование создания и удержания плазмы с $\beta = 1$ в центральной ячейке ГДМЛ

В 2016 году было проведено численное моделирование установок на основе концепции ГДМЛ с помощью кода DOL [1]. Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой. Физика плазмы, т. 42, № 3, с. 217-233 (2016). Моделирование было нацелено на максимизацию коэффициента усиления мощности в плазме (Q_{eng}), определяемого как отношение мощности, выделяемой в реакциях синтеза, к потребляемой мощности P_{grid} . В модели варьировались следующие параметры:

- энергия инжектируемых частиц (при изменении этого параметра ток инжектируемых частиц изменялся в обратной пропорции так, чтобы мощность инжекции сохранялась),
- пробочное отношение в точке инжекции (этот параметр аналогичен углу наклона инжекторов, нацеленных на центральную плоскость основной ячейки),
- радиус плазменного столба в центральной плоскости основной ячейки,
- количество вводимого в плазму нейтрального газа, необходимого для поддержания баланса частиц,
- пробочное отношение.

При этом в качестве физических ограничений были взяты следующие:

- относительное давление плазмы не должно было превышать единицу ($\beta < 1$), устойчивость плазмы с таким β продемонстрирована в экспериментах на установке ГДЛ;
- режим удержания тёплой плазмы близок к газодинамическому, это условие определялось неравенством $\tau_{gd} > \tau_{kin}$, где τ_{gd} и τ_{kin} — времена удержания плазмы, посчитанные для случая частых (газодинамическое) и редких (кинетическое) столкновений соответственно;
- ослабление пучков не превышает 90% (при нарушении этого условия формируется «трубчатая» плазма).

В качестве дополнительного инженерного ограничения было взято максимальное значение магнитного поля в системе — предполагалось, что поле в магнитной пробке не должно превышать величину 15 Т (в настоящее время импульсные поля на установке ГДЛ ограничены величиной 10-11 Т).

В результате оптимизации показано, что конфигурации с максимальным Q_{eng} достигаются при одновременном достижении границ по относительному давлению ($\beta \approx 1$) и по степени газодинамичности ($\tau_{gd} \approx \tau_{kin}$). Характерный скейлинг коэффициента усиления мощности от длины установки и потребляемой мощности представлен на рисунке 3.1.

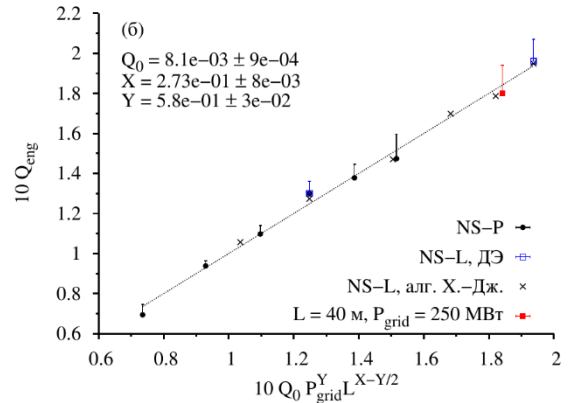


Рисунок 3.1. Зависимость коэффициента усиления мощности от длины установки и потребляемой мощности для D-T плазмы и коэффициента подавления продольных потерь многопробочной секцией, равного 10.

4. Создание новой версии концептуального проекта ГДМЛ с учётом результатов поддерживающих экспериментов, разработки новых технологий и теоретических идей

Исходная версия концептуального проекта ГДМЛ была основана на синтезе концепций газодинамической и многопробочной ловушек, в том числе предполагалось использовать центральный пробкотрон с быстрыми плещущимися ионами в качестве активной зоны, и многопробочные секции для подавления продольных потерь. При работе центрального пробкотрона в режимах, характерных для ГДЛ (бета порядка 0.6) и многопробочных секций в режиме ГОЛ-3, достижимая термоядерная эффективность Q_{DT} в проекте ГДМЛ составляла около 10%. Кроме проверки концепции, важной особенностью планировавшегося эксперимента было значительное время удержания плазмы, порядка секунды, что требовало использования в конструкции сверхпроводящих соленоидов. Необходимость новой версии концептуального проекта была обусловлена тремя обстоятельствами: появлением новых идей, способных принципиально улучшить характеристики ловушки, трудностями в разработке системы ин-

жекции импульсно-периодического электронного пучка в плазму, и отсутствием перспектив достаточного финансирования проекта ГДМЛ в существующем виде.

Новые идеи, предложенные для включения в проект ГДМЛ это – а) винтовые многопробочные секции, реализующие эффективное продольное удержание и пинчевание плазмы [2], и б) диамагнитное удержание плазмы с высоким бета (около 1) в центральном пробкотроне [3]. Кроме того, выдающиеся достижения группы ГДЛ по нагреву электронной компоненты плазмы гиротронами [4] делает желательным включение этой технологии в проект ГДМЛ (возможно, вместо электронного пучка). Новые методы удержания пока описаны и опубликованы в статьях только теоретически и требуют верификации в новых поддерживающих экспериментах на новых установках (не могут быть реализованы на ГДЛ и ГОЛ из-за требований к магнитной конфигурации). Эти эксперименты запланированы на сооружаемых за счёт грантовой поддержки РНФ установках СМОЛА и САТ.

Новый концептуальный проект ГДМЛ показан на рисунке 4.1.

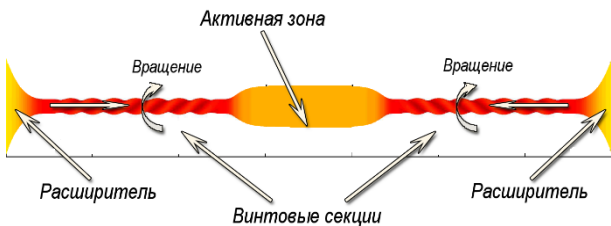


Рисунок 4.1. Концептуальный проект ГДМЛ.

Активная зона с плещущимися ионами располагается в соленоиде, создающем квази-однородное магнитное поле для реализации режима диамагнитного пузыря. Переход в этот режим и его поддержание должны обеспечиваться фокусированной мощной атомарной инжекцией и инжекцией частиц в виде пеллет или компактных плазменных тороидов (как на установке С2-*W*). За осесимметричными пробочными узлами будут расположены секции со спирально-гофрированным магнитным полем. Взаимодействие вращающейся плазмы с таким полем носит комплексный характер. Теоретически предсказан и планируется к реализации режим, при котором за счёт работы источника вращения истекающая плазма не только закачивается обратно в ловушку, но и испытывает при этом радиальное пинчевание, т.е., одновременно снижаются и продольные и радиальные потери. Показано, что винтовое удержание совместимо с

режимом диамагнитного пузыря в активной зоне. В качестве источников вращения плазмы планируются: а) тангенциальная инжекция атомарных пучков; б) поддержание радиально-распределённого потенциала плазмы за счёт торцевых и краевых (лимитерных) электродов и внешних источников тока (как в ГДЛ), и электронных пучков (при условии успешной разработки этой технологии). Торцевые электроды и электронные пучки должны располагаться в расширителях, обеспечивающих основную часть электростатической термоизоляции по электронному каналу. Поддерживающие эксперименты по определению требуемых вакуумных условий в расширителе и оптимизированной конструкции торцевых и краевых электродов проведены в этом году на установке ГДЛ и будут продолжены в следующем. Магнитная система в новой схеме ГДМЛ должна быть полностью сверхпроводящей, с полем в центральном соленоиде около 1 Тесла, и гофрированным полем в винтовых секциях в диапазоне от 5 до 10 Тесла. Размеры установки в новой версии предполагается сохранить, так что полная длина системы будет около 30м, при длине центрального соленоида около 6м. В связи с расчётом на использование режима диамагнитного пузыря в центральном соленоиде диаметры вакуумной камеры и соленоида будут увеличены до 1,2 м и 1,5 м соответственно.

Аналитические оценки достижимых параметров плазмы в системе ГДМЛ показывают существенное преимущество новой версии. Расчётная термоядерная эффективность всей системы может вырасти на порядок, до $Q_{DT} > 1$, и более, в зависимости от успешности винтового многопробочного удержания при низкой плотности плазмы и стабильности режима диамагнитного пузыря.

Изложенная выше в общих чертах новая версия концепции ГДМЛ нуждается не только в (планируемой) экспериментальной верификации заложенных в неё новых принципов и технологий, но и в детальных компьютерных расчётах поведения плазмы для оптимизации систем нагрева и удержания. Эти работы запланированы в рамках данного пункта госзадания на следующий год.

5. Проведение экспериментов с высоким β на установке ГДЛ в интересах проекта ГДМЛ

В настоящее время установка ГДЛ используется в качестве прототипа основной (центральной) ячейки будущей установки ГДМЛ.

Эксперименты, проводящиеся на ГДЛ, направлены, в частности, на решение ряда инженерно-физических проблем проекта ГДМЛ. Одним из ключевых вопросов проекта является вопрос о создании начальной плазмы (или «предплазмы»). Обычные режимы работы ГДЛ предполагают создание предплазмы с помощью дугового генератора, находящегося в расширительном баке (рисунок 5.1, дуговой генератор находится в правом, «западном» баке и обозначен как «плазменная пушка»). Плазма с низкой температурой (несколько электрон-вольт) и высокой плотностью проходит через магнитную пробку и заполняет центральную часть ГДЛ. Такой метод имеет два существенных недостатка. Первый вызван тем, что заметная часть плазмы, создаваемой дуговым генератором, остаётся в расширительном баке и частично нейтрализуется. Это приводит к ухудшению вакуумных условий в расширителе. Второй недостаток появляется при переходе от ГДЛ к конфигурации ГДМЛ, который состоит в том, что между расширительным баком и основной ячейкой устанавливается дополнительная многопробочная секция. Течение плазмы вдоль этой структуры затруднено. С одной стороны, этот эффект улучшает удержание плазмы в центральной ячейке ГДМЛ и является основным преимуществом перед конфигурацией ГДЛ. С другой стороны, этот же эффект мешает заполнению основной ячейки, что может потребовать значительно большего количества плазмы в расширительном баке и, соответственно, существенного ухудшения вакуумных условий в расширителе.

Для преодоления этой проблемы на ГДЛ в 2016 году проводилась работа над альтернативным методом создания предплазмы с помощью СВЧ-пробоя газа. Ранее, в 2013–2014 годах, на ГДЛ была создана система электронно-циклотронного нагрева (ЭЦН) плазмы, включающая в себя две независимые подсистемы, каждая из которых состоит из гиротрона мощностью до 450 кВт и частотой генерации 54.5 ГГц, квазиоптического преобразователя, волноводов и системы зеркал (рисунок 5.2) [4]. Для СВЧ-пробоя использовалась только одна из двух подсистем (левая или «восточная»). Сценарий работы был следующим. Вначале открывался клапан поддува газа и в установке создавалась необходимая концентрация водорода.

Затем подавался импульс СВЧ. После короткой стадии пробоя происходил рост, а затем насыщение линейной плотности плазмы (рисунок 5.3). Линейная плотность перестаёт зависеть от мощности гиротрона, если последняя превышает 150 кВт. Как следует из рисунка 5.3,

между линейной плотностью плазмы и начальной концентрацией газа имеется прямая зависимость. Насыщение линейной плотности объясняется полным исчерпанием газа в центральной ячейке. На рисунке 5.4 показана зависимость некоторых параметров разряда от времени. Основной вывод данной работы состоит в том, что режимы с дуговым генератором аналогичны режимам с СВЧ-пробоем и отличаются только начальной переходной стадией. При этом, за счёт отключения дугового генератора вакуумные условия в расширительном баке улучшаются на 1-2 порядка.

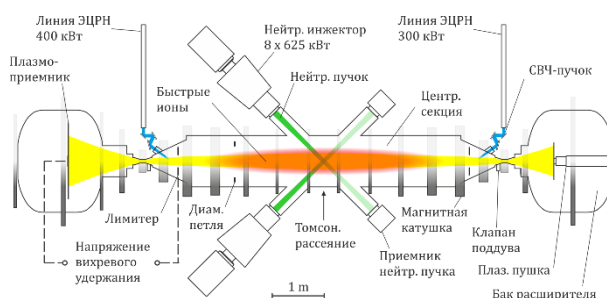


Рисунок 5.1. Схематическое изображение установки ГДЛ.

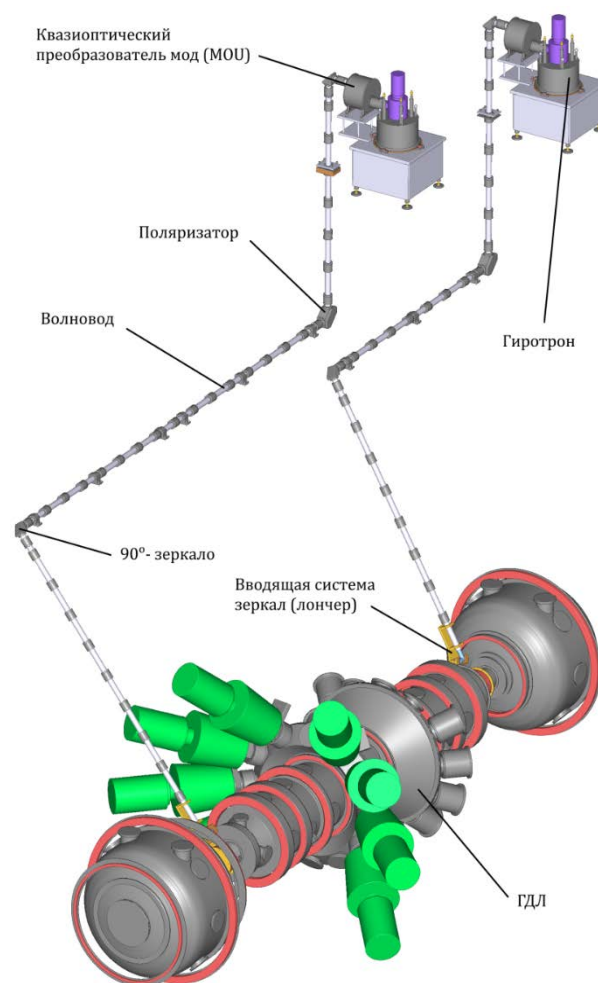


Рисунок 5.2. Система ЭЦН нагрева на ГДЛ.

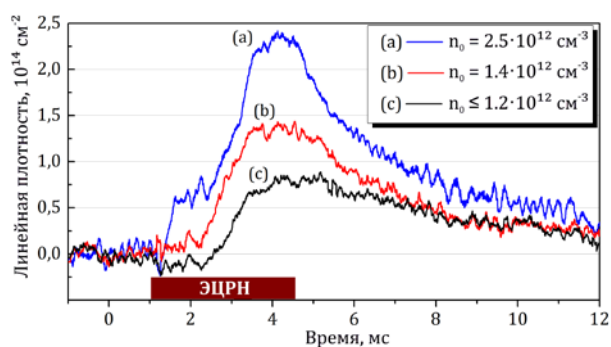


Рисунок 5.3. Зависимость линейной плотности плазмы от времени в режиме СВЧ-пробоя при разных начальных концентрациях газа.

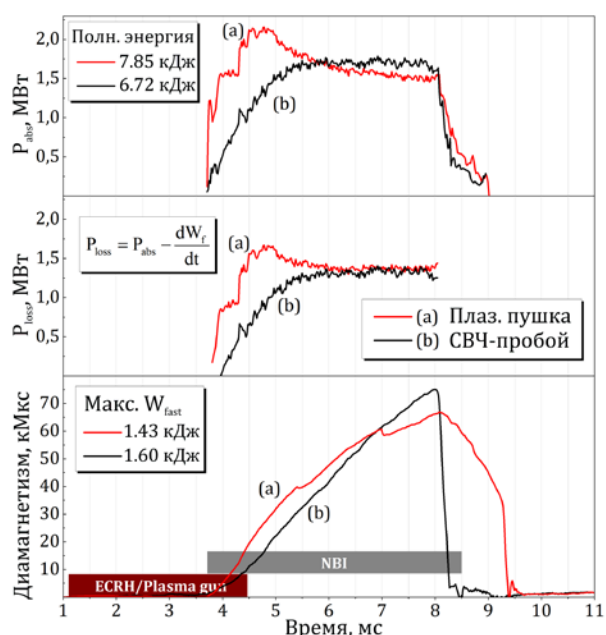


Рисунок 5.4. Временная эволюция параметров разряда в режимах с дуговым генератором и с СВЧ-пробоем газа.

6. Проведение экспериментов на установке ГДМЛ-Т по исследованию воздействия плазмы и электронного пучка на конструкционные материалы в интересах проекта ИТЕР

В 2016 году была проведена серия экспериментов по воздействию мощных импульсных тепловых нагрузок на образцы из вольфрама – материала, выбранного для покрытия поверхности дивертора в международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР. В испытательной установке, разработанной в ИЯФ СО РАН, для моделирования импульсного нагрева в термоядерном реакторе применён субмиллисекундный (0.15-0.3 мс) электронный пучок. Использование электронного пучка в качестве источника переходной тепловой нагрузки на металлическую мишень имеет преимущество в относительно низкой интенсивности фонового

света, сопровождающего процесс нагрева. Это позволяет применить широкий набор оптических диагностик для исследования поверхностной эрозии вольфрамовой мишени в процессе её нагрева и сразу после этого. Кроме того, электронный пучок производит низкое прямое давление на поверхность материала, а также испытывает меньшее ограничение по плотности поглощенной мощности, вызванное интенсивным испарением материала мишени. Эти различия в экспериментальных условиях с аналогичными испытательными установками на основе плазменных потоков позволяют существенно расширить экспериментальную базу по эрозии материалов, при воздействии на них интенсивных переходных тепловых нагрузок. Комплекс оптических диагностик включает в себя набор быстрых ПЗС камер, дающих изображение мишени в ближней инфракрасной области, а также в свете лазерного излучения; рассеяние излучения непрерывного лазера на поверхности мишени и на каплях, испускаемых из слоя расплава; непрерывное измерение светового излучения мишени и абляционного факела в различных выбранных пространственных точках.

Полученные экспериментальные результаты включают *in situ* наблюдения образования сети трещин на поверхности вольфрамовой мишени и эволюции этой сети с последующими импульсами нагрева. Эта сеть видна как яркий узор на ИК изображении во время и после импульса нагрева и соответствует краям трещин, имеющим более высокую температуру. Визуализация поверхности мишени во время нагрева с помощью лазерной подсветки показывает изменение структуры поверхности вблизи краев трещины и их пересечений, что может быть истолковано как плавление вольфрама в этих местах. Более яркая сеть трещин, видимая на горячей поверхности, с последовательными импульсами нагрева расширяется и развивается в отдельных местах в перегретые области с повышением температуры над окружающей поверхностью до 500°K, как это следует из абсолютной калибровки ПЗС-камер. Эти горячие зоны связаны с ростом трещин, параллельных поверхности, которые прогрессируют с образованием областей, которые частично отделены от объемного материала, что можно видеть из приведённого рисунка.

Динамика капель вольфрама, выбитых с поверхности образца при высоких тепловых нагрузках исследовались с использованием ПЗС-камер с экспозицией 2 мкс и 10 мкс, а также с помощью многоканальной регистрации лазерного излучения, рассеянного на микрочастицах. Скорости частиц до нескольких сотен

м/с наблюдались с той характерной особенностью, что более быстрые частицы имеют меньший размер. Анализ следов капель на изображениях указывает на то, что разбрызгивание происходит в течение короткого промежутка времени около окончания импульса нагрева.

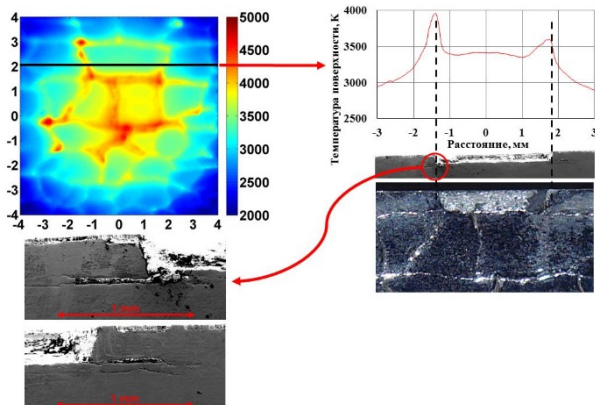


Рисунок 6.1 Сопоставление температуры поверхности с наличием подповерхностных трещин. Обнаружены повышения локальной температуры поверхности во время импульса и их корреляция с расположением трещин под поверхностью мишени.

7. Разработка и тестирование новых конструкционных материалов для термоядерной энергетики будущего, исследование их поведения в экстремальных условиях, близких к условиям термоядерного реактора

Деградация свойств конструкционных материалов в условиях перспективного термоядерного реактора обусловлена широким спектром физических процессов. Наиболее интенсивное разрушение будут испытывать поверхности материалов первой стенки, которая непосредственно обращена к горячей термоядерной плазме. Наряду с химической и физической эрозией, а также воздействием радиации, некоторые схемы удержания термоядерной плазмы в реакторе подразумевают импульсно-периодическое тепловое нагружение поверхности стенки. Одним из примеров такого процесса являются ЭЛМы (ELM – edge localized mode, локализованная на краю неустойчивость) в реакторе на основе ТОКАМАКа, в котором для удержания и термоизоляции плазмы используется магнитное поле с тороидальной конфигурацией.

По современным представлениям в ТОКАМАКе-реакторе развитие плазменной неустойчивости будет приводить к спонтанному выбросу мощных плазменных вспышек на поверхность диверторных пластин. В этом случае разрушение поверхности материала дивертора

может быть обусловлено такими процессами, как растрескивание, плавление и кипение материала. В данный момент большие усилия прикладываются к разработке методов контроля ЭЛМов, которые позволили бы увеличить частоту событий за счет уменьшения разрушительной силы отдельных вспышек. Однако надежных путей снижения интенсивности этих событий до незаметного для поверхности уровня на данный момент не обнаружено. Как показывают недавние исследования, даже уменьшение тепловой нагрузки до, казалось бы, приемлемого уровня, который заведомо ниже, чем порог механического разрушения материала, не спасает от постепенной деградации поверхности при многократном воздействии.

В работе [5] исследовано влияние тепловых импульсов, подобных нагрузке при ЭЛМах, на поверхность вольфрама, который выбран как основной материал дивертора для экспериментального ТОКАМАКа-реактора ITER. Обнаружено, что тепловое циклирование поверхности приводит к рекристаллизации слоя материала, который испытывает интенсивный нагрев. Рекристаллизация поверхности приводит к изменению её механических свойств, что выражается в охрупчивании материала. Резкая дегградация пластических свойств поверхности неминуемо приводит к снижению порога хрупкого разрушения материала и к его постепенному растрескиванию. Одним из известных методов, которые применяются для предотвращения рекристаллизации, является создание двухфазных композитов [6]. В таком композите рост зерен основной фазы естественным образом останавливается включениями инородного материала. В данном проекте мы предприняли первые шаги к исследованию рекристаллизации вольфрамовых композитов под воздействием импульсно-периодической тепловой нагрузки на их поверхность.

Композит был приготовлен методом горячего прессования на основе смеси порошков вольфрама и молибдена. Для создания импульсного теплового воздействия на материал применялся длинноимпульсный электронный пучок, получаемый в многоапертурном диоде с плазменно-дуговым катодом. Облучение выполнялось при энергии электронов 31 кэВ, плотности мощности 1,6 ГВт/м² и продолжительности импульса 260 мкс. В этом режиме было произведено по 1000 импульсов облучения на каждый исследуемый образец.

Средний размер зерен материала можно получить по двухкоординатным рентгеновским дифрактограммам. Положение дифракционного пика от каждого зерна зависит от ориентации в

пространстве его кристаллической структуры. Дифракционные пики от большого количества зерен материала складываются в дифракционные кольца. По неоднородности интенсивности рассеянного излучения в этих кольцах можно судить о среднем размере зерен.

Двухкоординатные рентгеновские дифрактограммы поверхности композита и контрольных образцов из вольфрама были получены до облучения и после. Разбиение дифракционных колец на отдельные точки позволило судить о возрастании среднего размера зерен материала. На рисунке 7.1 приведен характерный вид полученных дифрактограмм, который позволил зарегистрировать рекристаллизационный рост зерен материала. Однако для того, чтобы судить об эффективности применения двухфазных композитов для подавления рекристаллизации, нужно сравнить результаты облучения двухфазных образцов и контрольного образца из вольфрама. Для этого в данный момент выполняется совершенствование методов математической обработки дифрактограмм, что позволит численно характеризовать наблюдаемую модификацию микроструктуры материала.



Рисунок 7.1 Двухкоординатные рентгеновские дифрактограммы поверхности композита до облучения (слева) и после (справа).

Заключение

Суммируя результаты проделанной работы, следует сделать вывод, что выполнение темы привело к получению новых важных результатов, открывающих новые перспективы для открытых ловушек, как установок термоядерного синтеза. Ввод в действие на установке ГДЛ системы электронно-циклотронного нагрева позволил достичь в этой установке рекордной для открытых ловушек электронной температуры – свыше 600 эВ, что демонстрирует возможность подавления выноса энергии из ловушки за счет электронной теплопроводности. Также на установке ГДЛ с использованием системы электронно-циклотронного нагрева развит новый способ получения начальной мишенной плазмы, позволяющий отказаться от использования плазменных пушек, применение которых на установках реакторного класса представляло значительные трудности. Эти результаты показывают, что система ЭЦР

нагрева является необходимым элементом установки нового поколения.

В рамках проекта продолжались работы по созданию системы инжекции мощных электронных пучков в плазму. В настоящее время инжектор электронного пучка используется для материаловедческих исследований, позволяя создавать импульсные тепловые нагрузки более 1 ГВт/м^2 в импульсах длительностью более 100 мкс. Исследованная схема генератора пучка с плазменным анодом продемонстрировала свою перспективность для увеличения длительности импульса инжекции.

В ходе выполнения проекта были предложены кардинально новые решения, позволяющие существенно повысить эффективность открытой линейной ловушки как термоядерного реактора. К таким решениям относятся схема “диамагнитной” ловушки, дающая возможность значительного увеличения эффективного пробочного отношения и, как следствие, времени удержания плазмы, а также винтовые многопробочные секции, реализующие эффективное продольное удержание и пинчевание плазмы. Аналитические оценки достижимых параметров плазмы в системе ГДМЛ показывают существенное преимущество новой версии. Расчётная термоядерная эффективность всей системы может вырасти на порядок, до $Q_{DT} > 1$, и более, в зависимости от успешности винтового многопробочного удержания при низкой плотности плазмы и стабильности режима диамагнитного пузыря. Таким образом, выполнение проекта привело к получению результатов, значительно повышающих перспективность открытых ловушек для целей реализации термоядерного синтеза.

Список использованных источников

- [1] Д.В.Юров, В.В.Приходько, Ю.А.Цидулко. Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой. Физика плазмы, т. 42, № 3, с. 217-233 (2016).
- [2] V.V. Postupaev, A.V. Sudnikov, A.D. Beklemishev, I.A. Ivanov Helical mirrors for active plasma flow suppression in linear magnetic traps // Fusion Engineering and Design v. 106 pp.29–33, (2016).
- [3] A.D. Beklemishev, Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps // Physics of Plasmas v.23 n.8, p.082506, (Aug 2016).
- [4] P.A.Bagryansky, S.P.Demin, E.D.Gospodchikov, Yu.V.Kovalenko, V.I.Malygin, S.V.Murakhtin, V.Ya.Savkin, A.G.Shalashov, O.B.Smolyakova, A.L.Solomakhin,

- M.Thumm, D.V.Yakovlev. ECR Heating System for the Gas Dynamic Trap. *Fusion Science and Technology*, v. 63, n. 1T, p. 40-45 (May 2013).
- [5] A. Suslova, O. El-Atwani, D. Sagapuram, S. S. Harilal, A. Hassanein, Recrystallization and grain growth induced by ELMs-like transient heat loads in deformed tungsten samples // *Scientific Reports*, V. 4, N. 6845, 2014.
- [6] V.V. Medvedev, M.Y. Popov, B.N. Mavrin et al. Cu-C₆₀ nanocomposite with suppressed recrystallization // *Appl. Phys. A*, 105: 45, 2011.

№ 15.1.1 Развитие и применение методов теоретической физики в ФЭЧ и космологии

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию и применению методов теоретической физики в физике элементарных частиц (ФЭЧ) и космологии. Полученные в 2016 году и представленные в отчете результаты исследований продемонстрировали значительный прогресс в вычислениях эффективных вершин и импакт-факторов в физике полужестких процессов, в области многопетлевых вычислений и автоматизации этих вычислений, в понимании физики В-мезонов и суперсимметричных теорий, а также гравитации Фаддеева. Эти результаты находятся на передовом крае мировой науки.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В рамках выполнения работ по проекту на предыдущих этапах была осуществлена проверка гипотезы реджезации калибровочных бозонов в СЯМ в СГЛП. При доказательстве был использован метод, основанный на соотношениях бутстрапа. Соотношения бутстрапа получаются из требования совместимости s-канальной унитарности и мультиреджевской формы амплитуды. На мультиреджевской форме амплитуды основан подход Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ), который является эффективным методом исследования СЯМ в мультиреджевской области.

Вычислены импакт фактор дифракционного рождения трех струй в древесном приближении и импакт фактор дифракционного рождения двух струй в однопетлевом приближении. Данные импакт факторы используются для построения дифференциального сечения дифракционного фоторождения двух и трех струй. Данные по такому рождению набраны на ускорителе HERA и уже обработаны. Результаты обработки свидетельствуют о том, что наблюдается различие между экспериментальными данными и имеющимися теоретическими предсказаниями, основанными на моделях в рамках коллинеарной факторизации. Полученные импакт факторы также будут применяться для построения предсказаний для ультрапериферического рождения струй в столкновениях тяжелых ионов на БАК.

Была вычислена аномальная размерность угла на Вильсоновской линии в трёхпетлевом приближении. Рассмотрены различные суперсимметричные теории и в них найдены множественности различных вакуумов и величины кварковых конденсатов в каждом из этих вакуумов.

Был исследован вопрос о возможности применения квазиклассического подхода к вычислению сечений с учетом второй квазиклассической поправки. Оказалось, что на этом уровне точности кроме квазиклассического вклада (отвечающего учету вклада больших орбитальных моментов) необходимо также учитывать вклад малых орбитальных моментов (неквазиклассический вклад). С учетом первой квазиклассической поправки вычислено точно по полю сечение тормозного излучения в атомном поле. Изучена зарядовая асимметрия в этом процессе (разница между сечениями тормозного излучения электрона и позитрона).

Продолжено изучение представления гравитации Фаддеева. Было предложено и начато изучение представления дискретного действия Фаддеева, аналога формы Картана-Вейля действия ОТО Эйнштейна с независимыми переменными связности. Была введена связность – дискретный набор (на тетраэдрах) матриц $SO(10)$. Билинейные по тетраде переменные типа тензора элементарных площадей канонически сопряжены матрицам связности $SO(10)$. Это важно для предполагаемого квантования, в частности, самих площадей. Показано, что, исключая связность $SO(10)$ с помощью уравнений движения, мы получаем дискретное действие Фаддеева. Результаты опубликованы в работе [11].

Было предложено и начато изучение дискретной версии представления Палатини действия ОТО с помощью независимой аффинной связности (символы Кристоффеля) – в дискретной версии матрицы общей линейной группы $GL(4, \mathbb{R})$. Форма Палатини упрощает вид действия, а дискретность позволяет корректно подойти к квантовой теории. Исключение дискретной связности даёт в точности дискретное действие ОТО Эйнштейна (действие Редже).

2. Вычисление реджевской траектории глюона в КХД в трехпетлевом приближении

Был разработан метод вычисления реджевской траектории глюона в КХД при большом числе цветов. Идея метода состоит в использовании результатов планарной макси-

мально суперсимметричной теории Янга-Миллса ($N=4$ СЯМ). Наиболее сложная для вычисления часть реджевской траектории связана с глюонным вкладом. Этот вклад может быть получен вычитанием из траектории в $N=4$ СЯМ вкладов скалярных частиц и майорановских фермионов в присоединенном представлении цветовой группы. Полная реджевская траектория глюона в КХД при большом числе цветов получается добавлением к глюонному вкладу вклада кварков в фундаментальном представлении. Выражения для этих вкладов могут быть получены модификацией известных интегральных представлений для глюонного вклада в КХД в двухпетлевом приближении.

Попутно проведен анализ модификации ядра БФКЛ для присоединенного представления цветовой группы в $N = 4$ СЯМ с большим числом цветов, связанный с модификацией его собственных значений, предложенной С. Бондаренко и А. Пригариним для обеспечения эрмитовой сепарабельности собственных значений. Восстановлено модифицированное ядро в импульсном пространстве. Показано, что модификация касается только реальной части ядра и что поправки к ядру не могут быть представлены единой аналитической функцией во всей области изменения импульса, что противоречит известным свойствам ядра.

3. Вычисление импакт-факторов реджеон-глюонного перехода

В следующем за следующим за главным логарифмическим приближении (ССГЛП) схема вывода уравнения БФКЛ должна быть изменена из-за нарушения простой факторизованной формы амплитуд с мультиреджевским обменом и необходимостью учитывать мнимые части амплитуд в соотношениях унитарности. Мнимые части амплитуд многочастичного рождения в мультиреджевской кинематике выражаются через интегралы, содержащие импакт-факторы реджеон-глюонного перехода. Из-за сингулярности меры интегрирования, для того, чтобы получить мнимые части с точностью до неисчезающих в физическом пространстве-времени членов, импакт-факторы в инфракрасной области должны быть вычислены при произвольной размерности пространства-времени. Эти вычисления завершены.

Нарушение простой факторизованной формы амплитуд с мультиреджевским обменом связано с необходимостью учета в ССГЛП трехреджеонных разрезов. Проведен анализ вкладов таких разрезов в амплитуды упругих процессов.

4. Вычисление импакт-фактора перехода фотон - легкий векторный мезон с произвольной передачей, виртуальностью и поляризацией фотона в однопетлевом приближении. Построение предсказаний для БАК

Для нахождения импакт-фактора перехода фотона в легкий векторный мезон были вычислены следующие диаграммы, изображенные на рис. 4.1.

Диаграмма 1 описывает хорошо известный борновский вклад, диаграммы 2-6 являются радиационными поправками. Поправки, представленные на диаграммах 2,3,5,6 не сингулярны в коллинеарном пределе для конечных кварков. Их вклад можно получить из вклада аналогичных диаграмм для рождения пары струй. Диаграмма 4 в коллинеарном пределе содержит дополнительные расходимости, которые сокращаются при свертке с мезонной амплитудой распределения. Полученный ответ конечен. Он справедлив для рождения продольно поляризованного мезона из виртуальных и реальных фотонов, для рассеяния вперед и на ненулевой угол.

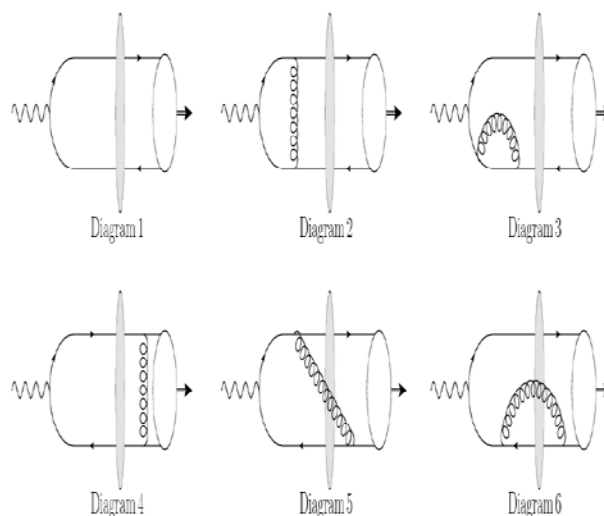


Рисунок 4.1. Диаграммы, дающие вклад в импакт-фактор перехода виртуального фотона в легкий векторный мезон. Темный овал обозначает ударную волну, созданную мишенью, белый овал обозначает мезонную амплитуду распределения.

Вычисленный импакт-фактор необходим для описания данных по дифракционному электророждению легких векторных мезонов на установке HERA, по рождению ро-мезонов в ультрапериферических столкновениях на Большом адронном коллайдере (БАК) и других установках.

5. Создание программы, автоматизирующей некоторые стадии метода DRA

Метод DRA был предложен Р.Н. Ли и многократно им использовался в различных задачах, связанных с многопетлевыми вычислениями. Несмотря на свою концептуальную простоту и красоту, метод довольно медленно осваивается многопетлевым сообществом. Одна из причин состоит в том, что этот метод требует некоторой эвристики при выборе однородного решения и основной полосы, на которой фиксируются сингулярности. Другой причиной является отсутствие пакета, автоматизирующего некоторые стадии метода.

Была проделана большая работа по созданию пакета DREAM, позволяющего автоматизировать применение метода DRA в той степени, в которой это возможно. Программа автоматизирует построение неоднородного решения размерностного рекуррентного соотношения. Построенные решения хранятся в виде объектов, каждый из которых соответствует упорядоченному пути в диаграмме иерархии мастер-интегралов. После задания однородного решения пакет позволяет вычислять с произвольной точностью разложение мастер-интегралов вблизи любой размерности (обычно, конечно, требуется $d=4$). Важным преимуществом выбранного подхода является возможность использования нестандартных объектов для некоторых мастер-интегралов. В частности, такая возможность необходима для применения метода DRA в случае нескольких мастер-интегралов с одним набором знаменателей.

6. Применение метода DRA к задаче вычисления трехпетлевого потенциала между кварками

Именно такие мастер-интегралы (мастер-интегралы с одним набором знаменателей) появляются в задаче аналитического вычисления потенциала между статическими кварками в трёхпетлевом приближении. Полученные результаты, фактически, определяют мировой уровень в области многопетлевых вычислений. Многочисленные попытки решить до конца задачу аналитического вычисления трёхпетлевого потенциала предпринимались на протяжении как минимум 6 последних лет, однако только две работы, выполненные в рамках настоящего проекта, позволили достичь этой цели.

7. Вывод и анализ правила сумм для V -мезонов, параметра смешивания $V - \bar{V}$, в ведущем порядке по $1/m$

Разность масс Δm в $V0$ - анти $V0$ осцилляциях в Стандартной Модели определяется матричным элементом некоторого 4-кваркового оператора между мезонами $V0$ и анти $V0$. Этот матричный элемент принято записывать в виде его факторизованного значения, умноженного на параметр $V(\mu)$, описывающий нарушение факторизации. В эффективной теории тяжелого кварка (HQET) в ведущем порядке по $1/m$ этот оператор становится линейной комбинацией двух HQET операторов, а один из коэффициентов подавлен по α_s . Матричные элементы этих HQET операторов можно определить из 3-точечных правил сумм. Многие вклады в 3-точечные корреляторы имеют факторизованный вид; вклады, нарушающие факторизацию, сильно подавлены. В пертурбативной части коррелятора они впервые возникают в трех петлях. Пертурбативное нарушение факторизации составляет $0.68\alpha_s/\pi$. Мы учли также нарушающий факторизацию вклад кваркового конденсата, начинающийся с двух петель.

Учитывая также нарушение факторизации в сшивке КХД с HQET, мы получили $V(m_b) - 1 = -0.11 \pm 0.04$, $V = 1.34 \pm 0.06$. Этот результат согласуется с результатами моделирования на решётке и имеет сравнимую точность.

В дальнейшем предполагается рассмотреть другие 4-кварковые операторы, описывающие $V0$ - анти $V0$ смешивание (в том числе за рамками Стандартной Модели), а также случай V_s мезонов.

8. Исследование влияния электрического поля на распространение фотона в магнитном поле

Показано, что в присутствии слабого электрического поля отсутствует корневая расходимость в выражении для эффективной массы фотона вблизи порога рождения пары фотоном.

В работе [1] используется постоянное и однородное магнитное поле меньше, чем критическое поле Швингера. В свою очередь, постоянное и однородное электрическое поле берется меньше, чем магнитное поле. В такой конфигурации полей рассматривается эффективная масса реального фотона с определенной поляризацией как в квантовой области энергий, так и в квазиклассической. Вообще говоря, дей-

ствии электрического поля на длине формирования процесса "замазывает" энергетическую щель рождения пары.

9. Анализ спектра площади в гравитации Фаддеева, связанной с ним энтропии чёрной дыры и параметра Барберо-Иммирци в гравитации

Формулировка Фаддеева представляет ОТО в терминах расширенного набора переменных - d-мерной тетрады f_A^λ , где греческий индекс λ - мировой индекс псевдориманова пространства-времени, пробегающий 4 значения, а заглавный латинский A - индекс d-мерного пространства Минковского (стандартный выбор Фаддеева $d=10$). Метрический тензор есть $g_{\mu\nu} = f_{\mu A}^\lambda f_{\nu B}^\lambda$, $f_{\mu A}^\lambda = \eta_{AB} f_{\mu\nu}^\lambda$, $\eta = \text{diag}(+1, \dots, +1, -1)$. Действие является функционалом поля f^λ . При частичном использовании уравнений поля для f^λ оно сводится к действию Эйнштейна.

Специфика действия Фаддеева состоит в том, что оно остаётся конечным на разрывных полях f^λ (и поэтому метриках $g_{\mu\nu}$), так как действие не содержит каких-либо квадратов производных. Разрывность метрики означает, в частности, что если поверхность представляется состоящей из элементарных площадок, то виртуально площадки не обязаны совпадать на общих сторонах, то есть являются независимыми, и спектр площади поверхности может быть представлен в такой формулировке как сумма спектров элементарных площадок.

Ранее нами было предложено представление действия Фаддеева в терминах связности как независимой переменной ω - аналог формы Картана-Вейля в ОТО с обычной 4-мерной тетрадой, причём на связность накладывается условие $\omega_{\nu}^{AB} f_A^\lambda f_B^\lambda = 0$; здесь имеется свободный параметр γ_F , прямой аналог т. н. параметра Барберо-Иммирци в ОТО с обычной 4-мерной тетрадой.

Использование представления в терминах связности - наиболее прямой путь к каноническому квантованию теории. Ранее нами также была предложена дискретная версия этого представления, основанная на разбиении пространства-времени на элементарные области (тетраэды или симплексы) и введении дискретной переменной связности, которая является ортогональной матрицей в d-мерном пространстве-времени. Кривизна получается произведением связностей. Грубо говоря, тензор элементарной площадки, билинейный по тетраде, канонически сопряжён дискретной связности. Это ведёт к квантованию элементарной площадки в каче-

ственной аналогии с квантованием углового момента, канонически сопряжённого ортогональной матрице вращения в трёхмерном пространстве.

Нами получен результат для j-го собственного значения элементарной площади. Отсюда, как разработано в литературе, может быть найдена статистическая энтропия чёрной дыры. Требование соответствия формуле Бекенштейна-Хокинга для энтропии фиксирует γ_F посредством определённого трансцендентного уравнения (нами найдено $\gamma_F = 0.392$ при $d = 10$).

10. Изучение представления ОТО в формулировке Редже в терминах аффинной связности, физические следствия

Известно действие ОТО в терминах независимой аффинной связности, то есть форма Палатини с независимыми символами Кристоффеля Γ , так что их исключение с помощью уравнений поля даёт исходное действие Эйнштейна ОТО. В дискретном подходе рассматривается кусочно-плоское риманово пространство-время составленное из тетраэдров) и действие ОТО сводится к действию Редже - сумме вкладов от треугольников σ^2 с площадью $A\sigma^2$ и угловым дефектом $\alpha\sigma^2$.

Дискретными аналогами символов Кристоффеля являются произвольные невырожденные матрицы 4×4 (то есть элементы группы $GL(4, \mathbb{R})$) на тетрадрах σ^3 , $M_{\sigma^3}^\lambda$. Дискретная версия метрики - метрика $g_{\lambda\mu}$, постоянная внутри каждого тетраэдра, полностью определена длинами всех рёбер и координатами всех вершин. Чтобы получить представление для действия Редже, подобного форме Палатини непрерывной теории, составляются матрицы кривизны R_{σ^2} на треугольниках σ^2 - произведения матриц M_{σ^2} или $M_{\sigma^2}^{-1}$ на тетрадрах σ^3 , содержащих σ^2 , взятых по пути обхода σ^2 .

Угловые дефекты $\alpha\sigma^3$, входящие в действие Редже тригонометрически, выражаются через R_{σ^2} и тензор так, чтобы уравнения движения для M_{σ^2} удовлетворялись для связности M_{σ^2} , согласованной с метрикой - в этом случае они выражают собой условие замыкания поверхности σ^3 , выполняющееся тождественно.

В функциональном интеграле при больших (в планковских единицах 10^{-33} см) площадях A основной вклад идёт от области малого аргумента x функции \arcsin , так что $\arcsin x \approx x$. Специфика найденного нами действия, зависящего от связностей, приводит к тому, что мы имеем многомерный аналог некоторой функции

Бесселя, означающей экспоненциальное подавление при характерных величинах тензоров площадок $A \gg 1$.

В итоге, найдена дискретная точная версия действия ОТО в форме Палатини на кусочно-плоском многообразии. Как и в непрерывной теории, форма Палатини имеет преимущество в более простом и обозримом виде в сравнении с действием, зависящим только от метрики/длин рёбер. Также имеется явный механизм сходимости функционального интеграла, приводящий, в том числе, к экспоненциальному подавлению элементарных площадок больших планковского масштаба. Дальнейшая работа состоит во включении в рассмотрение дискретного аналога линейного по кривизне нарушающего чётность слагаемого Гаусса-Бонне и в детальном анализе функционального интеграла.

11. Изучение множественности вакуумов, спектров масс, фазовых состояний, корреляторов полей в суперсимметричных теориях

Суперсимметрия рассматривается в настоящее время как наиболее перспективный вариант обобщения Стандартной Модели. Поэтому изучение динамики различных 4-х мерных суперсимметричных калибровочных теорий является одним из основных направлений современной теоретической физики высоких энергий. Этому вопросу посвящено большое количество научных статей. Особый интерес представляют $N=1$ теории типа суперсимметричной квантовой хромодинамики (SQCD). К сожалению, ввиду сильной связи и наличия непертурбативных эффектов в настоящее время получено лишь очень небольшое количество строгих результатов, носящих в основном формальный характер.

Для различных $N=1$ суперсимметричных калибровочных теорий типа $N=1$ SQCD, с $SU(N_c)$ глюонами и N_f ароматами легких кварков, а также с N_f^2 дополнительными бесцветными скалярными суперполями был разработан новый метод вычисления спектров масс. Метод состоит в следующем:

1) Нахождение точного эффективного суперпотенциала данной суперсимметричной теории и, на этой основе, нахождение множественностей различных вакуумов и величин конденсатов кварков, глюино и скалярных суперполей в каждом из вакуумов.

2) Используя полученные значения конденсатов, в зависимости от значений параметров ла-

гранжиана находятся сначала иерархии возможных непертурбативных и/или пертурбативных полюсных масс кварков, глюонов (при хигсовании кварков) и скаляров, - отдельно в прямой и Seiberg-дуальной теориях.

3) Это, в свою очередь, позволяет найти фазовые состояния и вид ренормгрупповой эволюции (т.е. величины аномальных размерностей и констант перенормировки полей) в каждом из вакуумов.

4) Наконец, используя всю эту информацию, вычисляются спектры масс различных частиц, отдельно в каждом из вакуумов и отдельно в прямой и Seiberg-дуальной теориях.

Аналогичный подход был использован для нахождения спектров масс в слабо нарушенной $N=2 \rightarrow N=1$ суперсимметричной КХД в вакуумах со спонтанно нарушенной симметрией ароматов $U(N_f) \rightarrow U(n_1) \times U(n_2)$ и ненарушенной глобальной дискретной симметрией $Z_{2N_c - N_f}$.

Заключение

Суммируя результаты проделанной работы, следует сделать вывод, что программа работ, запланированных на 2016 год и в целом по теме 15.1.1 Развитие и применение методов теоретической физики в ФЭЧ и космологии" (№ 0305-2014-0005), в основном выполнена.

В частности, разработан путь вычисления траектории глюона в КХД при большом числе цветов. Для вычисления будет использована траектория в максимально суперсимметричной теории Янга-Миллса ($N=4$ СЯМ) в планарном приближении. Траектория глюона является одной из важнейших составных частей ядра уравнения эволюции амплитуд с энергией. Также в инфракрасной области импакт-фактор реджеон-глюонного перехода найден при произвольной размерности пространства-времени. Проведен анализ вкладов трехреджеонных разрезов в амплитуды упругих процессов. Полученные результаты необходимы для развития подхода БФКЛ в ССГЛП.

В рамках проекта был разработан необходимый инструментарий для применения метода DRA. С его помощью был получен аналитический результат для трёхпетлевого потенциала между статическими кварками. В дальнейшем планируется использовать пакет DREAM для других задач, требующих вычисления многопетлевых интегралов, зависящих от одного масштаба.

Также из 3-точечных правил сумм в HQET получен параметр B_0 - анти B_0 смешивания B -мезонов, важный для извлечения фундаментальных параметров Стандартной Модели

из экспериментальных данных. Результат согласуется с решёточными вычислениями и имеет сравнимую точность.

Показано, что в присутствии слабого электрического поля отсутствует корневая расходимость в выражении для эффективной массы фотона вблизи порога рождения пары фотоном.

Нами получен результат для j -го собственного значения элементарной площади в квантовой гравитации Фаддеева. Отсюда может быть найдена статистическая энтропия чёрной дыры. Также найдена дискретная точная версия действия ОТО в форме Палатини на кусочно-плоском многообразии.

Наконец, для $N=1$ суперсимметричных калибровочных теорий типа $N=1$ SQCD, с $SU(N_c)$ глюонами и N_F ароматами легких кварков, а также с N_F^2 дополнительными бесцветными скалярными суперполями, наряду с впервые полученными расчетами спектров масс в прямой и Seiberg-дуальной теориях, было обнаружено качественно новое явление: ввиду сильной связи скалярные частицы, имеющие очень большие массы в области малых расстояний, становятся легкими в области больших расстояний, что приводит к появлению двух дополнительных поколений легких скалярных $N=1$ супермультиплетов.

Для слабо нарушенной $N=2$ суперсимметричной SQCD найдены (в каждом из многочисленных вакуумов с ненарушенной дискретной $Z_{2N_c-N_f}$ симметрией):

- а) множественности различных вакуумов и фазовые состояния,
- б) квантовые числа легких частиц,
- с) спектры масс различных супермультиплетов.

Полученные результаты углубляют и расширяют понимание нетривиальной динамики суперсимметричных калибровочных теорий и являются дальнейшим шагом в попытках построения суперсимметричных обобщений Стандартной Модели.

Список использованных источников

- [1] Katkov, V.M. "Influence of an electric field on the propagation of a photon in a magnetic field," J.Phys.Conf.Ser. 732 (2016) no.1, 012003.

№ 15.1.2 Поиск новой физики в экспериментах при высоких энергиях

Введение

ИЯФ СО РАН участвует в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) Европейского Центра по физике высоких энергий (ЦЕРН) с 1995 г., то есть почти с момента организации коллабораций. Был внесен большой вклад в создание и запуск ускорителя и детекторов. Были разработаны, изготовлены и поставлены тысячи магнитов, мониторы для диагностики пучков, вакуумное оборудование, сверхпроводящие шины для токопроводов магнитов, конструкции для прецизионного крепления элементов детекторов, пресамплер – мини-детектор в составе жидкоаргонового электромагнитного калориметра детектора АТЛАС – всего оборудования на сумму свыше 150 млн. швейцарских франков.

С 2010 г. эксперименты, ведущиеся на БАК, стали основным источником новой информации по физике высоких энергий, особенно в том, что касается поиска «новой физики» за пределами Стандартной Модели. В 2010-12 г. детекторы БАК набирали статистику при рекордной энергии столкновений протонов (7 тера-электрон-вольт (ТэВ) в 2010-11 годах и 8 ТэВ в 2012 г. в системе центра масс). Интеграл набранной светимости составил соответственно 0.04, 4.7 и 20.7 обратных фемтобарн. Основным результатом стало достоверное наблюдение сигнала от новой частицы, свойства которой оказались близки к ожидаемым для хиггсовского бозона Стандартной Модели. Нобелевская премия по физике 2013 г. была присуждена П. Хиггсу и Ф. Энглеру «за открытие теоретического механизма, помогающего понять происхождение массы субатомных частиц, и недавно подтвержденного обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН».

В начале 2013 г. БАК и детекторы были остановлены на двухлетнюю плановую остановку для подготовки к работе при проектных параметрах – энергии столкновений протонов 13-14 ТэВ в системе центра масс и светимости 10^{34} см²сек⁻¹. В июне 2015 г. на БАК была достигнута новая рекордная энергия столкновений протонов – 13 ТэВ в системе центра масс – и начался новый этап набора данных (так называемый «заход 2», «заход 1» проводился в 2010-2012 г.). Благодаря тщательной подгото-

вительной работе удалось обеспечить высокую (более 92%) эффективность набора данных. С июня по ноябрь 2015 г. был набран интеграл светимости 3.5 обратных фемтобарн на детекторе АТЛАС и 0.3 обратных фемтобарн на детекторе ЛНСб. 2016 Год был очень успешным, интеграл набранной светимости на детекторе АТЛАС составил 36 обратных фемтобарн – это в 10 раз больше, чем было набрано в 2015 г. На детекторе ЛНСб в 2016 г. было набрано 1.66 обратных фемтобарн (в 2015 г. 0.3).

В 2016 году светимость БАК впервые превысила проектное значение 10^{34} см²с⁻¹ (максимальное значение составило $1.37 \cdot 10^{34}$ см²с⁻¹). Планируется достичь уровня $1.8 \cdot 10^{34}$ в 2017-18 г., $5 \cdot 10^{34}$ к 2028 г. и до $7.5 \cdot 10^{34}$ в 2030-е годы. В связи с этим продолжались работы по подготовке будущих модернизаций (апгрейдов) детекторов (прежде всего электроники) и работы по развитию компьютерной инфраструктуры для обработки данных и соответствующего программного обеспечения.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Была завершена длившаяся более двух лет подготовка к началу нового этапа (так называемого «Захода 2») набора данных на детекторах АТЛАС и ЛНСб Большого Адронного Коллайдера, обеспечена высокая эффективность набора и хорошее качество данных, получены первые результаты для набранной статистики.

Была проведена доработка и запуск программного обеспечения детекторов ATLAS и ЛНСб для обеспечения высокой эффективности набора данных при возобновлении работы ЛНС, сдана в эксплуатацию и в дальнейшем поддерживалась в течение всего года основная информационная страничка дежурного по контролю за качеством данных жидкоаргонового калориметра LADiS. Также велась работа по улучшению качества и повышению автоматизации программного обеспечения для поиска плохих каналов в жидкоаргоновых калориметрах – мертвых или имеющих нестандартную амплитуду либо форму сигнала. Для того, чтобы уменьшить время, требующееся на оцифровку и принятие решения триггером, был осуществлен переход от записи данных жидкоаргонового калориметра с 5 измерениями (самплами) амплитуды на импульс (с шагом 25 нс) к записи данных с 4 самплами.

Оптимизирована реконструкция лептонов и фотонов при энергии 13 ТэВ в системе центра масс и светимости 10^{34} см² с⁻¹.

На детекторе LHCb по окончании набора данных при повышенной энергии 13 TeV был проведен предварительный отбор событий В-мезонов и b-барионов. За счет увеличенного сечения рождения В-адронов на такой энергии и улучшенного триггера выход интересных нас распадов на тот же интеграл светимости увеличился в 2-3 раза.

Разработано программное обеспечение для амплитудного анализа трехчастичных распадов, амплитудный анализ распадов $\Lambda_b \rightarrow D_0 p \pi$ и $\Lambda_b \rightarrow D_0 p K$ с целью измерения угла γ треугольника унитарности.

В рамках изготовления и тестирования прототипов новой электроники для модернизации триггерных каналов жидкоаргонового калориметра (ЖАК) детектора ATLAS были выполнены следующие работы по разработке дизайна для FPGA модуля LATOME (LAr Trigger processing MEzzanine) системы цифровой обработки LDPS (LAr Digital Processing System) детектора ATLAS:

1. Разработка блока REMAP, выполняющего функцию группировки входных данных с плат АЦП в соответствии с геометрическим расположением Суперячеек ЖАК. Блок был реализован на языке VHDL, и работа его была промоделирована в системе верификации дизайнов FPGA Menor ModelSim.

2. Разработка блока OSUM eFEX формирования пакетов выходных данных для триггерной системы реконструкции признаков электронных ливней eFEX. Блок принимает вычисленные поперечные энергии, формирует пакеты данных и отправляет их в волоконно-оптические линии связи для передачи в систему eFEX.

В рамках первых этапов работ по проекту было модернизировано оборудование и программное обеспечение вычислительного кластера BINP/GCF: 1) Развёрнута в полном объеме сеть Infiniband, объединяющая вычислительные узлы кластера. 2) Начат перевод внутренней сети передачи данных на технологию 10GbE. 3) Введено в строй хранилище данных на базе распределённой файловой системы CEPH начальной ёмкостью около 10 Тб. 4) Примерно в два раза увеличено число процессорных ядер и объём памяти служебных серверов BINP/GCF. 5) Начат перевод служебных серверов на операционную систему Scientific Linux 7.

Увеличена производительность информационной системы распределенной обработки данных GRID, выполнено расширение системы AGIS: совершенствование

клиентского пакета и дальнейшая интеграция с другими программными компонентами вычислительной инфраструктуры детектора ATLAS.

2. Обеспечение стабильной работы детекторов ATLAS и LHCb, участие в дежурствах во время набора данных

Сотрудники ИЯФ СО РАН обеспечивают проведение экспериментов ATLAS и LHCb, принимая участие в наборе данных в экспериментальных сменах и в сменах по контролю качества данных (а также в создании и развитии соответствующего программного обеспечения).

В январе-феврале 2015 года была сдана в эксплуатацию и в дальнейшем поддерживалась основная информационная страничка дежурного по контролю за качеством данных жидкоаргонового калориметра детектора ATLAS LADieS Page 1 (снимок экрана текущего состояния странички показан на рис. 1). Во время набора статистики на детекторе всегда назначается два таких дежурных сроком на неделю (сотрудники ИЯФ отработали 4 недельных блока в 2016 г.). В их обязанность входит ежедневный контроль качества каждого экспериментального захода. С точки зрения контроля качества можно выделить восемь стадий обработки экспериментальных данных и в зависимости от сложившейся ситуации текущая стадия, её состояние и рекомендации к дальнейшим действиям дежурного должны отображаться на LADieS Page 1. Для контроля данные автоматически направляются в четыре независимых потока: два express (предобработка части данных) и два bulk (полная обработка). По каждому из этих потоков необходимо отображать актуальное состояние обработки и комментарии экспертов и пользователей. Вывод списка будущих дежурных, а также подсчёт отработанных и запланированных дней так же является составной частью программы странички.

Постоянный адрес расположения странички <https://atlas-larmon.cern.ch/LArPage1/> (необходим пароль для входа в инфраструктуру CERN). В 2016 году по большей мере осуществлялась поддержка странички. За год было всего два значительных обновления и около трёх десятков зафиксированных исправлений и улучшений. На сегодня код LADieS Page 1 стал стабильным и достиг версии 1.0.0. Пользователь может выбрать интересующий его диапазон заходов по AMI-

тегу, номеру, числу событий, состоянию пучка и т.д. и получить набор кадров с индивидуальной информацией в каждом по конкретному заходу.

Также продолжалась работа по улучшению качества и повышению автоматизации программного обеспечения для поиска плохих каналов в жидкоаргоновых калориметрах – мертвых или имеющих нестандартную амплитуду либо форму сигнала – и документированию информации о них в специальной базе данных.

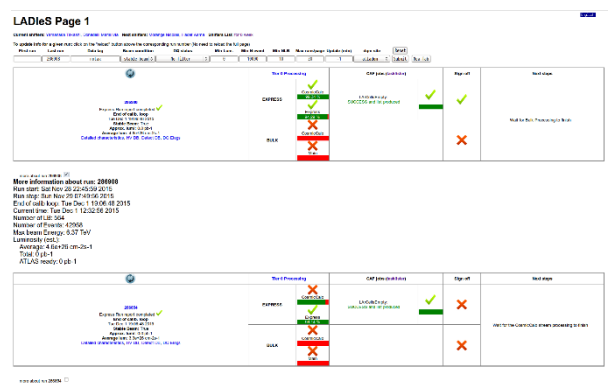


Рисунок 1. Информационная страничка дежурного по контролю за качеством данных жидкоаргонового калориметра детектора АТЛАС.

Система триггера и сбора данных (Trigger and Data Acquisition system) на детекторе АТЛАС отвечает за онлайн обработку данных, получаемых при столкновении пучков в БАК. Данная система состоит из примерно 4000 компьютеров, обрабатывающих данные, считываемые со 100 миллионов каналов детектора через несколько триггерных уровней. Компьютеры имеют широкий спектр конфигураций и выполняют различные функции, их состояние должно постоянно отслеживаться для правильной и стабильной работы всей системы.

Группа системного администрирования системы сбора данных эксперимента занимается поддержанием работоспособности как программного, так и аппаратного обеспечения компьютеров системы. Для мониторинга состояния компьютеров используется более 100 000 различных проверок и уведомлений, которые в свою очередь позволяют не только узнать о неисправности, но также и предотвратить возможные проблемы.

Сотрудники ИЯФ принимали участие в круглосуточных дежурствах, требующих немедленных действий в любое время суток в

случае необходимости, а также в текущих работах по администрированию системы, как программной части, так и аппаратной. Всего было выполнено пять семидневных блоков дежурств, также было отработано более 40 так называемых «тикето» (запросов с конкретной проблемой), как внутренних, так и инициированных пользователями.

В июле-августе была произведена замена и настройка компьютеров в пультовой детектора АТЛАС, а также специальных клиентов, использующих технологию RCoIP, которая позволяет осуществлять удалённый доступ к рабочим столам, развёрнутым на компьютерах в серверной комнате.

Во второй половине 2016 года от системы DCS (Detector Control System) был сделан запрос на переход к следующей операционной системе, которая поддерживается ЦЕРНОм и основывается на CentOS 7 (CC7). Группой системных администраторов была проделана большая работа по миграции с предыдущей версии, основанной на Scientific Linux 6 (SLC6), в чём принималось активное участие.

С целью перехода к новой операционной системе CC7 также была протестирована и улучшена оболочка рабочего стола CRD (Control Room Desktop), которая используется дежурными во время дежурств в главной пультовой детектора АТЛАС, а также сопутствующие компоненты.

Также для обеспечения стабильного набора данных детектором АТЛАС сотрудниками ИЯФ был проведён ряд работ на инфраструктуре центральных вычислительных узлов. В частности, упорядочено использование lemon-сенсоров для мониторинга серверов для всех центральных серверов АТЛАС. Оказана поддержка в конфигурировании сервиса PanDA при миграции на использовании rucio-client.

Для облегчения поддержки и удобства миграции веб-серверов АТЛАС, настройки их безопасности переведены в шаблонную форму, при этом обеспечена обратная совместимость. Оперативно разрешено несколько случаев сбоя при загрузке серверов произошедшие по причине сбоя питания. В аварийном порядке была устранена уязвимость в SSLv3 «Poodle» на нескольких сотнях серверов АТЛАС. Всего за прошедший год отработано более 30 «тикето» в системе JIRA.

3. Анализ данных, набранных на детекторах АТЛАС и ЛНСб в 2015-2016 гг

Физики ИЯФ СО РАН продолжали работу в HZZ группе коллаборации АТЛАС, в частности, по анализу high mass $H \rightarrow 4l$. В данном анализе производится поиск тяжелого бозона Хиггса (с массой от 200 ГэВ до 1000 ГэВ) в канале его распада на 4 лептона через промежуточное состояние с двумя Z бозонами. Существование дополнительных тяжелых бозонов Хиггса предсказывается некоторыми расширениями Стандартной Модели, такими как модель с двумя хиггсовскими дуплетами (2HDM) и модель с электрослабым синглетом (EWS). Четырехлептонный канал характеризуется высоким отношением сигнала к фону и хорошим массовым разрешением, что делает его мощным инструментом для поиска узких резонансов. Относительно малый бранчинг $ZZ \rightarrow 4l$ (0,452%) в сравнении с бранчингами $ZZ \rightarrow llqq$ (4,70%) и $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ (1,35%) приводит к тому, что последние оказываются более чувствительными при массах более 500 ГэВ, однако и в этой области четырехлептонный канал позволяет улучшить суммарный результат.

Отбор событий и оценка фона в этом анализе производятся почти так же, как и в анализе распада бозона Хиггса Стандартной Модели. Пределы на рождение тяжелого бозона Хиггса ставятся отдельно для различных мод — слияния глюонов (ggF, gluon-gluon fusion) и слияния векторных бозонов (VBF, Vector Boson Fusion). Отобранные события разделяются на две категории — ggF и VBF. В VBF категорию отбираются события с как минимум двумя адронными струями с $p_T > 30$ ГэВ и значительным угловым разделением ($\Delta\eta > 3.3$) при инвариантной массе струй более 400 ГэВ. В категорию ggF попадают все остальные события.

Для этого анализа было сделано моделирование ggF рождения бозона Хиггса с последующим его распадом в канале $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, используя генератор MadGraph5, для различных масс H (125, 200, 350, 600, 1000 ГэВ). Это моделирование затем использовалось для оценки систематической неопределенности акцептанса VBF категории. Акцептанс определен как отношение числа событий, проходящих определенные отборы (в данном случае в категории VBF или ggF) к общему числу сгенерированных событий $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$. Таким образом, оценивалась доля событий ggF рождения Хиггса, которая проходит отборы для VBF категории. Полученный в этом моделировании акцептанс сравнивался с таковым, полученным из стандартного моделирования, использующего генератор

Powheg (моделирование струй в Powheg отличается от MadGraph5). Разница бралась в качестве систематической ошибки.

На рис. 2 показано распределение по инвариантной массе 4 лептонов для всех отобранных событий (в логарифмическом масштабе для вертикальной оси слева и в линейном справа).

На рис. 3 показан установленный верхний предел на произведение сечения рождения на бранчинг распада в 4 лептона в приближении узкой ширины скалярного резонанса, в зависимости от его массы. Эти результаты были представлены на конференции ICHEP (для интеграла светимости 14.8 fb^{-1} , доступного на то время). В настоящее время идет работа над получением результатов анализа на всей набранной в 2015-2016 г. статистике ($3.2 + 36 \text{ fb}^{-1}$). Результаты планируется представить на конференции Морионд весной 2017 г.

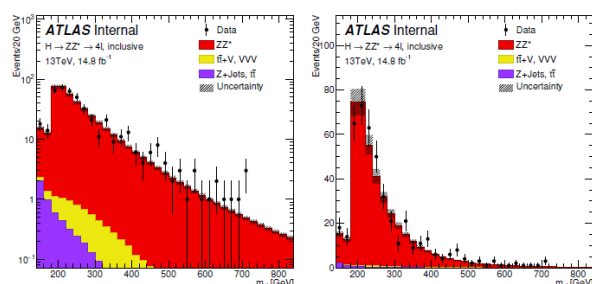


Рисунок 2. Распределение по инвариантной массе 4 лептонов для всех отобранных событий (в логарифмическом масштабе для вертикальной оси слева и в линейном справа).

Также физики из ИЯФ продолжали анализ процесса распада Z-бозона на 2 лептона (электрон-позитронную или мюонную пару) и фотон ($Z \rightarrow 2l\gamma$) на детекторе АТЛАС. Данный процесс в Стандартной Модели (СМ) может быть полностью вычислен в рамках теории возмущений: в нем отсутствуют непертурбативные вклады, такие как поляризация вакуума адронами и рассеяние света на свете при малых энергиях. Фейнмановские диаграммы процесса показаны на Рис. 4.

Были детально изучены фоновые условия. Фоновые условия изучались двумя независимыми способами: с использованием моделирования и прямым измерением по экспериментальным данным. Использовалось моделирование следующих процессов: рождение пары топ и анти-топ кварков, рождение Z-бозона вместе со струями, одновременное рождение W и Z бозонов,

рождение W в сопровождении фотона, рождение двух тау лептонов и фотона. Было показано, что после приложения условий отбора вклад фоновых событий не превышает 1.5 % (он зависит от значения инвариантной массы лептона и фотона), систематическая ошибка вычитания фона была оценена в 0.4 %.

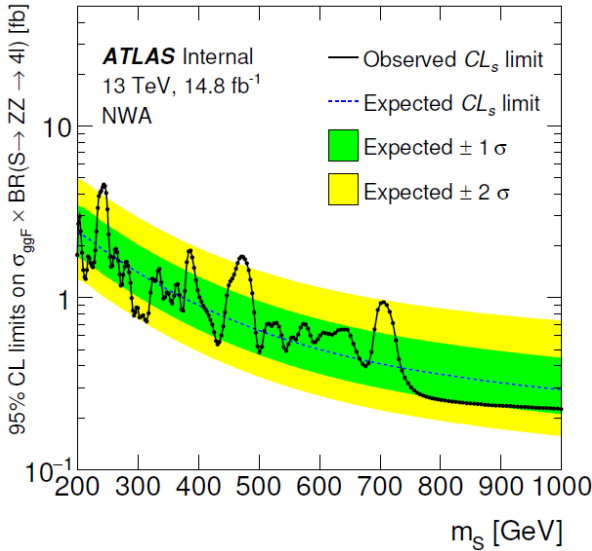


Рисунок 3. Верхний предел на произведение сечения рождения на бранчинг распада в 4 лептона в приближении узкой ширины скалярного резонанса, в зависимости от его массы.

Было также произведено детальное изучение систематических неопределенностей: учтены поправки к эффективности регистрации лептонов и фотона, включающие поправки к эффективности идентификации лептонов и фотона, к эффективности изоляции лептонов и фотона, к эффективности реконструкции лептонов и фотона, к эффективности срабатывания триггера. Средняя величина поправки составила: 0.32 ± 0.28 %. Отдельно изучалось влияние калибровки электромагнитного калориметра и его разрешения: вариация калибровочных коэффициентов на величину одного стандартного отклонения приводит к изменениям распределения по инвариантной массе лептона и фотона на величину, не превышающую 0.2%. Суммарная систематическая неопределенность измерения отношения распределения по инвариантной массе лептона и фотона к моделированию составила 0.5%. Столь малых экспериментальных неопределенностей удалось добиться за счет применения нормировки измеряемого отношения: отношение было определено как: $(Q -$

инвариантная масса лептона и фотона, $M_Z -$ масса Z -бозона)

$$F(Q/M_Z) = \frac{N_{MC}}{N_{exp}} \frac{\frac{\partial N_{exp}}{\partial(Q/M_Z)}}{\frac{\partial N_{MC}}{\partial Q/M_Z}}$$

Измеренное отношение $F(Q)$ представлено на рис 5. Видно, что экспериментальные данные в электронном и мюонном каналах хорошо согласуются между собой и значительно отличаются от предсказания Стандартной модели в низшем порядке теории возмущений (различие составляет 6. и 5.2 стандартных отклонений для электронов и мюонов).

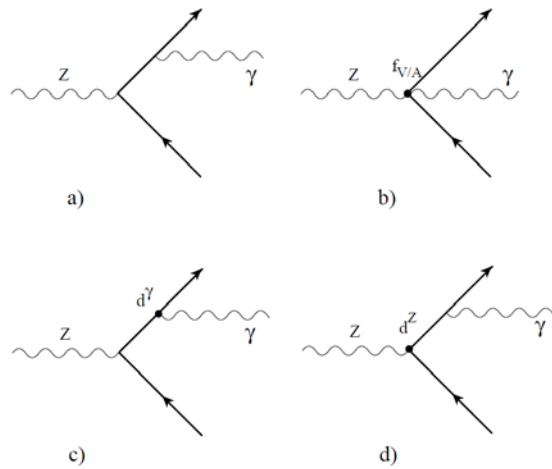


Рисунок 4. Фейнмановские диаграммы для процесса $Z \rightarrow 2l\gamma$. а) одна из борновских диаграмм Стандартной Модели, б) векторный и аксиальный форм-факторы четырехчастичной вершины $Zl\gamma$, в) вклад электрического дипольного момента лептона, д) вклад слабого дипольного момента лептона.

Также были созданы массивы данных моделирования процесса $pp \rightarrow Z+X \rightarrow 2l\gamma+X$ программой PowhegPythia8_Zcor, включающие поправки Стандартной модели в следующем за главным приближении (NLO) по сильному и электромагнитному взаимодействиям. Величина $F(Q)$ вычисленная с использованием данного моделирования изображена на рис 6. Согласие данных и NLO моделирования значительно лучше, чем для LO моделирования (генератор Sherpa, см. выше). Хи-квадрат в электронном канале равен 60.68 на 41 степень свободы, что соответствует отклонению 2.25 сигма нормального распределения. В мюонном канале согласие данных и моделирования совсем хорошее, хи-квадрат равен 36.47 на 41 степень свободы, что соответствует отклонению 0.42 сигма.

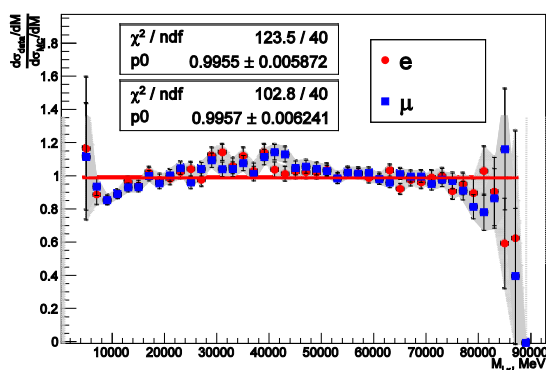


Рисунок 5. Отношение $F(Q)$ для мюонного (синие квадраты) и электронного (красные круги) каналов реакции $pp \rightarrow Z+X \rightarrow 2l\gamma+X$.

Прямая линия – предсказание в низшем порядке теории возмущений (диаграмма излучение в конечном состоянии, см. Рис. 4а).

Однако было обнаружено, что добавка модели прямого распада $Z \rightarrow 2l\gamma$ еще более улучшает согласие с данными. Хи-квадрат становится 26.43 в электронном и 14.87 в мюонном канале. Тогда из процедуры подгонки можно извлечь оптимальные значения соответствующих бранчингов прямого распада $Z \rightarrow 2l\gamma$ (Рис. 4 б) $(3.76 \pm 0.53) \cdot 10^{-5}$ и $(4.31 \pm 0.41) \cdot 10^{-5}$ для электронов и мюонов соответственно. Это значительно меньше верхнего предела установленного на LEP $Br < 5.6 \cdot 10^{-4}$ [OPAL Collab. D.P. Acton, et al. Phys. Lett. B273 338-354 (1991)]. Однако не исключена возможность более прозаической интерпретации, а именно, что все добавки к теоретическому вкладу на рис. 6 описываются членами высших порядков теории возмущений Стандартной Модели. В настоящий момент точный расчет этих поправок еще не сделан (это нетривиальная задача). Для получения этих результатов было необходимо сделать полное моделирование событий прямого распада $Z \rightarrow 2l\gamma$, что потребовало значительных ресурсов компьютерного кластера ИЯФ и НГУ. Всего было смоделировано по 100 000 событий для каждого канала реакции.

Результаты измерения сечения рождения b -адронов в протон-протонных столкновениях способны устанавливать ограничения на теоретические модели непертурбативной квантовой хромодинамики. В последние годы обнаружилось несоответствия между предсказаниями КХД и результатами измерений сечения рождения адронов, содержащих b кварк (LHCb-ANA-2016-005; Chin. Phys. C40 (2016) 011001, JHEP11 (2015) 103). В частности,

несоответствия касаются отношения проинтегрированных в заданном диапазоне сечений при разных энергиях как функции быстроты (rapidity (y)) распадающегося b -адрона. Если рассматривать отношение сечения при большей энергии к сечению при меньшей энергии, то это отношение должно быть неубывающей функцией y . Причиной этого является, однако, не динамика устройства моделей КХД, а кинематика элементарных процессов, происходящих при столкновении адронов, и общие свойства распределения глюонов по импульсу внутри протона.

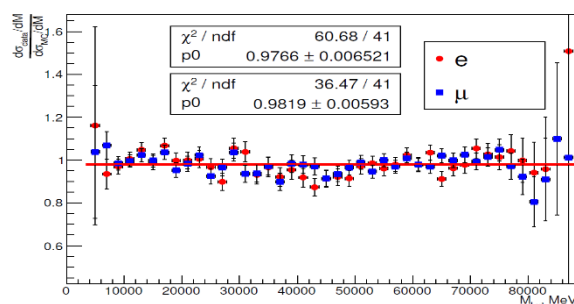


Рисунок 6. Отношение $F(Q)$ вычисленное с использованием поправки Стандартной модели в следующем за главным приближении (NLO) по сильному и электромагнитному взаимодействиям.

Большее количество независимых измерений даст возможность ответить на вопросы о причинах несоответствий между теорией и экспериментом. Одним из направлений работы группы ИЯФ СО РАН в рамках сотрудничества с коллаборацией LHCb было решение задачи определения сечения рождения B_s^0 мезона в протон-протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере по данным детектора LHCb при энергии в системе центра масс протонов 7 ТэВ и 8 ТэВ по процессу $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ с последующими распадами $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $\phi \rightarrow K^+K^-$.

Основной массив экспериментальных данных, вовлеченных в обработку, при 7 ТэВ был набран 2011 году и соответствует интегральной светимости $1,007 \text{ fb}^{-1}$, а при 8 ТэВ — в 2012 году с соответствующей интегральной светимостью $1,99 \text{ fb}^{-1}$. Сечение определялось в кинематическом диапазоне $2,0 < y < 4,5$, $0 < p_T < 40 \text{ GeV}/c$, где p_T здесь и далее означает поперечный импульс B_s^0 мезона. Ранее были опубликованы результаты измерения сечения рождения по тому же процессу и в том же кинематическом диапазоне (JHEP 08 (2013) 117) с интегральной светимостью $0,362 \text{ fb}^{-1}$ при энергии в системе центра масс сталкивающихся

протонов 7 ТэВ, что даёт повод провести сравнение результатов.

Вначале было определено сечение рождения, дифференциальное по переменным p_T и y в соответствии с формулой 1:

$$\frac{d^2\sigma(B_s^0)}{dp_T dy} = \frac{N_{sig} \times (1 - F_s)}{\epsilon_{total} \times \mathcal{L} \times B(B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi) \times B(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) \times B(\phi \rightarrow K^+ K^-)}$$

где N_{sig} – количество сигнальных событий, F_s – скалярная компонента в распределении K^+K^- , ϵ_{total} – полная эффективность регистрации, \mathcal{L} – интегральная светимость, остальные три величины в знаменателе дроби в правой части равенства (1) являются бранчингами распадов, указанных в скобках.

Полный кинематический диапазон по скорости y был разделён на пять равных частей, а по поперечному импульсу p_T — на 15 разных бинов (как показано, например, на рисунке 7).

Для определения полной эффективности регистрации B_s^0 мезона применялась формула 2:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{acceptance} \times \epsilon_{reconstruction\&selection} \times \epsilon_{trigger} \times \epsilon_{PID}$$

Эффективность вычислялась в каждом бине по p_T и y . Акцептанс, или геометрическая эффективность, вычислялась на основе Монте-Карло моделирования генераторного уровня. Устанавливался отбор на угол θ между направлением частиц K^+ , K^- , μ^+ , μ^- и осью протон-протонных пучков. Угол θ для каждой из четырёх частиц должен был находиться в диапазоне от 0,01 до 0,4 радиан, чтобы событие прошло отбор. Далее количество отобранных событий делилось на количество допущенных к отбору событий и отношение являлось акцептансом. В области больших p_T (> 20 ГэВ/с) геометрическая эффективность составляет более 90 %.

Эффективность реконструкции и отбора вычислялась на основе наборов событий, моделируемых методом Монте-Карло (называемых далее событиями Монте-Карло) генераторного уровня и наборов событий полного Монте-Карло. К событиям полного Монте-Карло применялись такие же отборы, что и для реальных событий в набранных экспериментальных данных. Кроме того, к отобранным событиям применялись веса, эмпирически полученные ранее на основе анализа отклика трековых подсистем детектора. Максимальные значения этой компоненты эффективности не превышают 35%.

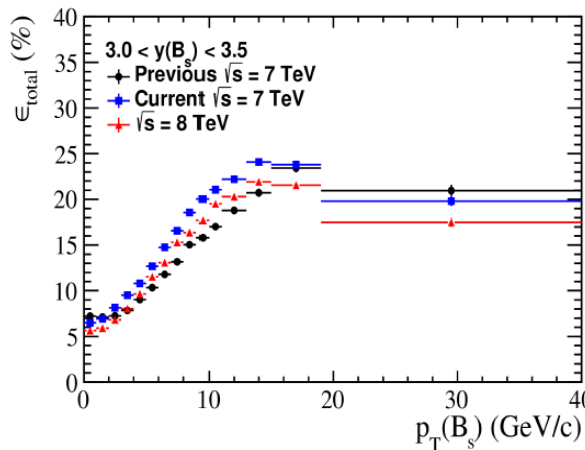
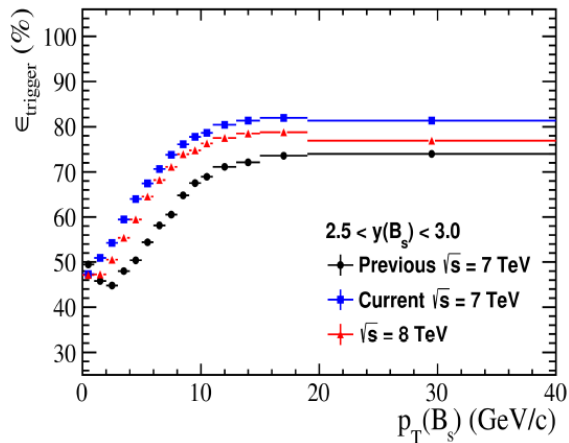


Рисунок 7. Сравнение зависимостей эффективности триггера от поперечного импульса B_s^0 мезона после модификации триггерного отбора (вверху). Сравнение полной эффективности от поперечного импульса B_s^0 мезона после модификации триггерного отбора (внизу).

Зависимость полной эффективности в сравниваемых анализах, определяемая описанным методом, от поперечного импульса B_s^0 мезона внутри бина $3,0 < y < 3,5$ по скорости показана на рисунке 7. Эффективность меняется в несколько раз при изменении рассматриваемого поперечного импульса. Самая низкая полная эффективность наблюдается в области малых значений поперечного импульса и скорости. Максимальное значение полной эффективности не превышает 28% во всём кинематическом диапазоне.

Применение триггерных отборов предыдущего анализа изменило картину эффективности в рассмотренном случае (рисунок 8). Вместе со снижением триггерной эффективности снизилась полная эффективность (рисунок 9) и незначительно поменялась эффективность идентификации. Другие компоненты не зависели от триггерного отбора и поэтому остались прежними.

Аппроксимация экспериментальных данных для определения количества сигнальных событий, входящих в формулу (1), проводилось в два этапа. На первом этапе аппроксимировалась форма распределения инвариантных масс системы $J/\psi K^+ K^-$ по событиям Монте-Карло. В качестве аппроксимирующей функции применялась модифицированная функция Гаусса, называемая Double-Sided Crystal Ball (DSCB) по названию эксперимента, в котором она была впервые имплементирована. Из аппроксимации сигнальных событий Монте-Карло извлекались параметры DSCB, которые были таким образом зафиксированы во время второго этапа, включающего аппроксимацию аналогичного распределения инвариантных масс событий экспериментальных данных. Именно на втором этапе определялось число сигнальных событий в экспериментальных заходах (также определялись другие параметры, характеризующие, например, спектр фона, который описывался экспоненциальной функцией). Примеры результатов аппроксимации показаны на рисунке 8.

Было проведено сравнение дважды дифференциального сечения рождения B_s^0 мезона в пяти разных бинах по быстроте в зависимости от поперечного импульса p_T . Проинтегрированная по быстроте, данная зависимость принимает вид, показанный на рисунке 9. Если проинтегрировать двойное дифференциальное сечение по p_T , то зависимость становится следующей – рис. 10.

На основании представленных данных можно предварительно судить о статистической несогласованности результатов для 7 ТэВ, полученных в предыдущем и настоящем анализе. Отношение дифференциальных сечений при 8 ТэВ и 7 ТэВ показано на рисунках 11 и 12. Как обсуждалось в самом начале, отношение дифференциальных (по dy) сечений рождения адронов, образующихся в протон-протонных столкновениях, не может убывать при возрастании y (если в числителе дроби находится сечение при большей энергии). Такая картина слабо согласуется с наблюдаемыми экспериментальными результатами. Проблема состоит в том, что данные несоответствия наблюдаются не только в B мезонах, но также в случае Υ -мезонов (JHEP11 (2015) 103) и Λ -бариона (Chin. Phys. C40 (2016) 011001).

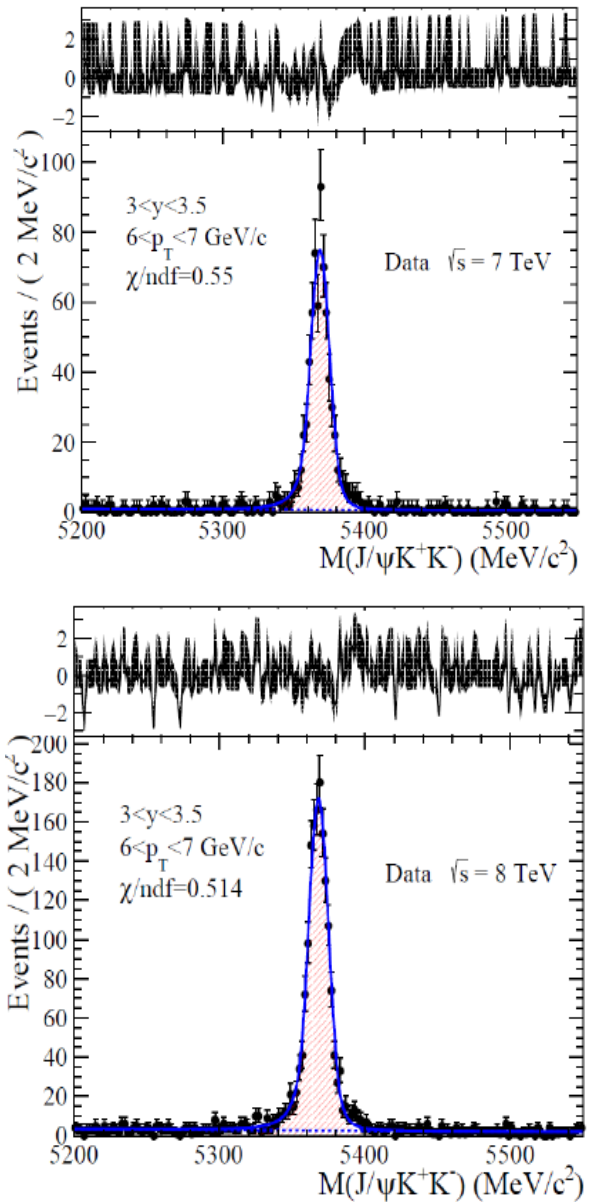


Рисунок 8. Результаты аппроксимации экспериментальных данных в одном из бинов.

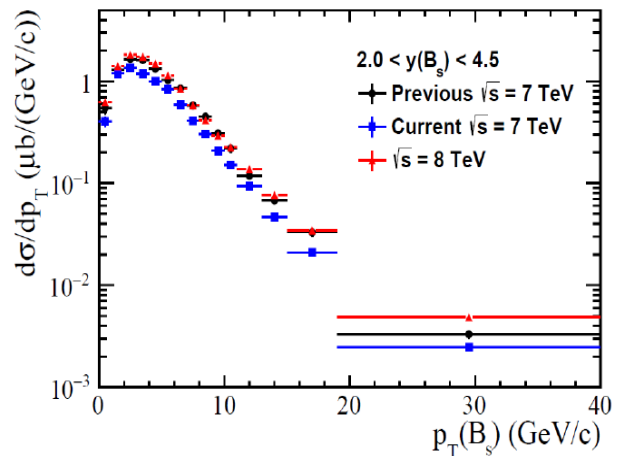


Рисунок 9. Дифференциальное (по p_T) сечение рождения B_s^0 мезона.

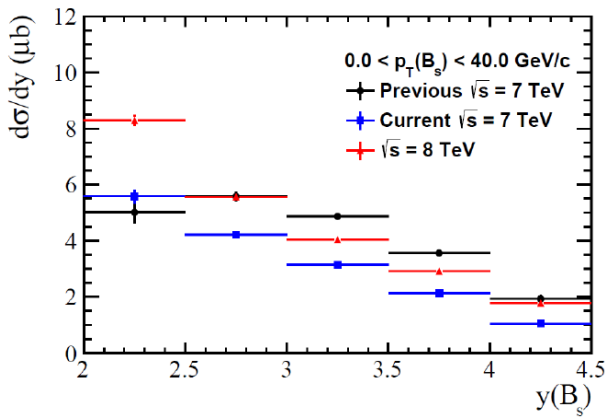


Рисунок 10. Дифференциальное (по dy) сечение рождения B_s^0 мезона.

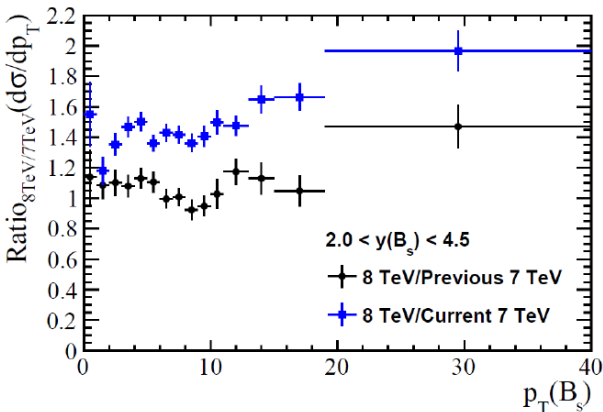


Рисунок 11. Отношение дифференциальных (по dp_T) сечений в анализах.

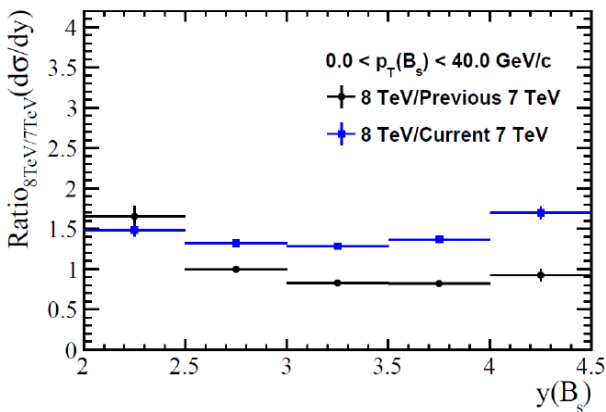


Рисунок 12. Отношение дифференциальных (по dy) сечений в анализах.

Возвращаясь к вопросу о полном сечении рождения B_s^0 мезона в рассматриваемой кинематической области, группой ЛHCb ИЯФ СО РАН были получены следующие предварительные результаты:

$$\sigma\left(B_s^0, 0 < p_T < 40 \frac{\text{GeV}}{c}, 2.0 < y < 4.5, \sqrt{s} = 7 \text{TeV}, 1 \text{fb}^{-1}\right) = 8.1 \pm 0.1(\text{stat.}) \mu\text{b}$$

$$\sigma\left(B_s^0, 0 < p_T < 40 \frac{\text{GeV}}{c}, 2.0 < y < 4.5, \sqrt{s} = 8 \text{TeV}, 2 \text{fb}^{-1}\right) = 11.3 \pm 0.1(\text{stat.}) \mu\text{b}$$

Предыдущее значение при 7 ТэВ (опубликованное в JHEP 08 (2013) 117)

$$\sigma\left(B_s^0, 0 < p_T < 40 \frac{\text{GeV}}{c}, 2.0 < y < 4.5, \sqrt{s} = 7 \text{TeV}, 0.36 \text{fb}^{-1}\right) = 10.5 \pm 0.2(\text{stat.}) \mu\text{b}$$

статистически не согласуется с полученным в данном анализе значением, что указывает на необходимость дополнительных проверок.

4. Разработка программного обеспечения для амплитудного анализа трех- и многочастичных распадов, амплитудный анализ распадов $\Lambda_b^- \rightarrow D^0 p \pi^-$ и $\Lambda_b^- \rightarrow D^0 p K^-$ с целью измерения угла γ треугольника унитарности

В настоящий момент на LHCb доступна для анализа интегральная светимость 3fb^{-1} . Этого достаточно для первых измерений угла γ . Основной используемый процесс $B^- \rightarrow D^0 K^-$, с распадом D мезона как в конечные состояния с ароматом, такие как $K^- \pi^+$, CP-собственные состояния, $K^+ K^-$ и $\pi^+ \pi^-$, так и трех- и многочастичные распады: $K_S^0 \pi^+ \pi^-$, $K_3 \pi$. Аналогично угол γ можно измерять и в распадах нейтрального B-мезона, таких $B^0 \rightarrow D^0 K \pi$, а также в распадах b-бариона $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p K^-$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 \Lambda^0$. Особенностью этих распадов является то, что ожидаемая в них величина CP-асимметрии в несколько раз больше, чем в $B \rightarrow D K$. Хотя вероятность этих распадов значительно меньше, ожидаемая точность измерения γ может оказаться вполне конкурентоспособной.

Распад $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 \Lambda^0$, пока не обнаружен экспериментально. Первым шагом является наблюдение этого распада, измерение его вероятности и оценка точности измерения γ , которую он может обеспечить. Другую возможность предоставляет распад $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p K^-$, который, аналогично распаду $B \rightarrow D K \pi$, может обеспечить преимущество перед двухчастичным распадом $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 \Lambda^0$. В 2016 был проведен поиск, измерение вероятностей распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 \Lambda^0$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p K^-$, а также амплитудный анализ распада $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p K^-$.

Выполнен амплитудный анализ распада $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p K^-$ (рис 13а). В процессе анализа возникли сложности с описанием широкой компоненты амплитуды вблизи кинематического порога рождения $D^0 p$ (см. рис. 13б). Это потребовало дополнительных исследований с использованием модельно-независимых методов описания амплитуды. В результате было показано, что широкая структура вблизи порога является резонансным вкладом со спином $3/2$ и положительной четностью, в смеси с нерезонансной компонентой со спином $1/2$ (рис. 13с). Это первое наблюдение подобного резонансного

вклада в канале $D^0 p$. В 2016 году появились теоретические работы, предсказывающие существование возбужденного состояния Λ_c с квантовыми числами $3/2$, которое представляет собой D-волновое орбитальное возбуждение в системе с-кварка и легкого дикварка ud . Кроме того, в анализе впервые получены ограничения на $\Lambda_c^+(2940)$. Со значимостью около 4 стандартных отклонений состояние $\Lambda_c^+(2940)$ имеет квантовые числа $J^P=3/2^-$. Эти значения говорят в пользу экзотического описания $\Lambda_c^+(2940)$ как $D^* N$ молекулы.

Анализ распада $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$ в данный момент прошел этап внутреннего рецензирования в коллаборации LHCb; подготовлена статья для журнала JHEP, которая будет подана в журнал после одобрения текста в коллаборации в январе 2017 года.

Для использования в анализе $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$ разработан и опубликован новый метод оценки многомерной плотности вероятности случайного распределения по заданной ограниченной выборке. Этот метод применяется как для вычисления профиля эффективности регистрации и фоновых событий в фазовом объеме распада $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$, так и для значительного числа других анализов в эксперименте LHCb.

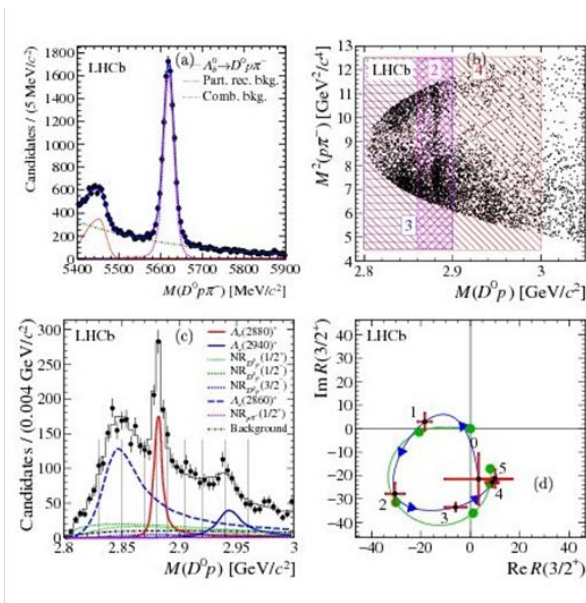


Рисунок 13. Распределение инвариантных масс комбинаций $D^0 p \pi^-$ и его подгонка с учетом сигнального пика $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$ и фоновых событий (a). Распределение Далица для распада $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$ (b), и его проекция на ось $M(D^0 p)$ (c) с показанными вкладами различных резонансов и нерезонансных компонент в канале $D^0 p$, полученными в результате подгонки амплитуды. Диаграмма Арганда (d), показывающая вращение комплексной фазы в

волне $3/2$ в канале $D^0 p$ (синяя кривая результат модельно-независимого описания при помощи сплайн-интерполяции, точки с ошибками подогнанные значения амплитуды в узлах сплайна, зеленая окружность подгонка амплитудой Брейта-Вигнера).

5. Поиск новых экзотических состояний и анализ пентакварков, обнаруженных в распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$

Проведен амплитудный анализ распада $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$. Для описания распада требуются как обычные резонансные состояния в $p \pi^-$, так и экзотические в $J/\psi p$ и $J/\psi p \pi^-$. Описание экспериментальных данных значительно улучшается при включении или двух пентакварков: $P_c^+(4380)$ и $P_c^+(4450)$, или тетракварка $Z_c^+(4200)$. Статистическая значимость всех трех экзотических состояний составляет 3.1σ . Сечение рождения пентакварков $P_c^+(4380)$ и $P_c^+(4450)$ не противоречит ранее измеренным сечениям в $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$, учитывая Кабиббо подавление и систематические и статистические неопределенности. Если исключить $Z_c^+(4200)$, то статистическая значимость обоих тетракварков 3.3σ .

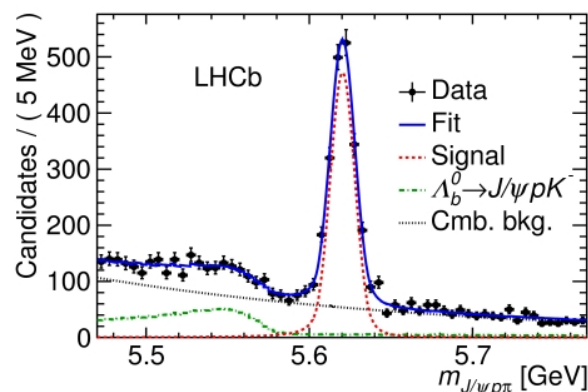


Рисунок 14. Инвариантная масса отобранных событий $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$.

6. Дальнейшая разработка и тестирование прототипов блоков электроники для модернизации детекторов ATLAS и LHCb для их работы в условиях высокой светимости

В рамках изготовления и тестирования прототипов новой электроники для модернизации триггерных каналов жидкоаргонового калориметра детектора ATLAS группа ИЯФ отвечает за разработку блоков Динамического Мультиплексора и Выходного Сумматора для модулей LATOME

(LAr Trigger processing MEzzanine), которые являются связующим звеном между платами цифровой обработки триггерных сигналов LTDB (LAr Trigger Digitizer Board) и различными модулями экстракторов признаков события (Feature Extractors) для триггерной системы первого уровня L1Calo.

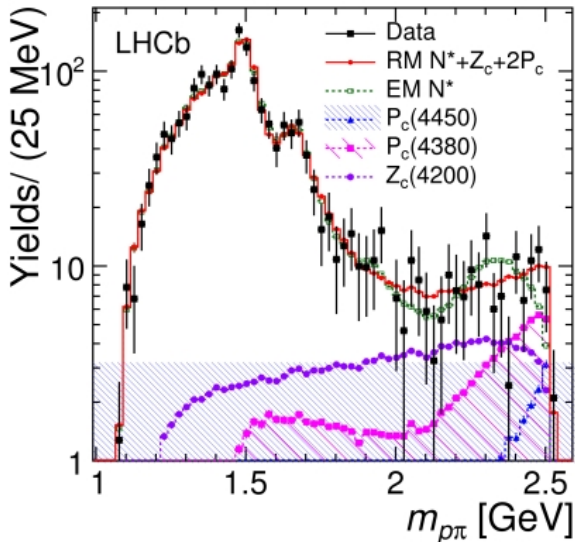


Рисунок 15. Инвариантная масса рп. Фон статистически вычтен, показана аппроксимация только с обычными состояниями и с включением экзотических состояний.

В 2016 г. специалистами ИЯФ были выполнены следующие работы по разработке FPGA дизайна для модулей LATOME:

- Реорганизация распределения супер-ячеек триггерных башен калориметра по информационным потокам, что позволило значительно уменьшить время обработки сигналов
- Реализация блока формирования пакетов выходных данных для интерфейса экстрактора признаков адронных струй jFEX триггерной системы L1Calo
- Адаптация для системы медленного контроля карты регистров модуля Динамического Мультиплектора
- Реализация блока формирования пакетов выходных данных для интерфейса экстрактора глобальных признаков события gFEX триггерной системы L1Calo

Также проводились работы по аргрейду системы сбора данных детектора LHCb. Данные, полученные с калориметров HCal и Ecal, используются в качестве аргументов триггера L0. Параметры калориметра в большой степени зависят от напряжений и токов,

выставленных на фотоумножителях (PMT), управляемых через подсистему медленного контроля. Аппаратная часть существующей системы медленного контроля выполнена по устаревшей на данный момент технологии SPECS. Система SPECS используется не только в подсистеме калориметра, но и вообще во всем эксперименте. Поэтому, было решено централизованно переходить с устаревшей системы на новую, разработанную в ЦЕРНе, технологию GBT. Проект GBT является частью проекта радиационно-стойкого двунаправленного оптического линка (Versatile Link) для использования в программе апгрейда LHC. Разработанный в ЦЕРНе комплекс интегральных схем GBT будет использоваться в модернизированной фронт-энд электронике LHCb для передачи команд медленного и быстрого управления (fast and slow control). Переход на GBT планируется завершить в 2018 году.

В рамках программы модернизации калориметра LHCb, в 2015 и 2016 годах проводились проектирование и исследования по возможности замены используемого в данный момент оборудования медленного контроля на основе протокола SPECS на новую электронику, сделанную на основе элементной базы GBT. Проект печатной платы используемого адаптера SPECS был импортирован в среду разработки Altium Designer для разработки новой платы с чипом медленного контроля GBT-SCA и возможностью сохранения обратной совместимости. Также исследовалась возможность реализовать протокол коммуникации GBT в FPGA, установленных в адаптерах SPECS для постепенного перехода систем калориметра на GBT. Результаты моделирования проекта ПЛИС показали сложность осуществимости этого подхода: удалось имплементировать протокол E-Link из стандарта GBT в FPGA, установленных на адаптерах SPECS, однако, результирующий проект не уместится в аппаратные ресурсы FPGA, используемой в настоящих адаптерах SPECS.

В 2016 году группой экспертов калориметра был собран тестовый стенд miniDAQ, который предназначен для работы с GBT, ведутся работы по переносу используемого сейчас программного обеспечения медленного контроля на новую платформу. Результатом данной работы должно быть установка набора коммутаторов GBT на калориметр и запуск новых модулей

используемой в CERNе SCADA-системы WINCC (называемая ранее PVSS).

7. Продолжение работ по модернизации оборудования и программного обеспечения BINP/GRID кластера

В 2016 году продолжено развитие вычислительного кластера BINP/GCF.

- 1) Внутренняя сеть передачи данных полностью переведена на технологию 10GbE.
- 2) Увеличен до 20 Тб (примерно в два раза) объём хранилища данных на базе распределённой файловой системы CEPH. Начата замена физически устаревших серверов хранения на современные.
- 3) Завершён перевод служебных серверов на операционную систему Scientific Linux 7.

На базе BINP/GCF с использованием локальных вычислительных ресурсов и доступных через суперкомпьютерную сеть Нововисбирского научного центра ресурсов ИВЦ НГУ и ССКЦ (ИБММГ СО РАН) постоянно развёрнуты динамические виртуализованные вычислительные кластеры, обслуживающие экспериментальные группы ИЯФ.

Основными потребителями ресурсов BINP/GCF в 2016 году стали:

- 1) Группы Belle2 и LHCb (вклад кластера BINP/GCF в вычисления эксперимента Belle2 составил более 2%).
- 2) Локальные эксперименты КЕДР, КМД-3, СНД.
- 3) Группа ATLAS.
- 4) Физика плазмы.

8. Развитие информационной системы распределенной обработки данных GRID эксперимента АТЛАС. Адаптация информационной модели системы AGIS к новым функциональным требованиям вычислительной инфраструктуры детектора АТЛАС

Одной из важнейших задач при проведении любого современного эксперимента в области физики высоких энергий является интеграция информационных и вычислительных ресурсов с целью их эффективного использования для обработки и хранения экспериментальных данных. Компьютерная инфраструктура эксперимента АТЛАС ускорительного комплекса Большого Адронного Коллайдера (LHC, CERN, Switzerland) использует технологию

географически распределенных параллельных вычислений (грид-вычисления или грид-сети). В рамках программы развития и расширения распределенной системы обработки эксперимента происходит развитие и обновление информационного обеспечения Грид сети эксперимента – информационной системы AGIS (ATLAS Grid Information System, <http://atlas-agis.cern.ch>), непосредственно описывающую вычислительные ресурсы эксперимента и компьютерную модель в целом.

Информационная система AGIS представляет собой совокупность технического и программного обеспечения, отвечающего за централизованное хранение описания топологии сети, вычислительных ресурсов, их всевозможных конфигурационных параметров, статических и динамических данных, необходимых для настройки, управления и функционирования всех систем и сервисов распределенной грид-сети эксперимента.

Одной из ключевых особенностей системы AGIS является её внутренняя реализация информационной модели вычислительных ресурсов. Таким образом AGIS скрывает разнородность компьютерной инфраструктуры эксперимента, предоставляя пользователю единое описание топологии вычислительных ресурсов АТЛАС сайтов. Данный этап работ был посвящен развитию информационной модели, модернизации пользовательского интерфейса управления (WebUI) и обновлению программного интерфейса (API) для расширения возможностей системы и предоставления функционала пакетного обновления данных.

В рамках данного этапа работ было также произведено обновление API интерфейса, и реализован пакетный функционал (с использованием JSON структур данных) для модификации свойств объектов PandaQueue, DDMEndpoint, а также моделей подсистем, позволяющих временно исключить ресурс из производства в связи с поломкой или плановым простоем (DDM, PanDA blacklisting system)

В рамках работы по развитию системы AGIS было также произведено обновление информационной модели системы и используемых пользовательских структур данных. Развитие структуры данных затронуло как внедрение новых информационных объектов в систему, так и расширение уже существующих. Особое внимание уделялось вопросам реорганизации ядра информационной модели системы для дальнейшего развития системы и расширения области применимости продукта AGIS за пределы эксперимента

АТЛАС, как информационной грид системы для других экспериментов LHC.

Другим примером по развитию информационной модели системы AGIS и её адаптации к новым функциональным требованиям коллаборации АТЛАС может служить блок работ по реструктуризации объектов моделей вычислительных ресурсов, выполненный в рамках глобальной кампании консолидации описания компьютерных ресурсов в системе AGIS, а также актуальной задачи развития и миграции программного обеспечения системы PanDA Pilot на новую версию. Были разработаны и интегрированы в общую информационную модель системы AGIS новые структуры данных для описания настроек модулей SiteMovers передачи данных в системе PanDA Pilot (PilotCopyTool, PilotActivityProcols и др.). Пользовательский WebUI интерфейс был также расширен функционалом мониторинга прохождения задач, необходимого для успешного завершения кампании миграции модулей sitemovers на новую версию в системе PanDA Pilot. В рамках данного этапа работ в системе AGIS были разработаны специальные страницы отображения данных мониторинга в графическом виде для каждого вычислительного ресурса PandaQueue. Страницы мониторинга задач включают в себя интегрированные графики выполнения заданий в сети грид от времени, и позволяют отслеживать работоспособность новой реализации модулей SiteMovers по сравнению с предыдущей версией. Система мониторинга позволяет отображать отдельно графики для тестовых заданий (HammerCloud jobs) и непосредственно пользовательских задач анализа данных в эксперименте (production and analysis jobs). Для удобства анализа ситуации страницы мониторинга содержат ссылки на другие ресурсы контроля для данного сайта, такие как монитор выполнения задач в системе PandDA, исходные графические представления в системе Kibana. Для реализации страниц мониторинга активно использовались инструменты JQuery и технология AJAX для интеграции рисунков и динамической подгрузки данных.

На рисунке 16 отображен пример разработанного функционала страниц мониторинга в системе AGIS. На рисунке отчетливо виден момент переключения сайта (миграция) на использование новой реализации модулей SiteMovers в системе PanDA Pilot. Следует отметить, что разработкой новой версии модулей SiteMovers, а также централизованным переводом (миграцией) грид

сайтов эксперимента АТЛАС на новую архитектуру модулей SiteMovers в системе PanDA Pilot также занимались и осуществили специалисты ИЯФ.

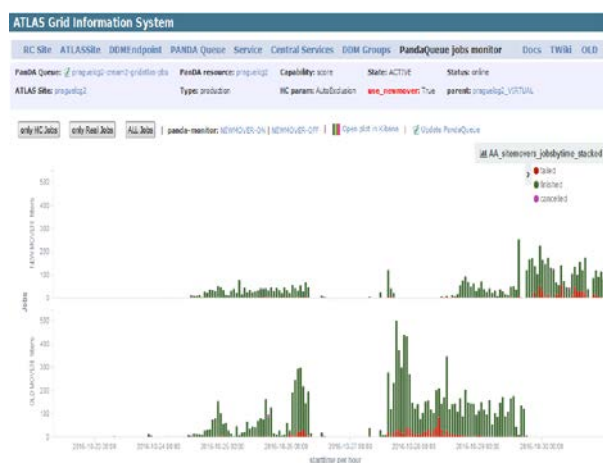


Рисунок 16. Пример страницы мониторинга прохождения задач в системе AGIS для сайта prague1cg2. Момент миграции сайта на новую версию PanDA Pilot с использованием нового модуля site movers. Верхний график отражает мониторинг задач с обновленной программой Pilot, в то время как нижний график описывает статистику для старой версии.

Все разработанные расширения и обновления информационной модели AGIS, модули и инструментарий по пакетному обновлению данных были успешно интегрированы в API и WebUI интерфейсы. Обновленное матобеспечение установлено на сервера кластера AGIS и на сегодняшний день успешно используется в производстве эксперимента АТЛАС. Команда разработчиков осуществляет постоянную поддержку и сопровождение системы AGIS для коллаборации АТЛАС.

Заключение

Все пункты плана работ на 2016 и предыдущие годы выполнены. Была обеспечена высокая (более 92 %) эффективность набора данных в новом сезоне при рекордной энергии 13 ТэВ и их высокое качество. Ведётся анализ данных, получен и опубликован ряд важных результатов.

Полученный в ходе работы научный и научно-технический задел имеет высокую значимость как для продолжения фундаментальных научных исследований, так и для практического использования полученных результатов.

Список использованных источников

- [1] D. Bruß, O. Nachtmann, P. Overmann // “CP violation in radiative Z decays” arXiv:9703216 [hep-ph].
- [2] OPAL Collab. D.P. Acton, et al. Phys. Lett. B273 338-354 (1991).
- [3] ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade. Technical Design Report. ATLAS-TDR-022-2013.
- [4] ATLAS LAr Calorimeter trigger electronics phase I upgrade: AMC Firmware Specifications ATLAS internal note ATL-COM-LARG-2016-020 <https://cds.cern.ch/record/2154258>.
- [5] LAr LATOME Board Status update https://indico.cern.ch/event/570296/contributions/2306721/attachments/1342390/2022288/ATLASLar_LAPP_2016_0926_LATOME_HW.pdf
- [6] LAr LATOME Firmware Status update https://indico.cern.ch/event/570296/contributions/2306723/attachments/1342471/2023676/2016-09-26.LAr-LATOME-FW.LAr_week.pdf
- [7] «AGIS: Integration of new technologies used in ATLAS Distributed Computing», Anisenkov, A. Di Girolamo, M. Alandes, (on behalf of the ATLAS Collaboration), to be submitted in Journal of Physics: Conference Series, 22th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2016), 10–14 October 2016, San Francisco, USA.
- [8] AGIS WebUI, веб портал пользовательского интерфейса управления – <http://atlas-agis.cern.ch>.

№ 15.1.3 Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах и редких распадах

Введение

В этом проекте объединён ряд работ, проводимых физиками ИЯФ СО РАН, целью которых является проверка Стандартной Модели (СМ) — современной теории взаимодействий элементарных частиц, а также поиск явлений, выходящих за её пределы. В проект включены эксперименты, проводимые или планируемые на установках со встречными электрон-позитронными пучками, а также ряд других работ.

В проект входят эксперименты на e^+e^- коллайдерах, работающих в ИЯФ СО РАН и за рубежом, в области энергий в системе центра масс до 12 ГэВ. Электрон-позитронная аннигиляция в адроны в этой области энергий уже несколько десятилетий активно изучается экспериментаторами и теоретиками, в частности потому, что в ней находятся семейства частиц, содержащих тяжёлые c - и b -кварки, для которых возможны расчёты в рамках квантовой хромодинамики.

В проект также входит проверка СМ на ускорителях – эксперимент MEG в PSI (Paul Scherrer Institute, Швейцария), в котором ведётся поиск нарушающего закон сохранения лептонного числа распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, и эксперимент по прецизионному измерению величины $g-2$ в FNAL (Fermi National Laboratory, США).

В 2013 году в ИЯФ СО РАН был предложен проект e^+e^- коллайдера на высокую светимость – Супер Чарм-Тау фабрики. Одной из основных экспериментальных задач этого коллайдера является поиск распада $\tau \rightarrow \mu \gamma$, нарушающего закон сохранения лептонного числа. Для детектора на Супер Чарм-Тау фабрике данный проект включает разработку системы идентификации частиц на основе аэрогелевых черенковских счётчиков.

Также данный проект включает разработку двухфазных криогенных лавинных детекторов, которые планируется использовать в экспериментах по поиску тёмной материи. Одними из основных кандидатов на роль частиц тёмной материи являются так называемые ВИМПы (WIMP - Weakly Interacting Massive Particle), которые предсказываются теориями, выходящими за рамки СМ. Их планируется регистрировать в лабораториях в детекторах ядер отдачи предельно низкой энергии.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В рамках данного проекта был проведён большой объём экспериментальных исследований на электрон-позитронных коллайдерах, в которых изучались различные реакции, идущие в столкновениях пучков, а полученные данные сравнивались с теоретическими расчётами в рамках Стандартной Модели.

В ИЯФ СО РАН детектором КЕДР на ВЭПП-4М была измерена с лучшей в мире точностью величина сечения e^+e^- аннигиляции в адроны в диапазоне энергий 3.12-3.72 ГэВ в системе центра масс.

В ИФВЭ (Китай) на e^+e^- коллайдере BEPC-II детектором BES-III был набран рекордный интеграл светимости 2 обратных фемтобарн в области энергий 2-3 ГэВ в системе центра масс. Получен предварительный результат по измерению относительной вероятности распада $J/\psi \rightarrow K+K^-$ посредством анализа процесса $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$. Измерено отношение вероятностей распада $J/\psi \rightarrow K+K^-$ к $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$. Сейчас ведётся анализ систематических ошибок измерения. Завершён анализ распадов $J/\psi \rightarrow \gamma 2K_s$, η , ϕ , $\pi^0 f_0(980)$, $\phi \pi^0$, $\eta \phi$, $\pi^+\pi^-$, p и \bar{p} $a_0(980)$. Проведен запуск модернизированной системы измерения энергии пучка BEPC-II методом обратного комптоновского рассеяния.

Группой сотрудников ИЯФ, участвующих в эксперименте Belle (Япония), выполнен большой объём работ по обработке набранных ранее данных, получено большое количество новых интересных результатов. Активно велись работы по модернизации детектора.

Выполнялся анализ данных эксперимента BaBar (США) с целью измерения параметра Стандартной модели $|V_{ub}|$. Результаты измерения $|V_{ub}|$ показаны на рис. 1.1, где точки представляют результаты обработки экспериментальных данных с использованием различных теоретических моделей. Данное измерение является одним из лучших по точности.

В эксперименте MEG в PSI (Швейцария) по части набранной в 2009-2013 годах статистики был получен лучший в мире предел на вероятность нарушающего закон сохранения лептонного числа распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ и была начата обработка всей статистики. С 2013 года проводилась модернизация детектора MEG. Инженерный заход с модернизированным детектором MEG2 планируется провести в ближайшее время.

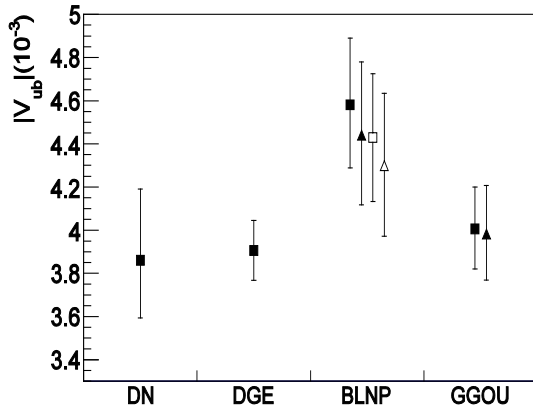


Рисунок 1.1. Величина $|V_{ub}|$, полученная в результате обработки экспериментальных данных с использованием различных теоретических моделей.

2. Завершение набора статистики в пике J/ψ -мезона. Анализ экспериментальных данных, набранных в области энергии J/ψ -мезона, измерение вероятностей радиационных распадов J/ψ -мезона на детекторе КЕДР коллайдера ВЭПП-4М

2.1. Завершение набора статистики в пике J/ψ -мезона.

В 2015-2016 гг. на детекторе КЕДР, работающем на ускорительном комплексе ВЭПП-4М, набрана статистика 1,3 обратных пикобарна в пике J/ψ -мезона и 0,2 обратных пикобарна вблизи пика для оценки пучкового фона и фона нерезонансной подложки. Записаны вспомогательные заходы для калибровок систем детектора, определения эффективности триггера и уровня наводок.

2.2. Анализ экспериментальных данных, набранных в области энергии J/ψ -мезона.

В 2016 году был продолжен анализ данных сканирования J/ψ -резонанса 2005 года. Набор производился в 11 точках по энергии, интегральная светимость составила 230 обратных нанобарн, эти данные содержат приблизительно 250 тыс. распадов J/ψ -мезона. Для анализа отбирались распады J/ψ на адроны и электроны. События $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ использовались для вычисления светимости. Наблюдаемое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow hadron$ приведено на рис. 2.1.

Был получен следующий результат для произведения лептонной ширины на вероятность распада в адроны для J/ψ -мезона:

$$\Gamma_{ee} \times B_h(J/\psi) = 4,842 \pm 0,038 \text{ (стат.)} \pm 0,102 \text{ (сист.) кэВ}$$

С использованием мирового среднего значения $B_h(J/\psi) = 0,877 \pm 0,005$ была вычислена электронная ширина J/ψ -мезона:

$$\Gamma_{ee}(J/\psi) = 5,521 \pm 0,128 \text{ кэВ.}$$

Полученный результат для $\Gamma_{ee} \times B_h(J/\psi)$ согласуется с результатами других измерений и имеет лучшую точность, лептонная ширина $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ получена с точностью, сравнимой с общемировой. Эта работа подготовлена для опубликования.

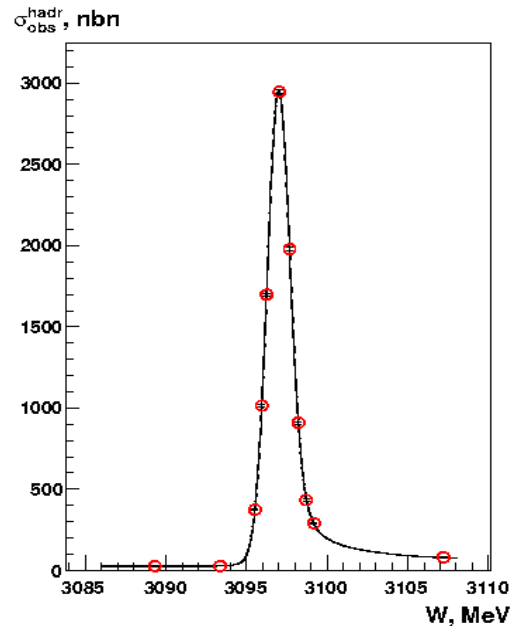


Рисунок 2.1. Сечение рождения адронов в области J/ψ -мезона в зависимости от энергии в системе центра масс.

2.3. Измерение вероятностей радиационных распадов J/ψ -мезона на детекторе КЕДР коллайдера ВЭПП-4М.

В 2016 году была продолжена обработка данных с целью измерения относительных вероятностей распадов $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$, $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$, $J/\psi \rightarrow \gamma K^+K^-$, $J/\psi \rightarrow \gamma p pbar$. Набранный детектором КЕДР в 2014-2016 годах статистика распадов J/ψ -мезона составляет около 5 миллионов событий. По части экспериментальной статистики отобраны кандидаты в распады $J/\psi \rightarrow \gamma h^+ h^-$. Разработаны программы моделирования соответствующих распадов J/ψ -мезона и набрана значительно большая, чем ожидается в эксперименте, статистика моделированных событий. Доработан пакет реконструкции хитов в аэрогелевых черенковских счетчиках для экспериментальных событий.

3. Набор статистики на $\psi(3770)$ для измерения масс D-мезонов на детекторе КЕДР коллайдера ВЭПП-4М

В 2016 году в эксперименте по измерению масс D-мезонов на детекторе КЕДР был набран интеграл светимости 1072,9 обратных нанобарн, что составляет 20% от необходимого для получения значимого результата. В 2017 году данный эксперимент будет продолжен.

4. Проверка Стандартной модели на коллайдере ВЭПП-2000. Экспериментальное исследование процессов $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

При обработке данных, набранных в экспериментах на коллайдере ВЭПП-2000 с детектором СНД, процессы электрон-позитронной аннигиляции $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ использовались для измерения интегральной светимости. Интегральная светимость – коэффициент пропорциональности между количеством зарегистрированных событий и сечением изучаемого процесса. Поэтому она измеряется с помощью процессов с хорошо известными сечениями. Сечения процессов, перечисленных выше, могут быть рассчитаны в рамках квантовой электродинамики с точностью лучше 1%. Отношение светимостей, измеренных по процессам электрон-позитронной аннигиляции в электрон-позитронную пару и пару гамма-квантов, совпадает с единицей с точностью лучше 1%.

5. Набор экспериментальных данных с детектором BES-III в области энергии от 2 до 3 ГэВ в системе центра масс для измерения полного сечения e^+e^- аннигиляции в адроны и изучения резонансных состояний. Анализ экспериментальных данных по распадам мезонов со скрытым чармом

В эксперименте с детектором BESIII на электрон-позитронном коллайдере BEPC-II были набраны данные с интегралом светимости около 2 обратных фемтобарн в области энергии от 2 до 3 ГэВ в системе центра масс для измерения полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны и изучения состояния $Y(2175)$. Также набрано около 3 обратных фемтобарн в области энергии выше 4 ГэВ для изучения физики D^* .

Продолжалось изучение распадов J/ψ -мезона по данным, набранным на BESIII в предыдущих экспериментах. В частности, впервые наблюдался распад $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^0$, методом ра-

диационного возврата с высокой точностью измерена ширина распада J/ψ на пару мюонов. Также был исследован распад $\psi(3770) \rightarrow \gamma\chi_{c0}$. Сравнение измеренной относительной вероятности распада с расчётами позволяет уточнить теоретические модели, используемые для описания распадов кварковых состояний со скрытым очарованием.

6. Модернизация электроники и программного обеспечения калориметра детектора Belle на коллайдере КЕКВ. Анализ экспериментальных данных эксперимента Belle: а) Изучение времени-зависимого Далицц распределения процесса $B \rightarrow h^0 D^0 (\rightarrow K_S \pi^+ \pi^-)$; б) Изучение сечения рождения $e^+e^- \rightarrow B(^*)B^*$; в) Изучение четырехчастичных распадов тау-лептона; г) Изучение распадов Ξ_c^+

6.1. Модернизация электроники и программного обеспечения калориметра.

В 2016 году крейты с электроникой торцевой части калориметра были подключены к системе сбора данных детектора Belle II. Разработано программное обеспечение для загрузки данных и установки параметров шейперов торцевого калориметра. Проведена проверка считывания данных с плат торцевого калориметра. В течение 2016 года проводилась электронная калибровка счётчиков цилиндрической части калориметра сигналом генератора, показавшая что электроника счётчиков обеспечивает стабильность амплитуды лучше 0,1 % и времени лучше 1 нс, как показано на рис. 6.1. По результатам калибровки были обнаружены и отремонтированы семь нестабильных счётчиков.

На детектор была установлена электроника системы запуска калориметра. С использованием этой системы был записан специальный заход, в котором наряду с амплитудой и временем счётчика записывались данные АЦП. По этим данным была реконструирована и аппроксимирована гладкой функцией форма сигнала каждого счётчика.

6.2. Изучение времени-зависимого Далицц распределения процесса $B \rightarrow h^0 D^0 (\rightarrow K_S \pi^+ \pi^-)$.

Завершен анализ времени-зависимых распределений Далица в распадах $B^0 \rightarrow D^0 h^0$, $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, где h^0 обозначает легкий нейтральный мезон. Для выполнения анализа использованы распады 771 миллионов пар B^0 $\text{anti-}B^0$ -мезонов, зарегистрированные в эксперименте Belle. Результатом анализа является измерение параметра SM – величины угла бета Треугольника Унитарности. Полученное значение равно

$11,7 \pm 7,8 \pm 2,1$ градусов. Данный результат является первым модельно-независимым измерением косинуса угла бета. Также данный результат является самым точным на данный момент измерением косинуса угла бета. Показано, что применённый в работе метод модельно-независимого анализа диаграмм Далица подходит для выполнения прецизионных измерений с данными эксперимента Belle II.

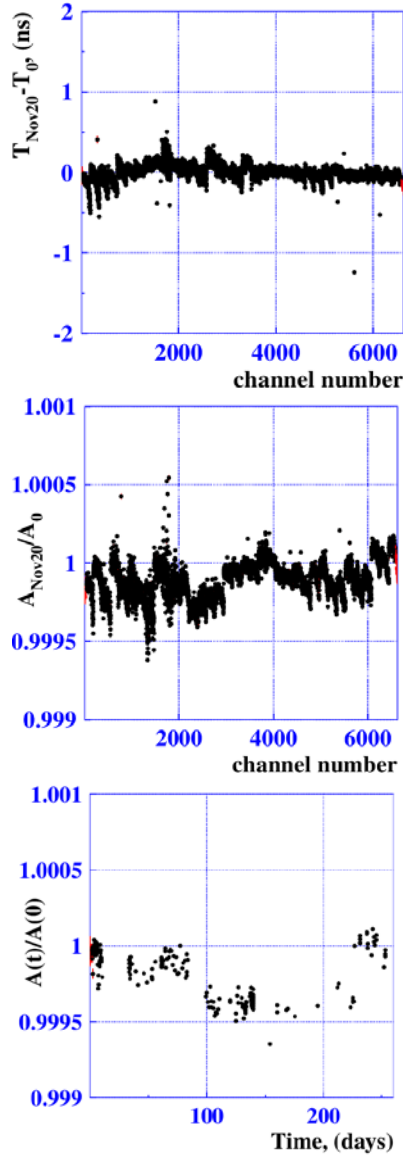


Рисунок 6.1. а) Разница времен и б) изменение амплитуды калибровочного импульса за девять месяцев. в) Зависимость амплитуды калибровочного импульса от времени.

6.3. Изучение сечения рождения $e^+e^- \rightarrow B(^*)B^*$.

Большой объем данных (более 120 обратных фемтобарн), полученных в области $\Upsilon(5S)$ -резонанса, что соответствует энергии 10,866 ГэВ в системе центра масс, позволил впервые измерить сечения e^+e^- аннигиляции в

трёхчастичные конечные состояния $BV^*\pi$ и $B^*B^*\pi$, а также существенно улучшить верхний предел (уровень значимости 90%) на сечение процесса $e^+e^- \rightarrow BV\pi$:

$$\begin{aligned} \sigma(e^+e^- \rightarrow [BV^*+c.c.]^\pm \pi^\mp) &= [17.4 \pm 1.6(\text{стат}) \pm 1.9(\text{сист})] \text{ пикобарн}; \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow [B^*V^*]^\pm \pi^\mp) &= [8.75 \pm 1.15(\text{стат}) \pm 1.04(\text{сист})] \text{ пикобарн}; \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow [BV]^\pm \pi^\mp) &< 2.9 \text{ пикобарн}. \end{aligned}$$

6.4. Изучение четырёхчастичных распадов τ -лептона.

Предыдущие измерения вероятностей распадов τ -лептона в три заряженных псевдоскалярных мезона (каоны и пионы в разных комбинациях) и нейтрино в экспериментах Belle и BaBar показывают значительное расхождение. Для конечного состояния с тремя каонами масштабный фактор полной ошибки измерения превышает 5. Это максимальное значение среди всех вероятностей распадов τ -лептона. Ведущая систематическая ошибка связана с идентификацией заряженных каонов и пионов. Нами был предложен и реализован способ мониторинга ошибки, связанной с идентификацией. С помощью этого способа было выявлено несколько источников систематической ошибки, которые не были учтены в предыдущих измерениях в эксперименте Belle. Независимое изучение пионной идентификации на распадах K_S -мезонов в пару заряженных пионов позволило уменьшить систематическую ошибку.

6.5. Изучение распадов Ξ_c^+

Абсолютное значение относительной вероятности распада странного очарованного бариона $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$ является важной величиной для физики тяжёлых кварков. На данный момент нет достоверного экспериментального измерения абсолютного значения относительной вероятности распадов Ξ_c^+ -бариона, измерены только вероятности распадов относительно некоторых мод, в основном, к искомой моде $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$. Используется модельно-независимая методика, разработанная для измерения абсолютного значения относительной вероятности распада $\Lambda_c^+ \rightarrow p K \pi$. Используются эксклюзивные процессы $e^+e^- \rightarrow \Xi_c^+ \Lambda D^{(*)-}$. Отношение числа $D^{(*)-}$ -мезонов в массе отдачи события к числу Ξ_c^+ -барионов в массе отдачи даёт искомый результат. Предварительный результат для относительной вероятности распада $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$ соответствует $(7.5^{+2.6}_{-2.0} \pm 0.5 \pm 0.4)\%$, где вторая систематическая ошибка связана с неопределённостью относительных вероятностей других распадов Ξ_c^+ .

7. Завершение эксперимента по измерению элемента V_{ub} матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава, публикация результата измерения

Описание этого измерения детектором BaBar было представлено в отчете ИЯФ за 2015 год. В 2016 году обработка эксперимента была завершена, итоговая статья послана в журнал Physical Review D и выложена в архив (J.P. Lees et al., arXiv:1611.05624).

Результаты измерения $|V_{ub}|$ представлены на рис. 7.1, где точки соответствуют обработке данных с использованием различных теоретических моделей. Точность данного измерения является одной из лучших.

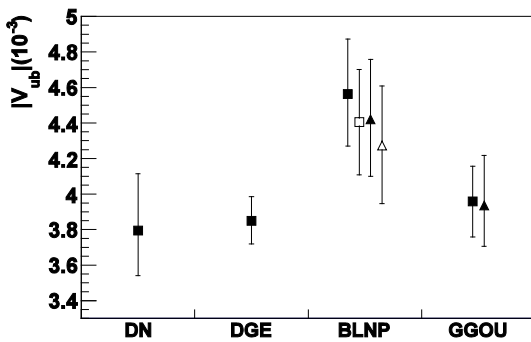


Рисунок 7.1. Результаты измерения $|V_{ub}|$ детектором BaBar, полученные при обработке данных с использованием различных теоретических моделей.

8. Завершение обработки данных 2009-2013 годов эксперимента MEG1 с целью уточнения существующего предела на величину вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$. Публикация финального результата по всем данным MEG1

Эксперимент MEG (PSI, Швейцария) нацелен на поиск возможного нарушения закона сохранения лептонного числа в безнейтринном распаде мюона в позитрон и гамма-квант. Набор данных с первой версией детектора происходил в 2009-2013 гг. В конце 2015 года - начале 2016 был закончен финальный анализ всех данных, который включает множество улучшений по сравнению с предыдущей публикацией на части статистики. В 2016 году был опубликован результат всей работы эксперимента MEG1. Поставлен новый верхний предел

$$B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4,2 \times 10^{-13} \text{ (90\% C.L.)},$$

который в 30 раз меньше предыдущего измерения детектором MEGA. Новый предел позво-

ляет значительно ограничить параметры моделей, предсказывающие данный распад за пределами Стандартной Модели. История измерения распадов мюона, нарушающих закон сохранения лептонного числа, приведена на рис. 8.1.

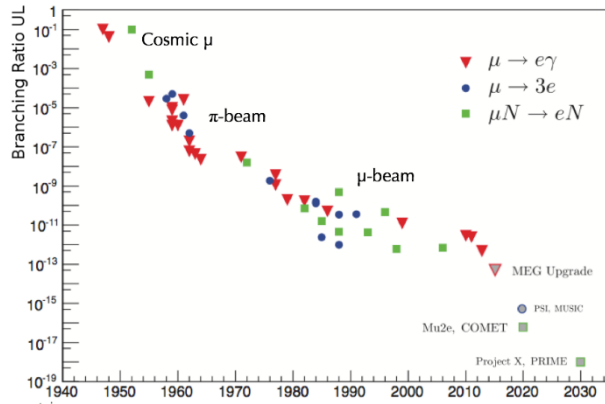


Рисунок 8.1. История измерения распадов мюона, нарушающих закон сохранения лептонного числа. Полученная и ожидаемая чувствительность на вероятность безнейтринного распада мюона в эксперименте MEG и MEG2.

9. Окончание полной сборки модернизированного детектора MEG2, проведение инженерного захода, начало набора данных

С 2013 года активно ведутся работы по полной модернизации всех систем детектора для следующей серии экспериментов с на порядок улучшенной чувствительностью (рис. 9.1). Новый эксперимент получил название MEG2. В 2016 году было продолжено изготовление новых подсистем детектора. Было проведено несколько пред-инженерных заходов на полной интенсивности мюонного пучка, с уже установленными частью компонентов. Основные вклады сотрудниками ИЯФ СО РАН были сделаны в оптимизацию системы транспортировки пучков на мишень, усовершенствование программ реконструкции треков в системе дрейфовых камер, разработку и тестирование электроники для активной мишени, разработку и испытание системы неразрушающего оптического измерения профиля пучка на основе ультратонкого сцинтиллятора с напыленным слоем CsI. В 2017 году планируется закончить сборку детектора и начать набирать экспериментальные данные.

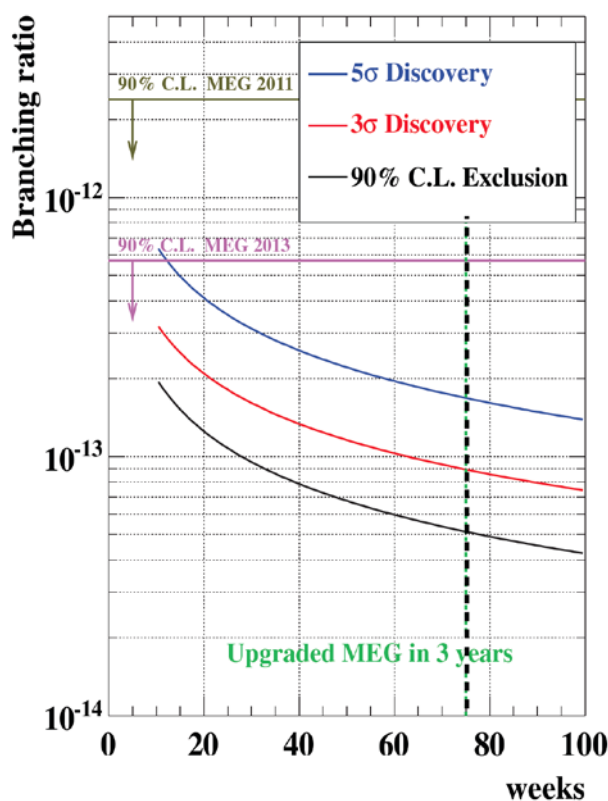


Рисунок 9.1. Проектная чувствительность эксперимента MEG2 после модернизации детектора.

10. Подготовка эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона $g-2$ в FNAL и сборка экспериментальной установки. Моделирование эксперимента и оценка систематических ошибок

В 2016 году была продолжена подготовка эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона в Фермилаб, в котором участвуют физики из ИЯФ СО РАН. Была завершена процедура шиммирования магнита мюонного накопительного кольца. Была достигнута однородность магнитного поля в 3 раза лучше, чем в предыдущем эксперименте в Брукхэйвской лаборатории. Однородность поля напрямую влияет на систематическую ошибку измерения среднего магнитного поля, наблюдаемого мюонами. Физики из ИЯФ принимали участие в этапах этой работы, занявшей около одного года, в частности, в выравнивании магнитного поля с помощью корректировки положения полюсов магнитов. В течение года шла активная подготовка детекторных элементов эксперимента. В настоящее время заканчивается установка всех элементов эксперимента на мюонное накопительное кольцо и начинаются работы по интеграции подсистем.

Группой физиков из ИЯФ разработаны элементы центрального интерфейса оператора

на основе современных веб-технологий. Интерфейс предоставляет доступ как для оператора, так и для других участников эксперимента, к разнообразной информации, производимой во время набора данных – например, к журналу заходов, текущим значениям и истории значений различных мониторирующих датчиков, к информации о качестве собираемых данных и т.п.

11. Набор статистики для измерения адронных сечений в диапазоне энергий в системе центра масс $2E=2.0-4.0$ ГэВ в условиях улучшенной светимости коллайдера ВЭПП-4

В 2016 году Инжекционный комплекс ИЯФ ВЭПП-5 начал в штатном режиме поставлять пучки двум потребителям – комплексам ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/ВЭПП-4. В конце декабря 2016 года первые пучки от Инжекционного Комплекса были захвачены в ВЭПП-4М. Набор статистики для измерения адронных сечений в диапазоне энергий в системе центра масс $2E=2.0-4.0$ ГэВ в условиях улучшенной светимости коллайдера ВЭПП-4 начнётся в 2017 году.

12. Подготовка детекторов и начало набора данных на модернизированном коллайдере ВЭПП-2000. Анализ полученных данных

В 2016 году на модернизированном комплексе ВЭПП-2000 с детекторами СНД и КМД-3 был проведен большой объем пуско-наладочных работ.

Были отлажены режимы работы канала транспортировки пучков электронов и позитронов из инжекционного комплекса ВЭПП-5 до бустерного накопителя БЭП. Получена высокая эффективность транспортировки и высокая скорость переключения при перестройке канала для работы с электронами или позитронами.

Произведена настройка оптики основного кольца ВЭПП-2000 на энергии около 1 ГэВ и достигнута проектная светимость 10^{31} $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ (на данных энергиях).

Была запущена система оперативного измерения энергии пучков с помощью регистрации событий обратного Комптоновского рассеяния с использованием двух лазеров с разной длиной волны.

В 2016 году был закончен ремонт СНД, детектор запущен в полном объеме. Подсистемы СНД были откалиброваны в специальных заходах с космическими мюонами. В декабре 2016 года детектор начал набор данных при энергии около 1 ГэВ в с.ц.м.

Детектор КМД-3 запущен в полном объеме, кроме мюонной системы и новой время-пролетной системы. Запуск этих систем должен закончиться в начале 2017 года. Набран большой объем статистики космических событий и светимости при энергии около 1 ГэВ в с.ц.м. Произведена первичная калибровка детектора.

13. Разработка двухфазных криогенных лавинных детекторов с электролюминесцентным зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица для экспериментов по поиску тёмной материи

В 2016 году была продолжена разработка двухфазных криогенных лавинных детекторов (КЛД) с электролюминесцентным (ЭЛ) зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица для экспериментов по поиску тёмной материи. На рис. 13.1 показана схема ЭЛ зазора и комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД-матрица в таком детекторе.

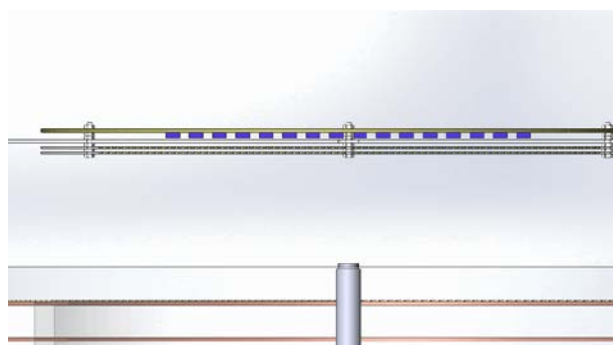


Рисунок 13.1. Схема ЭЛ зазора и комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД-матрица в двухфазном КЛД.

Прототип детектора имел объем 9 л. ЭЛ зазор имел толщину в газовой фазе 1,8 см; он был образован двумя пластинами ГЭУ с активной площадью 10x10 см². Для амплитудной информации использовался оптический (электролюминесцентный) сигнал в ЭЛ зазоре, который считывался с помощью сборки из четырёх компактных криогенных ФЭУ. Для координатной информации использовался сигнал с комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД-матрица.

Было начато изучение характеристик такого детектора. В частности, на рис. 13.2 показаны примеры всех трёх типов сигналов, которые индуцированы поглощением рентгеновских фотонов: оптического сигнала с ФЭУ, зарядового сигнала с ГЭУ и оптического сигнала с ГЛФД.

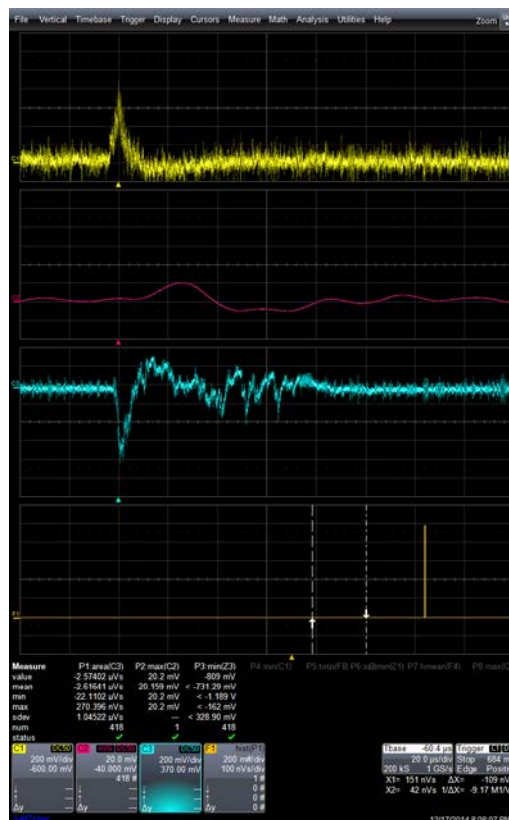


Рисунок 13.2. Пример трех типов сигналов, индуцированных поглощением рентгеновских фотонов в двухфазном КЛД с ЭЛ зазором и умножителем ГЭУ/ГЛФД: оптический сигнала с ФЭУ (верх), зарядовый сигнал с ГЭУ (середина) и оптического сигнала с ГЛФД (низ).

14. Проведение экспериментов с прототипами систем детектора для Супер Чарм-Тау фабрики. Продолжение работы над физической программой экспериментов на Супер Чарм-Тау фабрике с учетом новых данных с ЛНС, ВЭПП-4М, ВЭПП-2000, ВЕРС-II, нейтринных экспериментов. Выбор оптимальной стратегии поиска процесса $\tau \rightarrow \mu \gamma$, нарушающего закон сохранения лептонного числа

В 2016 году проведены 5 сеансов испытаний прототипа с фотодетектором DPC и разными образцами аэрогеля на выведенном электронном пучке на ускорителе ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН. В результате испытаний на пучке получены данные по радиусу черенковского кольца, разрешению по радиусу кольца и числу фотоэлектронов для образцов аэрогеля с различным качеством поверхности, из которой выходит черенковское излучение. Опробованный нами наилучший метод полировки выходной поверхности аэрогелевого радиатора шелком в 1,6 раза ухудшает разрешение по черенков-

скому углу, поэтому применение данного метода полировки ограничено. При обработке шкуркой выходная поверхность ухудшает разрешение по радиусу в 2,2 раза. При этом число фотоэлектронов в кольце для полированных поверхностей по сравнению с чистой поверхностью меньше на 5%. Результаты этих исследований доложены на двух конференциях и опубликованы в статье.

Проведены испытания на пучке однослойного блока аэрогеля с показателем преломления $n=1,05$ с неразрушающей блок трещиной. Существенного изменения радиуса кольца, как и разрешения по радиусу кольца, в области трещины не наблюдается, что указывает на то, что искажением изображения кольца, которое вносится трещиной в аэрогеле, можно пренебречь. Использование блоков аэрогеля с неразрушающей трещиной в детекторах позволит увеличить выход блоков аэрогеля при их производстве и уменьшить стоимость детектора. Ведётся также обработка данных испытаний с многослойными блоками аэрогеля, полученными в 2016 году.

15. Модернизация системы сбора данных детектора КЕДР для работы при высокой светимости на коллайдере ВЭПП-4

Разработан проект модернизации системы сбора данных (ССД) детектора КЕДР, позволяющий увеличить допустимый поток событий со 150 Гц до 500-600 Гц при сохранении существующей оцифровывающей электроники. При соответствующих условиях триггера такая пропускная способность позволит работать при суммарном токе пучков коллайдера ВЭПП-4М до 100 мА, ожидаемом на максимальной энергии ВЭПП-4М. В проекте используется опыт модернизации системы сбора данных детектора КМД и некоторые разработки, осуществлённые для этого проекта. На основе этих разработок подготовлен стенд для отладки аппаратных и программных элементов новой системы сбора данных, включающий три крейта системы КЛЮКВА с оцифровывающей электроникой, два крейта КАМАК с управляющей электроникой ССД (новый и старый вариант) и компьютерную стойку, содержащую шесть компьютеров, предназначенных для приема полного потока данных и отбраковки незначительной информации, и двухуровневую систему сетевых переключателей ETHERNET, осуществляющих связь этих компьютеров с процессорами вывода (ПВ) крейтов КЛЮКВЫ. Сжатые потоки данных направляются на основной сервер детектора КЕДР для предварительного отбора и записи событий. С использованием блоков ССД

детектора КМД (МЧС, модуль частот и синхронизации, БПК, блоки передачи команд, и ПВ), было подготовлено программное обеспечение конфигурирования системы при переменном числе крейтов оцифровки и компьютеров приема данных. Для этого была реализована распределенная база данных онлайн конфигурации, в задачи которой также входит хранение описаний крейтов-источников данных и конфигурации плат оцифровки, хранение актуального состояния работающих программных сервисов, хранение текущих ассоциаций между источниками данных и сервисами приема данных. Ведутся работы по запуску и настройке административных средств конфигурирования комплекса. Параллельно были разработаны варианты МЧС, БПК и ПВ, удовлетворяющие дополнительным требованиям детектора КЕДР, и произведены пилотные экземпляры плат. После их тестирования будет продолжена разработка программного обеспечения новой ССД КЕДР. Рассмотрена возможность и целесообразность разработки новых плат оцифровки данных для калориметра на жидком криптоне с целью дополнительного уменьшения мертвого времени и повышения надежности системы. Разработка и производство таких плат отнесены ко второй очереди модернизации ССД.

16. Разработка системы измерения энергии пучков коллайдера ВЭПП-4 при работе на высокой энергии

Самым точным и надёжным способом измерения энергии релятивистского пучка электронов является метод резонансной деполяризации. Этот метод неоднократно использовался во многих экспериментах по измерению масс кварков и лептонов, а также Z-бозона.

Метод резонансной деполяризации основан на зависимости частоты прецессии спина электрона пучка от его энергии E :

$$\Omega_s = \omega_0 \left(1 + \frac{\mu' E}{\mu_0 m_e} \right), \quad (15.1)$$

где Ω_s — частота прецессии спина частицы, ω_0 — частота обращения частицы в накопителе, μ' — аномальная часть магнитного момента частицы, μ_0 — нормальная часть магнитного момента частицы, m_e — масса электрона.

Частота прецессии измеряется по частоте внешнего электромагнитного поля, при которой происходит резонансное разрушение поляризации. Для этого требуется выполнение условия резонанса (условия деполяризации):

$$\Omega_s = \omega_0 n \pm \omega_d, \quad (15.2)$$

где ω_d — частота деполяризатора, n — любое целое число.

Абсолютная точность метода ограничена эффективной шириной спинового резонанса, которая для ускорителя ВЭПП-4М составляет около 5×10^{-7} . На низкой энергии, т. е. в области энергии пси-мезонов, на ускорителе ВЭПП-4М поляризация определяется по интенсивности внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека). Однако сечение внутрисгусткового процесса быстро падает с ростом энергии. Поэтому потребовался другой способ. Для измерения поляризации пучка планируется использовать метод обратного комптоновского рассеяния. Метод основан на асимметрии рассеяния циркулярно поляризованного лазерного излучения на вертикально поляризованном релятивистском пучке (рис. 16.1).

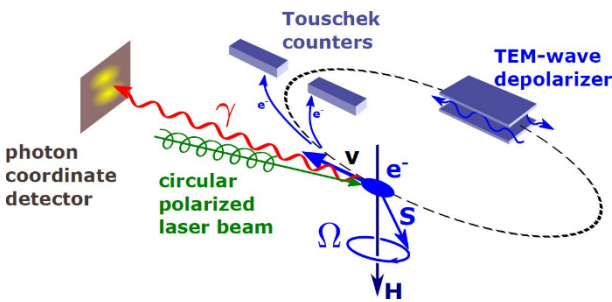


Рисунок 16.1. Вертикально поляризованный электронный пучок деполяризуется ТЕМ-волной. Поляризация измеряется по интенсивности внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека) или по верх-низ асимметрии обратного комптоновского рассеяния циркулярно поляризованных лазерных фотонов.

Величина асимметрии, определяемая как разница рассеянных в верхнюю и нижнюю полусферу фотонов к полному числу рассеянных фотонов

$$A = \frac{\sigma_{y>0} - \sigma_{y<0}}{\sigma_0} \approx -\frac{3}{4} \frac{E \omega_{laser}}{m_e^2} \cdot P \cdot V, \quad (15.3)$$

где $\sigma_{y>0}$ ($\sigma_{y<0}$) сечение рассеяния в верхнюю (нижнюю) полусферу, $\sigma_0 \approx 8\pi r_e^2/3$ — полное сечение комптоновского процесса, ω_{laser} — энергия начального (лазерного) фотона, P — степень вертикальной поляризации электронного пучка, $V = \pm 1$ — параметр Стокса циркулярной поляризации фотона.

В качестве лазера используется импульсный твердотельный лазер с длиной волны 527 нм с энергией импульса до 250 мкДж и частотой повторения импульсов до 4 кГц. Большая энергия вспышки требуется для увеличения сигнала по отношению к фону тормозного рассеяния

электронов пучка на остаточном газе в вакуумной камере. Лазерное излучение при помощи системы управляемых подвижных зеркал вводится через оптические окна внутрь вакуумной камеры ускорителя. Место встречи фотонов с электронами должно находиться в прямолинейном промежутке около квадрупольных линз (рис. 16.2). Это место было выбрано как наиболее оптимальное с точки зрения величины вертикального разброса импульсов в пучке.

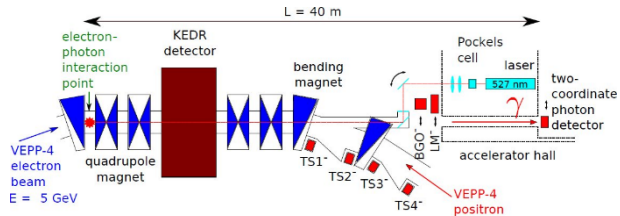


Рисунок 16.2. Схема установки. Место встречи фотонов и электронов расположено около квадрупольных линз. Двухкоординатный детектор фотонов располагается на расстоянии 40 м от места встречи.

Регистрация рассеянных фотонов осуществляется при помощи двухкоординатного детектора на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ). Рассеянные обратно фотоны с энергией до 800 МэВ конвертируются в электроны и позитроны в свинцовой пластине толщиной 6 мм. Координаты заряженных частиц определяются при помощи ГЭУ.

Для исключения систематической погрешности, связанной с движением орбиты пучка, измерения будут осуществляться для двух циркулярных поляризаций лазерного излучения. Управление циркулярной поляризацией производится при помощи ячейки Поккельса или вращающейся $\lambda/4$ фазовой пластинки.

В 2016 году проведены первые измерения поляризации (рис. 16.3). При 5 мА в сгустке скорость счёта рассеянных фотонов достигала 3 кГц. На энергии $E \approx 4.1$ ГэВ измерена время радиационной поляризации $\tau_r = 20 \pm 2$ мин. и степень поляризации $P = 23 \pm 2$ %. Скорость счёта оказалась в несколько раз ниже ожидаемой, что связано со следующими причинами: 1) деградация поверхности вакуумного зеркала из-за осаждения углеводородов; 2) отличающиеся от расчётных условия фокусировки. В связи с этим, осенью 2016 года проведена замена вакуумных зеркал. Планируется установка более мощного импульсного лазера, а также оптимизация условий фокусировки. Кроме этого, необходима настройка ВЭПП-4М для работы с токами 10 – 20 мА.

В будущем, с использованием лазерного поляриметра планируется измерение энергии пучка в области $\Upsilon(1S)$ резонанса.

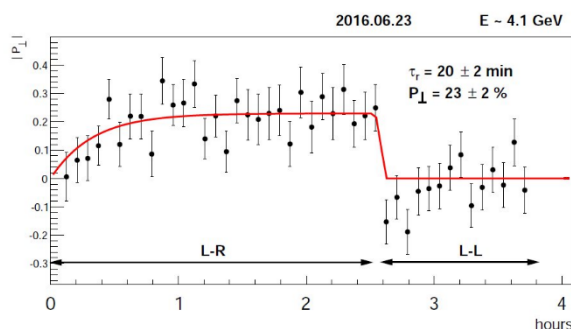


Рисунок 16.3. Наблюдение процесса радиационной поляризации при помощи лазерного поляриметра.

Заключение

В 2016 году в рамках данного проекта физиками ИЯФ СО РАН был выполнен большой объём экспериментальных исследований на пяти электрон-позитронных коллайдерах. Это эксперименты в ИЯФ с детекторами КЕДР (на ВЭПП-4М), СНД и КМД-3 (на ВЭПП-2000), а также работы в составе зарубежных коллабораций. К ним относятся эксперименты с детектором BES-III, с детектором Belle и с детектором BaBar. Было получено большое количество интересных результатов. Кроме того, велась обработка данных и подготовка новых экспериментов в коллаборациях MEG и g-2, а также разработка новых методик для детектора для Супер-Чарм Тау фабрики в ИЯФ и детектора для регистрации тёмной материи. Перечислим наиболее заметные результаты и работы, в которых выполнены первые измерения.

В ИЯФ СО РАН в основном завершена модернизация коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 с целью получения пучков электронов и позитронов от инжекционного комплекса ВЭПП-5. Детекторы КЕДР, СНД и КМД-3 подготовлены к работе в 2017 году. Для экспериментов с детектором КЕДР на высокой энергии подготовлена система лазерного измерения энергии пучков ВЭПП-4М.

Детектором BES-III впервые наблюдался распад $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^0$.

В 2016 году Belle завершил анализ времени-зависимых распределений Далица в распадах $B^0 \rightarrow D^0 h^0$, $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, где h^0 обозначает легкий нейтральный мезон. Была измерена модельно-независимым методом величина параметра СМ – угла бета Треугольника Унитарно-

сти. Кроме того, детектор Belle впервые измерил сечения e^+e^- аннигиляции в трёхчастичные конечные состояния $B\bar{B}^*\pi$ и $B^*B^*\pi$.

Завершена обработка данных BaBar с целью измерения параметра СМ – элемента V_{ub} матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава, достигнутая точность является одной из лучших.

В 2016 году опубликован окончательный результат эксперимента MEG1, в котором велся поиск нарушающего закон сохранения лептонного числа распад $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$. Получен лучший предел на вероятность этого распада, который позволяет значительно ограничить параметры моделей, предсказывающие данный распад за пределами СМ.

Подводя итоги проделанной работы следует сделать вывод, что программа работ, запланированных на 2016 год и в целом по теме «Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах и редких распадах» были выполнены.

В 2017 году планируется продолжить эксперименты по проверке СМ и поиску явлений, выходящих за её пределы.

№ 15.2.1 Разработка новых систем и приборов с использованием методов экспериментальной ядерной физики.

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов регистрации нейтрино и поиска темной материи в низкофоновых экспериментах с помощью криогенных лавинных детекторов (КЛД) на основе жидкого Ag и Xe с использованием микроструктурных газовых умножителей (МСГУ), в частности газовых электронных умножителей (ГЭУ), а также разработка детекторов нового поколения для систем идентификации частиц. Кроме того, представлены результаты исследования возможности создания пиксельных сцинтилляционных детекторов для применения в медицине и системах обеспечения безопасности.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

На предыдущих этапах реализации проекта была начата разработка системы очистки с рециркуляцией двухфазного КЛД в Ag объемом 10 л. В частности, были приобретены или изготовлены следующие элементы системы: циркуляционный насос (KNF), два газгольдера для сбора чистого газа и фильтры очистки от электроотрицательных примесей (SAES Pure Gas).

Программа реконструкции черенковских колец была разработана и проверена при обработке результатов экспериментов с прототипом ФАРИЧ на выведенном пучке электронов на комплексе ВЭПП-4М.

Были произведены опытные платы 32х канального ВЦП. Для их проверки и настройки был разработан и произведен специализированный блок в стандарте VME. В настоящее время начаты работы по проверке произведенных плат.

Проведены поисковые исследования возможности полировки аэрогелей. Наилучший результат получен при полировке аэрогеля натуральным шелком. Полированные образцы были протестированы в составе прототипа детектора черенковских колец на пучке электронов. Предварительно было обнаружено, что полировка не приводит к потере фотонов, но разрешение по изеренному углу черенковского излучения ухудшается.

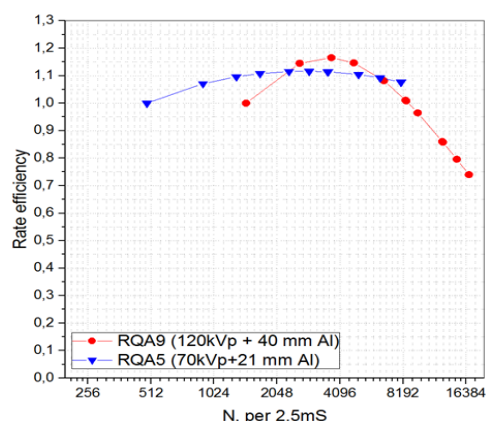


Рисунок 1. Непропорциональность счета детектора в зависимости от величины входного потока на канал (время накопления данных одной строки 2.5 мс) при различных спектрах излучения.

Был изготовлен 32 канальный прототип детектора прямого счета фотонов на основе микропиксельных лавинных фотодиодов производства КЕТЕК и сцинтиллятора LFS-3 с шагом каналов 1.6 мм. Быстродействие детектора составило 7 МГц на канал при уровне просчетов 30% для стандартного спектра излучения RQA9 (120 кВп и дополнительной фильтрации 40 мм Al). Счетная характеристика детектора представлена на рис. 1. Энергетическое разрешение детектора определяется в основном собственным разрешением используемого сцинтиллятора, которое составляет 25-40% для диапазона энергий 20 – 100 кэВ.

Начата работы по определению оптимальных режимов исследования объекта и тестирование методики определения элементного состава образца на основе данных по ослабленной излучения “базисным элементам”. Несмотря на ограниченное энергетическое разрешение детектора, однопороговый режим счета фотонов позволяет проводить классификацию материалов за счет переключаемого напряжения на рентгеновском источнике. Это позволит использовать данный тип детектора в установках для персонального досмотра без их существенной модификации.

2. Измерение характеристик двухфазного КЛД в Ag объемом 150 л с КУ

В 2016 году были начаты измерения характеристик двухфазного КЛД в Ag объемом 150 л с комбинированным умножителем (КУ). На рис. 2 показаны детали конструкции двухфазного КЛД в Ag объемом 150 л с КУ. А на рис. 3 представлена усилительная характеристика

такого детектора: показана зависимость зарядового сигнала на двойном ГЭУ от напряжения в двухфазном режиме.

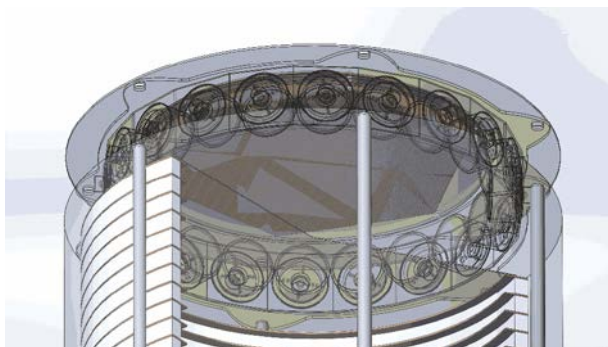


Рисунок 2. Детали конструкции двухфазного КЛД в Ar объемом 150 л с КУ.

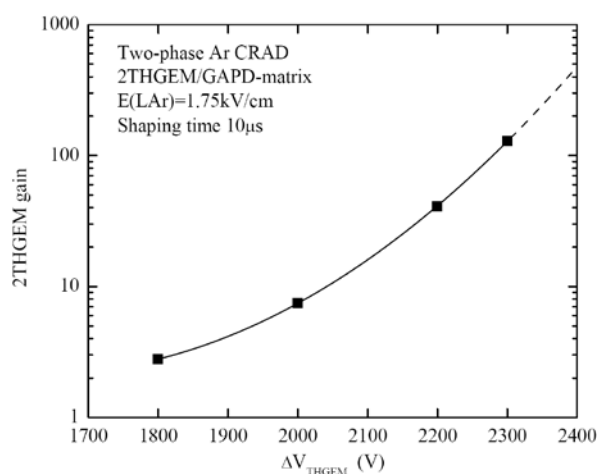


Рисунок 3. Усижительная характеристика двухфазного КЛД в Ar объемом 150 л с КУ.

3. Измерение характеристик двухфазного КЛД в Хе объемом 10 л на основе ГЭУ

Были измерены характеристики двухфазного КЛД в Хе объемом 10 л на основе ГЭУ. На рис. 4 представлена усижительная характеристика такого детектора: показана зависимость зарядового сигнала на двойном ГЭУ от напряжения для двух заходов (Run 1 и 2) в двухфазном режиме по сравнению с характеристикой в газовом режиме.

4. Создание программы полного моделирования прототипа вместе с реконструкцией черенковских колец

Разработан пакет программ для полного моделирования прототипа детектора черенковских колец. В нем детально описана регистрирующая аппаратура и составные части установки выведенного пучка с ускорителя ВЭПП-4. В пакет включены алгоритмы восстановления

черенковских колец по информации с регистрирующей аппаратуры. Данный пакет используется для анализа полученных при экспериментах на выведенном пучке данных, в частности для проверки качества аэрогелевых радиаторов черенковского излучения с целью улучшения технологии его изготовления.

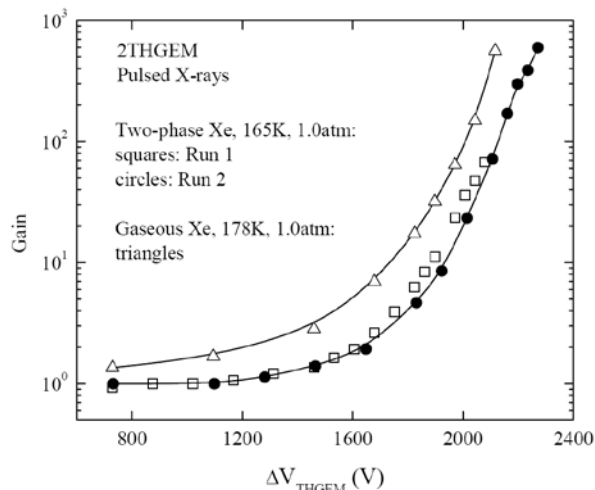


Рисунок 4. Усижительная характеристика двухфазного КЛД в Хе объемом 10 л на основе ГЭУ.

5. Измерение разрешения прототипа на пучке и сравнение с результатами моделирования

В экспериментах с прототипом ФАРИЧ с использованием фотонного детектора на основе матриц DPC было получено расчетное разрешение по углу черенковского излучения. Расчеты проводились с помощью разработанного пакета программ моделирования. Результаты эксперимента будут представлены на конференции по методике регистрации частиц и опубликованы.

6. Разработка эскизной документации варианта установки на основе счетного детектора

В рамках работ по разработке детектора рентгеновского излучения на основе сборок скинтилятор-микрочувствительный фотодиод, изготовлен прототип детектора, реализующий метод прямого счета фотонов. Отсутствие собственных шумов и более высокая квантовая эффективность регистрации детектора позволяют ему обеспечить существенно более высокое качество изображения. На рис. 5 показан эскиз разрабатываемой установки для индивидуального досмотра пассажиров, на основе данного детектора.

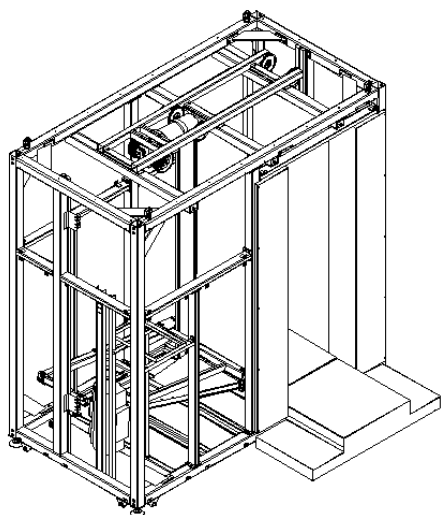


Рисунок 5. Эскиз установки для персонального досмотра.

7. Разработка и изготовление прототипа двухкоординатного детектора, проведение его испытаний

На основе проведенных ранее исследований разработан и изготовлен прототип двухкоординатного детектора гамма квантов. Прототип состоит из 256 каналов, собранных в квадратную матрицу 16x16 элементов. Гамма кванты регистрировались при помощи сцинтилляционных кристаллов BGO с высокой эффективностью. При испытаниях получено координатное разрешение 1 мм, что соответствует ожидаемому из моделирования методом Монте Карло.

№ 15.2.2 Изучение процессов рождения и распадов адронов на встречных электрон-позитронных пучках

Введение

Изучение процессов электрон-позитронной аннигиляции в адроны является одним из главных направлений исследований в ИЯФ СО РАН. В 2010 году в ИЯФ заработал новый ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2000, на котором производятся эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках в области энергий от 0.36 до 2.0 ГэВ в системе центра масс. В данной области энергий ВЭПП-2000 является мировым лидером по производительности (за исключением узкой области около $\varphi(1020)$ мезона). Актуальность исследований на ВЭПП-2000 высока, поскольку они являются неотъемлемой частью экспериментов, направленных на определение фундаментальных констант и фундаментальных симметрий физики элементарных частиц и связанными с ними исследованиями эксклюзивных каналов адронных сечений и физики адронов низких энергий. В частности, измерение сечения рождения адронов на встречных электрон-позитронных пучках в области ВЭПП-2000 необходимо для вычисления вклада сильных взаимодействий в величину аномального магнитного момента мюона $(g - 2)_\mu$.

В 2010-2013 годах был набран рекордный объем статистики в области энергий до 2 ГэВ в системе центра масс на новом электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. В 2013 году начата модернизация комплекса ВЭПП-2000 с целью дальнейшего повышения его светимости. В 2016 году производился вывод комплекса на проектные параметры, начался набор экспериментальных данных на обоих детекторах, КМД-3 и СНД. Одновременно, продолжался анализ статистики, набранной в 2010-2013 годах. Кроме того, физики ИЯФ СО РАН проводят изучение процессов электрон-позитронной аннигиляции в адроны в рамках международной коллаборации по данным детекторов BaBar, BES-3.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Одним из основных результатов работ по проекту на предыдущих этапах было начало работ на модернизированном комплексе ВЭПП-

2000 в 2015 году. Полученные результаты связаны как с анализом данных ВЭПП-2000, аккумулярованных до начала модернизации комплекса, так и с началом работ на модернизированном комплексе.

Продолжился анализ данных, набранных на комплексе ВЭПП-2000 в 2010-2013 годах. Получены новые результаты по измерению на ВЭПП-2000 сечений множественного рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции в области энергий выше 1 ГэВ, в частности, процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$, $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$. Получен предварительный результат по измерению с высокой точностью энергетической зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергий до 660 МэВ в системе центра масс.

Был продолжен анализ данных, набранных ранее с детектором BaBar. Проведено измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \eta$ по данным эксперимента BABAR. Были изучены более 10 промежуточных состояний, дающие вклад в конечные состояния $K_S K \pi \pi^0$ и $K_S K \pi \eta$. Измерены относительные вероятности $J/\psi \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ и $J/\psi \rightarrow K_S K \pi \eta$, при этом вероятность распада $J/\psi \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ в настоящем анализе измерена впервые в мире.

Проведен большой комплекс работ по подготовке модернизированного комплекса ВЭПП-2000 и детекторов КМД-3 и СНД к началу работ после введения в эксплуатацию инжекционного комплекса ВЭПП-5. Изучена характеристика нового канала измерения времени калориметра детектора СНД в реальном детекторе и показано их соответствие проектным параметрам. Установлена новая электроника считывания информации с полосок жидкоксеронового калориметра детектора КМД-3 и проведена ее калибровка в условиях реального эксперимента. Величина полученных шумов в пересчете на измеренную энергию соответствует ожидаемому (около 0.15 МэВ) и определяется шумами ЗЧУ. В 2015 году была разработана параллельная версия программы реконструкции событий КМД-3, а также модернизирована система архивации данных с целью уменьшения количества стадий обработки данных. Было проведено полномасштабное тестирование новой системы (Рисунок 1.1, Рисунок 1.2). Для тестирования использовался процессор Intel(R) Core(TM) i7-4930K CPU @ 3.40GHz, который обладает 6 реальными ядрами и 12 виртуальными(потоками). И, как видно, при росте числа используемых потоков от 1 до 6 наблюдается рост частоты близкий к линейному, далее

сказывается «виртуальность» дополнительных ядер.

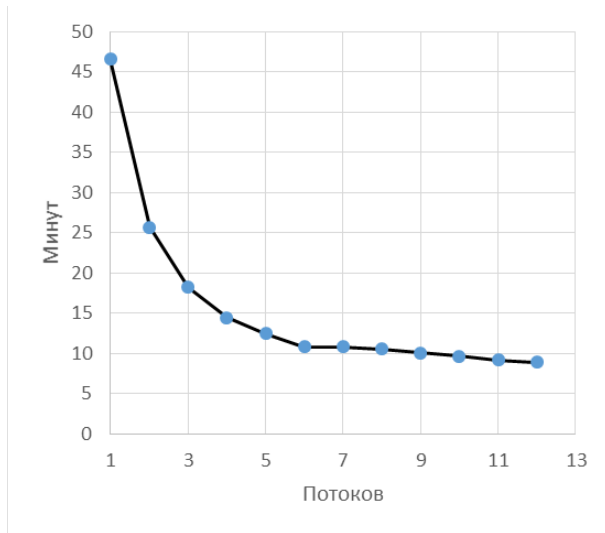


Рисунок 1.1. Задержка между набором данных и получения информации о качестве данных в зависимости от числа потоков.

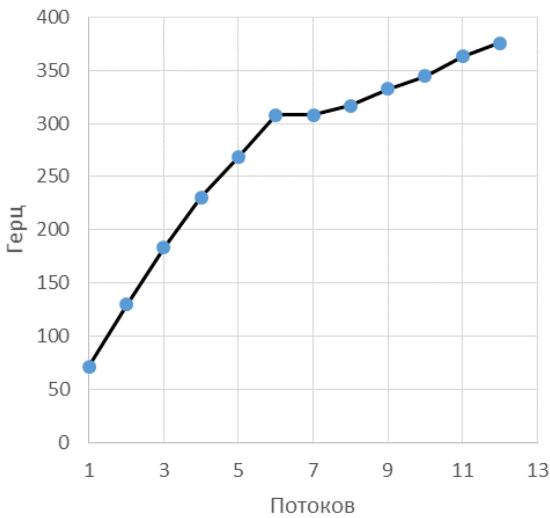


Рисунок 1.2. Скорость обработки данных в зависимости от числа потоков.

2. Измерение сечений основных процессов множественного рождения адронов на детекторах ВЭПП-2000 с точностью сравнимой со среднемировой

В 2016 году продолжился анализ данных, набранных в 2011-2013 годах на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 с детекторами КМД-3 и СНД.

Опубликован окончательный результат по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3 [1,2]. Статистическая точность измерения составила около 4%, систематическая – около 6%.

Опубликованы предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ с детектором КМД-3 [3]. В анализе использовалась статистика на основе интегральной светимости 22 пбн^{-1} , набранная в 2011-2012 гг. Идентификация каонов производится по их ионизационным потерям в веществе дрейфовой камеры. Сечение было измерено в 30 энергетических точках в диапазоне энергий 1.59 - 2.0 ГэВ в системе центра масс. Продемонстрировано доминирование промежуточного состояния $\phi(1020)\eta$. Предварительные результаты измерения хорошо согласуются с существующими и обладают меньшей статистической ошибкой.

Проведен анализ и опубликован окончательный результат [4] по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K_L^0$ в области энергий $\phi(1020)$ мезона, 1004-1060 МэВ, с детектором КМД-3. Зарегистрировано 6.1×10^5 событий сигнала с распадом $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Систематическая ошибка измерения сечения составила 1.8%. Получено наиболее точное значение полной ширины ϕ мезона. Впервые получена оценка вклада ρ и ω в этот процесс в области энергий ϕ мезона. Результаты измерения показаны на рисунке 2.1.

Проведен анализ по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ в области энергий $\phi(1020)$ мезона, 920-1060 МэВ, с детектором КМД-3. При анализе интегральной статистики 9.8 1/пб идентифицировано 6798 ± 93 сигнальных событий. В измеренном сечении наблюдается интерференция нерезонансной подложки с распадом $\phi(1020)$ мезона на 4 заряженных пиона. Измерена относительная вероятность редкого распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, подавленного по G-четности и согласно правилу Цвейга:

$$B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) = (6.5 \pm 2.7 \pm 1.6) \times 10^{-6}$$

Статья с результатами анализа направлена в журнал. Результаты измерения показаны на рисунке 2.2.

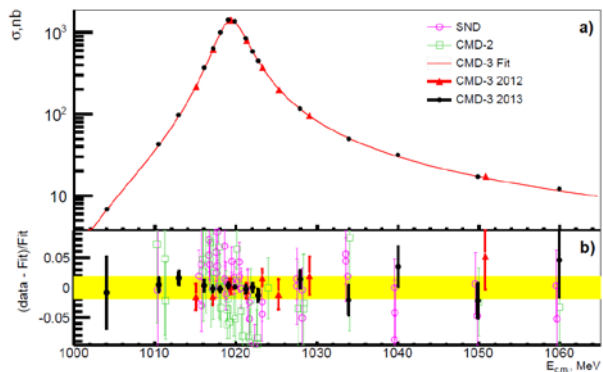


Рисунок 2.1. Результат измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K_L^0$ с детектором КМД-3.

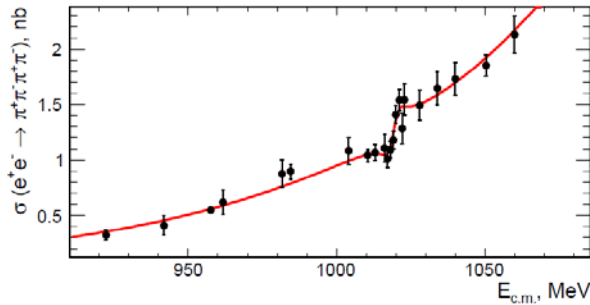


Рисунок 2.2. Результат измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3.

Опубликовано новое измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ с детектором СНД [5]. Статистика, на которой был основан ранее опубликованный результат, была увеличена в два раза, также, были внесены улучшения в процедуру анализа. Точность измерения является наилучшей в мире. Энергетическая зависимость измеренного сечения хорошо аппроксимируется вкладом ρ мезона и его двух радиальных возбужденных состояний.

Опубликованы измерения сечений процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$ с детектором СНД [6,7]. Для выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ используются события $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$ в конечном состоянии. Результат измерения является наиболее точным в мире и наблюдается расхождение с предыдущим измерением коллаборацией Babar. Для выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$ используются события с 7γ в конечном состоянии. Сечение этого процесса измерено впервые.

Другие результаты и обзоры основных результатов измерения сечений с детекторами КМД-3 и СНД представлены в работах [8-15].

Предварительные результаты измерений докладывались в 2016 году на международных конференциях Determination of the Fundamental Parameters in QCD (7-12 марта 2016, Майнц, Германия), Физика фундаментальных взаимодействий (12-15 апреля 2016, Дубна, Россия), MESON2016 (2-7 июня 2016, Краков, Польша), ICNFP 2016 (6-14 июля 2016, Крит, Греция), MENU 2016 (25-30 июля 2016, Киото, Япония), ICHEP 2016 (3-10 августа 2016, Чикаго, США), KAON 2016 (14-17 сентября 2016, Бирмингем, Великобритания), TAU 2016 (19-23 сентября 2016, Пекин, Китай) и ряде других конференций по физике высоких энергий.

3. Включение в работу новой электроники детектора СНД, позволяющей существенно повысить загрузочную способность детектора

В экспериментах на ВЭПП-2000, проведенных в 2010-2013 годах, было осознано, что главным фактором, ограничивающим скорость считывания событий с детектора СНД, является большой объем информации с катодных полосок трековой системы. В 2015 году была изготовлена новая оцифровывающая электроника катодных полосок (ПА24М), базирующаяся на FADC. Каждый модуль ПА24 обслуживает 24 канала. Информация о сработавших каналах считывается по протоколу TCP/IP с каждого модуля независимо, что позволяет распараллелить чтение данных. Включение новых модулей в систему сбора данных потребовало существенной переделки программного обеспечения ее программного обеспечения. Эта переделка была сделана в 2016 году. В результате максимальная скорость считывания событий (при 10%-х просчетах) возрасла с 1кГц до 3 кГц и определяется в данный момент чтением данных с других систем детектора. Проведенная модернизация системы данных позволит легко перевести на новую электронику другие подсистемы детектора.

4. Запуск электроники для считывания информации с полосок жидко-ксенонового калориметра детектора КМД-3, позволяющей существенно повысить загрузочную способность детектора

В 2016 году жидкоксеноновый калориметр детектора КМД-3 был полностью оборудован новой оцифровывающей электроникой полоскового тракта. Новая электроника, построенная на современной элементной базе, имеет высокую надежность и, в отличие от электроники предыдущего поколения, позволяет работать при высоких загрузках триггера (до ~ 5 кГц), что необходимо для успешного продолжения экспериментов на модернизированном накопителе ВЭПП-2000 в условиях высокой светимости. В 2016 году были получены первые результаты использования новой оцифровывающей электроники в процессе набора экспериментальной статистики на накопителе ВЭПП-2000. Были получены следующие результаты.

1. Были определены и устранены основные источники наводок, возникающие в ходе полномасштабного эксперимента, в частности, наводка с цифровых каналов передачи данных.
2. Была проверена и уточнена карта каналов (2112 шт.) по трекам космических мюонов, регистрируемых дрейфовой камерой детектора и жидкоксеноновым калориметром.

3. Получены спектры энерговыделения на отдельных полосках для минимально ионизирующих частиц, необходимые для калибровки детектора. Пример такого спектра показан на рисунке 4.1.

4.

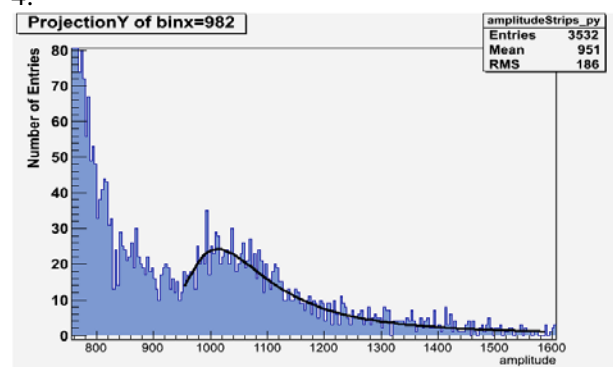


Рисунок 4.1. Спектр энерговыделения (каналы АЦП) с отдельной полоски жидкоксенонового калориметра.

5. Запуск новой системы измерения времени пролета КМД-3

Среди многоадронных процессов, которые изучаются на ВЭПП-2000, особый интерес представляют процессы с рождением пар нейтрон-антинейтрон вблизи порога реакции. Однако события этого процесса практически не дают сигналов в подсистемах детектора, что затрудняет их выделение на фоне других событий. События этого процесса не должны иметь центральных треков в дрейфовой камере, но должны иметь кластер в калориметре со значительным энерговыделением при аннигиляции антинейтрона. Важным фактором энерговыделения является его временная задержка относительно момента столкновения пучков, обусловленная медленной скоростью антинейтронов вблизи порога рождения. Моделирование показало, что при аннигиляции антинейтрона в калориметре в среднем рождается три-пять заряженных пионов, которые разлетаются сферически симметричным образом. Регистрация этих пионов время-пролетной системой должна позволить подавить космический и пучковый фон.

Для детектора КМД-3 изготовлена время-пролетная система ТОФ на основе стриповых сцинтилляционных счетчиков, которые установлены на лицевой стороне октантов CsI калориметра в узкий зазор толщиной 7 мм. Всего в системе 176 счетчиков, по 22 на каждый октант CsI калориметра, сигналы с которых считываются с двух противоположных торцов с помощью компактных фотоприемников (SiPM). В

ходе стендовых испытаний было показано, что временное разрешение счетчиков лучше 1 нс.

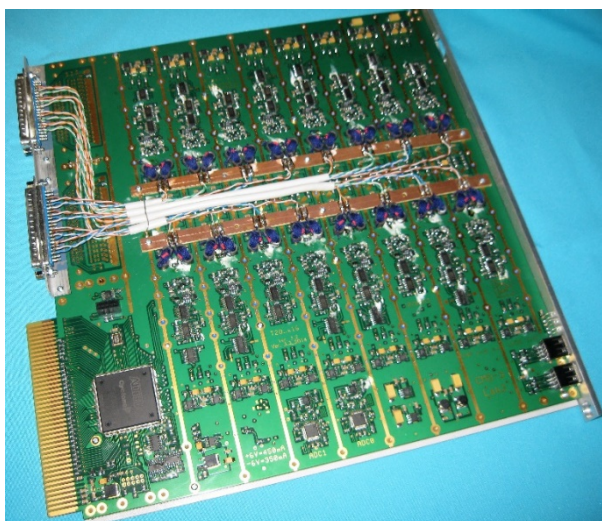


Рисунок 5.1. 16-канальная плата TQF для оцифровки сигналов со счетчиков время-пролетной системы

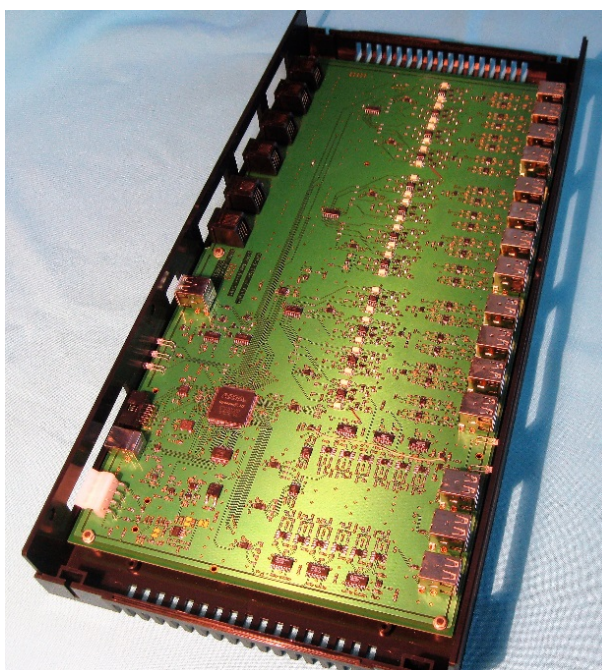


Рисунок 5.2. Блок «ФИЛИПП», включающий усилитель-формирователь сигналов со счетчиков время-пролетной системы и источник напряжения смещения для SiPM.

В 2016 году были закончены разработки предварительной и оцифровывающей электроники для системы ТОФ. Изготовлен первый прототип полного канала электроники, который был испытан на стенде и было принято решение о массовом производстве. В настоящее время изготовлены все платы TQF (26 штук, 16 каналов) оцифровывающей электроники, практически закончена предварительная отладка этих

плат. Основная проблема, с которой столкнулись при наладке - нелинейность временной шкалы, которая устранена заменой определенных конденсаторов. Изготовлена вся предварительная электроника – 24 блока «ФИЛИПП», настройка которых ведется в настоящее время. Изготовлены кабели, передающие сигналы с блоков «ФИЛИПП» на платы TQF.

6. Измерение сечений e^+e^- аннигиляции в адронные состояния, включающие нейтральные каоны по данным экспериментов BABAR, Belle и BES-III

В 2016 году группой физиков из ИЯФ СО РАН, участников коллаборации BaBar, выполнялся анализ процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ в диапазоне энергий от порога рождения до 4 ГэВ в системе центра масс. Сечение измерялось методом радиационного возврата на основе интеграла светимости 454 фбн^{-1} , набранному с детектором BaBar на В-фабрике PEP-II (SLAC, Стэнфорд, США). Измерение с двумя нейтральными каонами и с двумя нейтральными пионами выполнено впервые в мире. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ измерено с наилучшей в мире точностью. Энергетическая зависимость сечения была аппроксимирована моделью доминантности векторных мезонов с участием четырех промежуточных ρ подобных векторных состояний. Впервые измерен вклад возбужденного состояния ρ мезона в это сечение: $e^+e^- \rightarrow \rho(1700) \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$. Изучены промежуточные состояния, дающие вклад в конечные состояния $K_S K_L \pi^0 \pi^0$, в частности, выделялись состояния ϕ , η и $K^* K^* \text{bar}$. Измерены относительные вероятности $J/\psi \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$, при этом вероятность распада в настоящем анализе измерена впервые в мире. Систематическая ошибка измерения сечения $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$ составляет около 10% вблизи порога рождения и линейно возрастает до 100% на энергии 4.0 ГэВ. Предварительные результаты измерения показаны на рисунках 6.1 и 6.2.

Результаты настоящей работы докладывались в 2016 году на международных конференциях:

1. The ICHEP conference, Chicago, USA, 3-10 August, 2016.
2. The 14th International Workshop on Tau Lepton Physics IHEP, Beijing, China, 19-23 September, 2016.
3. International Symposium Advances in Dark Matter and Particle Physics Messina, Italy, 24-27 October, 2016.

По содержанию докладов были подготовлены статьи с предварительными результатами и посланы в журнал Nuclear Physics B Proceedings Supplement. Окончательные публикации с результатами анализа в настоящее время проходят утверждение внутри коллаборации BaBar.

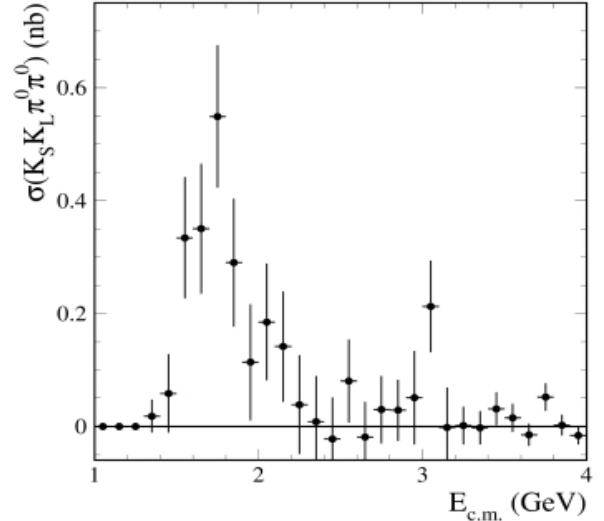


Рисунок 6.1. Предварительные результаты измерения энергетической зависимости сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$

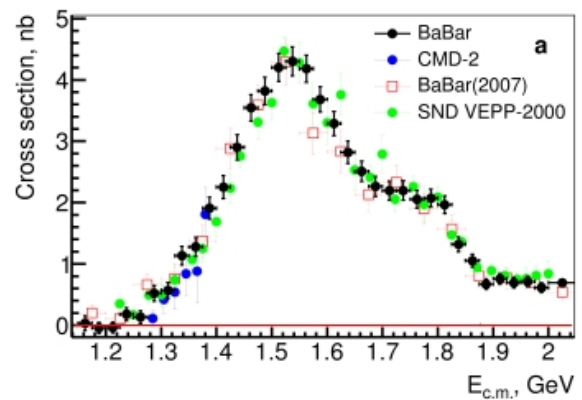


Рисунок 6.2. Предварительные результаты измерения энергетической зависимости сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$

Обзор других измерений сечений e^+e^- аннигиляции в адронные состояния по данным детектора BaBar представлен в работе [16].

7. Начало работ на модернизированном комплексе ВЭПП-2000 вблизи максимальной энергии коллайдера 2 ГэВ в системе центра масс для изучения процессов e^+e^- аннигиляции в адроны

В 2016 году проведен большой объем пуско-наладочной работы, связанных началом

работ на модернизированном комплексе ВЭПП-2000.

1. Отлажены режимы работы канала транспортировки пучков электронов и позитронов из инжекционного комплекса ВЭПП-5 до бустерного накопителя БЭП. Получена высокая эффективность транспортировки, до 70%, с сохранением малого эммитанса пучка. Достигнута высокая скорость переключения, около 30 секунд, при перестройке канала для работы с электронами или позитронами.
2. Отлажен совместный режим работы инжекционного комплекса с двумя потребителями – комплексами ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/ВЭПП-4.
3. Отлажены режимы работы бустерного накопителя БЭП, режимы подъема и спуска энергии во всем рабочем диапазоне энергий, вплоть до 990 МэВ (что соответствует 1.98 ГэВ в системе центра масс).
4. Отлажены режимы перепуска пучка из БЭП в основное кольцо ВЭПП-2000 на разных энергиях. Получена высокая эффективность перепуска, до 50%.
5. Произведена настройка оптики основного кольца ВЭПП-2000 на энергии около 1 ГэВ и достигнута светимость 10^{31} 1/см²сек, что является проектной светимостью на данных энергиях.
6. Началась настройка оптики основного кольца ВЭПП-2000 при больших энергиях.
7. Запущена система оперативного измерения энергии пучков с помощью регистрации событий обратного Комптоновского рассеяния. Впервые измерение может производиться с помощью двух лазеров с разной длиной волны.
8. Детектор СНД запущен в полном объеме. Набран большой объем статистики космических событий и светимости при энергии около 1 ГэВ в с.ц.м. Произведена первичная калибровка детектора.
9. Детектор КМД-3 запущен в полном объеме, кроме мюонной системы и новой время-пролетной системы. Запуск этих систем должен закончиться в начале 2017 года. Набран большой объем статистики космических событий и светимости при энергии около 1 ГэВ в с.ц.м. Произведена первичная калибровка детектора.

Получен патент на основе решений, разработанных в рамках создания магнитной системы детектора КМД-3 [23].

8. Комплексное тестирование электроники и программного обеспечения систем сбора данных и обработки данных детекторов КМД-3 и СНД в условиях высокой светимости

В рамках запуска детекторов КМД-3 и СНД завершено подключение всех систем в полном объеме и проведено полномасштабное тестирование работы систем сбора данных детекторов в условиях высокой светимости, ожидаемых после выхода комплекса ВЭПП-2000 на проектные параметры.

На детекторе КМД-3 произведена модернизация аппаратного и программного обеспечения системы сбора данных.

1. Для чтения данных установлены 3 новых серверных компьютера.
2. Программное обеспечение системы сбора данных модернизировано так, чтобы обеспечить чтение данных из электроники и их предварительную обработку через несколько независимых сетевых каналов и сборку единого события в центральном сервере системы. Это позволило повысить пропускную способность системы в несколько раз. В настоящее время для чтения данных достаточно два канала, при необходимости число каналов может быть легко увеличено.
3. Во время набора статистики в 2011-2013 годах в части систем использовалась устаревшая электроника, что ограничивало пропускную способность системы. В предыдущие годы вся устаревшая электроника была заменена на современную. В 2016 году было проведено полномасштабное тестирование, а затем и набор данных с унифицированной электроникой во всех системах детектора. Показана работоспособность системы сбора данных при загрузке триггера до нескольких кГц, что достаточно для работы в условиях высокой светимости модернизированного комплекса ВЭПП-2000.
4. При подключении новой чувствительной электроники для чтения сигналов с полосок жидкоксеронового калориметра к системе сбора данных детектора была обнаружен новый источник наводок, связанный с особенностями работы каналов приема-передачи данных в электронике. Была произведена модернизация цифровых каналов приема-передачи данных во всех блоках электроники, подключенных к ССД детектора (около 300 блоков), что позволило снизить уровень наводки до пренебрежимо малого уровня.

9. Разработка программного обеспечения, позволяющего производить параллельную обработку информации с детектора КМД-3 на локальных и удаленных компьютерных системах в режиме реального времени

Оперативная обработка получаемых с детектора КМД-3 данных, с полной реконструкцией событий, необходима для обеспечения надлежащего контроля за качеством набираемых данных, а также для контроля состояния и работоспособности подсистем детектора, используя в качестве параметров контроля самый высокий из доступных уровней абстракции — измеряемые физические величины. В зависимости от светимости сбор данных и формирование файла захода может отнимать от 2 до 20 минут, затем полученный файл передается в систему хранения и обработки данных. Обработка одного захода производится в одном потоке со скоростью 50-100 Гц. Типичная задержка от момента начала записи захода до окончания его обработки и получения информации о качестве данных в среднем составляет от 65 до 80 минут.

Для сокращения задержки необходимо производить обработку одного файла в нескольких потоках. В 2015 году была разработана первая версия многопоточковой программы реконструкции, в которой велась параллельная обработка одного файла захода несколькими процессами. Эта версия была предназначена для обработки записанных файлов, т.е. она могла использоваться только по окончании захода.

В 2016 году была разработана полноценная многопоточковая версия, которая может использоваться для обработки данных в режиме реального времени, параллельно с набором данных. Были разработаны дополнительные модули программы реконструкции: модуль распределения событий, модуль получения событий, модуль отправки результатов, модуль сбора событий. При запуске многопоточковой версии программы реконструкции запускается процесс чтения, который читает сырые события из файла или получает их из системы сбора данных, необходимое число обрабатывающих процессов, производящих реконструкцию отдельных событий, и процесс записи, который объединяет результаты работы обрабатывающих процессов и записывает результаты в файл. Схема работы многопоточковой версии программы реконструкции в рамках системы оперативного контроля данных детектора КМД-3 показана на

рисунке 9.1.

Результаты тестирования многопоточковой версии программы реконструкции показаны на рисунке 9.2. С учетом имеющегося оборудования, достигнута скорость обработки до 1600 Гц при использовании около 30 обрабатывающих процессов, что достаточно для работы в рамках системы оперативного контроля данных детектора КМД-3. При необходимости, максимальная скорость обработки может быть улучшена за счет использования более мощного оборудования и сокращения издержек на передачу данных между процессами. Результаты работы опубликованы [18].

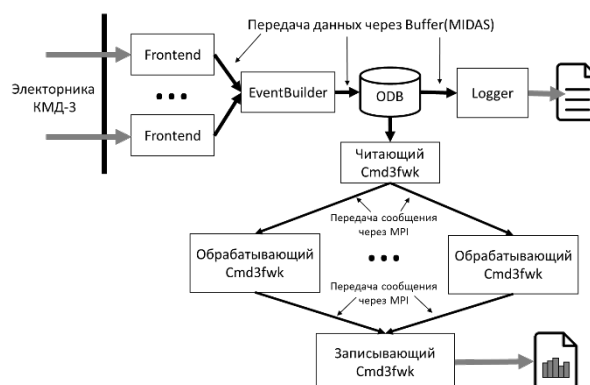


Рисунок 9.1. Использование многопоточковой версии программы реконструкции в рамках системы оперативного контроля данных детектора КМД-3.

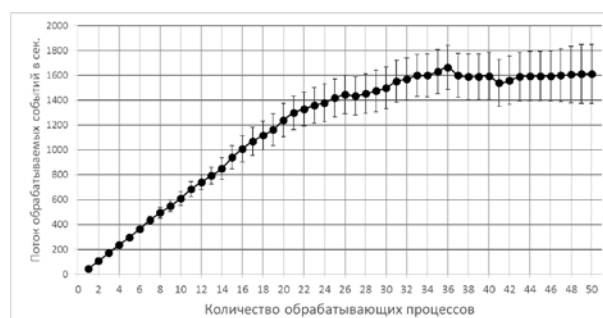


Рисунок 9.2. Зависимость скорости обработки событий от количества обрабатывающих процессов для многопоточковой версии программы реконструкции КМД-3.

10. Отладка пакета генераторов первичного моделирования процессов электрон-позитронной аннигиляции в области энергий ВЭПП-2000 с учетом экспериментальных данных

В 2016 году были выполнены работы по созданию первичных Монте-Карло генераторов для моделирования процессов $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$, $e^+e^- \rightarrow$

$f\eta, e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^0$. Последний процесс моделировался в двух вариантах — прямое (нерезонансное) рождение η мезона и в канале с промежуточным рождением $a^0(980)\rho(770)$, где $a^0(980)$ мезон затем испытывал распад на $\eta\pi$, а $\rho(770)$ -мезон распадался на два π -мезона. Данные генераторы позволяют выполнить изучение динамики процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^0$, анализ которого ведется в настоящее время.

Поскольку η мезон имеет много каналов распада, первичные генераторы, упомянутые выше могут быть использованы при исследовании и других процессов. В частности, если η мезон распадается на три π -мезона (относительная вероятность распада 22.92%), то созданные генераторы могут с успехом применяться в анализе процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$, который также изучается в настоящее время на основе данных, полученных на детекторе КМД-3. Кроме того, конечное состояние $2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ может образовываться через промежуточное рождение $\omega\pi^+\pi^0$, когда ω -мезон распадается в состоянии $\pi^+\pi^-\pi^0$ (относительная вероятность распада 89.2%), поэтому был разработан и первичный генератор процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^0$.

При изучении процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ с детектором ВаВаг было продемонстрировано промежуточное рождение $\rho(770)$ мезона. Поэтому в 2016 году были разработаны первичные Монте-Карло генераторы с рождением $\rho(770)$ мезона(-ов) в промежуточном состоянии и с конечным состоянием $2(\pi^+\pi^-\pi^0)$. Был реализован самый простой вариант такого генератора — $e^+e^- \rightarrow \rho(770)4\pi$, где четыре π -мезона рождаются с орбитальным моментом 0 (S-волна). С помощью этого генератора удалось удовлетворительно описать распределения частиц по инвариантным массам двух-, трех- и четырех пионов, а также угловые корреляции между частицами при энергии около 1.7 ГэВ в системе центра масс. Однако, при энергиях в системе центра масс больше, чем 1.7 ГэВ, промежуточное рождение состояния $\rho(770)4\pi$ уже не дает удовлетворительного описания динамики процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$. Поэтому были разработаны первичные генераторы, реализующие другие промежуточные состояния с $\rho(770)$ мезоном, такие как $e^+e^- \rightarrow f^0(1370)\rho \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$, где $f^0(1370)$ распадался или в состояние $f^0(1370) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ или в состояние $f^0(1370) \rightarrow \rho^+(770)\rho^-(770)$ (оба распада наблюдались, но их относительные вероятности измерены не были). Использование генератора $e^+e^- \rightarrow \rho^+(770)\rho^-(770)\rho(770) \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ позволило адекватно описать массовые и угловые распределения частиц при энергии 2.0 ГэВ в системе центра масс.

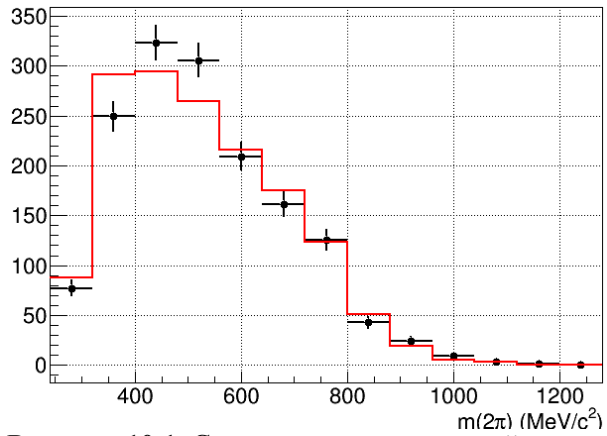


Рисунок 10.1. Сравнение распределений по инвариантной массе двух π -мезонов для экспериментальных данных (точки с ошибками, КМД-3, 2 ГэВ в с.ц.м.) и моделирования $e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ (гистограмма).

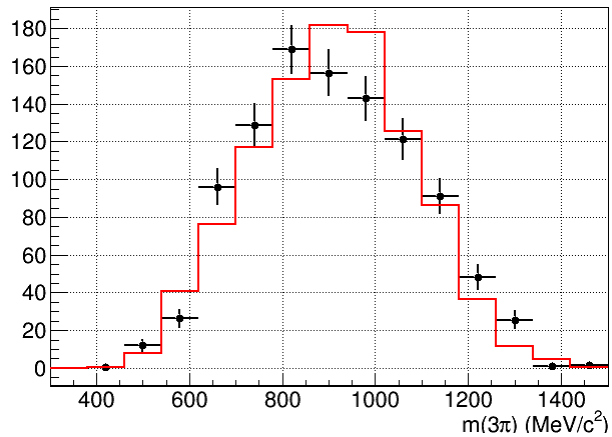


Рисунок 10.2. Сравнение распределений по инвариантной массе трех π -мезонов для экспериментальных данных (точки с ошибками, КМД-3, 2 ГэВ в с.ц.м.) и моделирования $e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ (гистограмма).

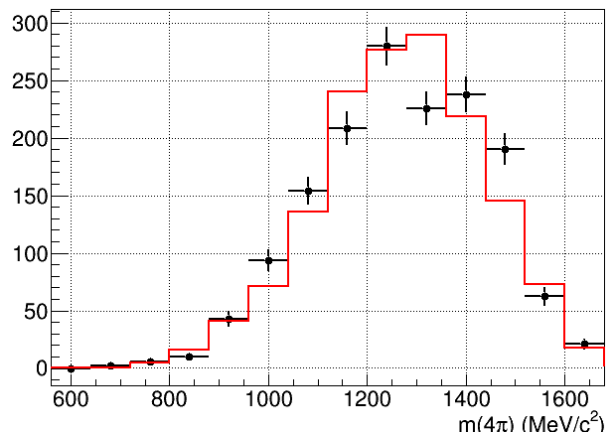


Рисунок 10.3. Сравнение распределений по инвариантной массе двух π -мезонов для экспериментальных данных (точки с ошибками, КМД-3, 2 ГэВ в с.ц.м.) и моделирования $e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ (гистограмма).

На рисунках 10.1-10.3 показано сравнение экспериментальных данных (точки с ошибками) с моделированием событий $e^+e^- \rightarrow \rho^+(770)\rho^-(770)\rho(770) \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ (гистограмма) при энергии 2.0 ГэВ в системе центра масс: на рисунке 10.1 показано распределение по инвариантной массе двух π -мезонов, на рисунке 10.2 показано распределение по инвариантной массе трех π -мезонов, на рисунке 10.3 показано распределение по инвариантной массе четырех π -мезонов.

Заключение

В 2016 году получены следующие основные результаты.

1. Получены новые результаты по измерению на ВЭПП-2000 сечений множественного рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции во всей области энергий комплекса.
2. Проведен большой комплекс работ по подготовке модернизированного комплекса ВЭПП-2000 к началу работ после введения в эксплуатацию инжекционного комплекса ВЭПП-5. Достигнуты проектные параметры комплекса на энергии 1 ГэВ, продемонстрирована работа комплекса на энергии 2 ГэВ.
3. Проведен большой комплекс работ по подготовке детекторов КМД-3 и СНД к набору данных. Проведена первичная калибровка систем детекторов. Начат набор экспериментальной статистики на модернизированном комплексе ВЭПП-2000.
4. Проведено измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ по данным эксперимента BABAR.

Список использованных источников

- [1] D.N. Shemyakin et al., Cross section measurement of the process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ at the VEPP 2000 collider with the CMD-3 detector, AIP Conf.Proc. 1735 (2016) 030006.
- [2] 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) 153-160.
- [3] V.L. Ivanov et al., Preliminary results of the cross-section measurement of $e^+e^- \rightarrow \phi(1020)\eta$ process with the CMD-3 detector at VEPP-2000 collider, Phys.Atom.Nucl. 79 (2016) no.2, 251-259.
- [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) 314-319.
- [5] 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. D94 (2016) no.11, 112001.
- [6] M.N. Achasov et al., Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \omega$ cross section below $\sqrt{s} = 2$ GeV, Phys.Rev. D94 (2016) no.9, 092002.
- [7] M.N. Achasov et al., Study of the process $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ in the energy range $\sqrt{s} < 2$ GeV with the SND detector, Phys.Rev. D94 (2016) no.3, 032010.
- [8] V.P. Druzhinin et al., Measurement of hadron cross sections with the SND detector, EPJ Web Conf. 130 (2016) 05004.
- [9] T.V. Dimova et al., Recent results on e^+e^- to hadrons cross sections from SND and CMD-3 detectors at VEPP-2000 collider, Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 1991-1996.
- [10] M.N. Achasov et al., Recent results from SND detector, AIP Conf.Proc. 1735 (2016) 030009.
- [11] G.V. Fedotovitch et al., Overview of the CMD-3 recent results at e^+e^- collider VEPP-2000, EPJ Web Conf. 130 (2016) 01014.
- [12] E.P. Solodov et al., Hadron reactions study with the CMD-3 detector in e^+e^- collisions, Mod.Phys.Lett. A31 (2016) no.33, 1630038.
- [13] E.P. Solodov et al., Recent results from CMD-3 detector at VEPP-2000 e^+e^- collider, AIP Conf.Proc. 1735 (2016) 020005.
- [14] I. Eidelman, Muon g-2 and Hadronic Vacuum Polarization: Recent Developments, EPJ Web Conf. 118 (2016) 01011.
- [15] FEDOTOVICH G.V., AMIRKHANOV A.N., ANISENKOV A.V., et. al. Overview of the CMD-3 results at the VEPP-2000 e^+e^- collider [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(4): 259-271
- [16] IVANOV V.L., AMIRKHANOV A.N., ANISENKOV A.V., et. al. Study of $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ process with the CMD-3 detector at VEPP-2000 collider [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(6): 502-506.
- [17] KOZYREV E.A., AMIRKHANOV A.N., ANISENKOV A.V., et. al. Study of the process $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ in the center-of-mass energy range 1004-1060 MeV with the CMD-3 detector at e^+e^- VEPP-2000 collider [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(6): 507-513.
- [18] POPOV A.S., AKHMETSHIN R.R., AMIRKHANOV A.N., et. al. Measurement

- of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ and $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ cross sections with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(6): 514-522.
- [19] V.P. Druzhinin, Measurement of the proton and kaon time-like electromagnetic form factors at high energy with the BABAR detector, Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 2770-2772.
- [20] M.Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Measurement of the leptonic decay width of J/ψ using initial state radiation, Phys. Lett. B761 (2016) 98 doi:10.1016/j.physletb.2016.08.011, arXiv:1604.01924 [hep-ex].
- [21] A. Anastasi et al. [KLOE-2 Collaboration], Measurement of the running of the fine structure constant below 1 GeV with the KLOE Detector, в печати, doi:10.1016/j.physletb.2016.12.016, arXiv:1609.06631 [hep-ex].
- [22] M.Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of $e^+e^- \rightarrow \omega\xi_{c1,2}$ near $\sqrt{s} = 4.42$ and 4.6 GeV, Phys. Rev. D93, no. 1, 011102 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.93.011102, arXiv:1511.08564 [hep-ex].
- [23] Карпов С.В., Брагин А.В., Попов Ю.С., Рубан А.А., Патент на изобретение №2601218, «Способ криостатирования и запитки сверхпроводящей обмотки индукционного накопителя и устройство для его реализации». 2016.
- [24] Афондеркин С.Ю., Гаязов С.Е., Игнатов Ф.В. Использование распределенной обработки для контроля качества данных детектора КМД-3. Программные системы и вычислительные методы. №2 (2016) 124-135. 10.7256/2305-6061.2016.2.19120.

№ 15.2.3 Исследования электромагнитной структуры легких адронов и ядер

Введение

Измерение процессов электромагнитного взаимодействия является наиболее эффективным и простым с точки зрения как теории, так и эксперимента методом исследования внутренней структуры адронов и ядер. Для адронов основными физическими наблюдаемыми здесь являются электромагнитные формфакторы и ширины их электромагнитных распадов. Например, электромагнитные формфакторы протона дают информацию о распределении заряда и магнитного момента внутри протона. Другим примером является использование данных по радиационным переходам между легкими векторными и псевдоскалярными мезонами для изучения их кваркового состава, в частности, определения угла смешивания между η - и η' -мезонами.

Теоретической основой для исследований электромагнитных свойств адронов является квантовая хромодинамика (КХД), как правило, в непертурбативном режиме. Полное описание структуры адронов и их взаимодействий является нерешенной задачей КХД. Поэтому в исследовании электромагнитных свойств адронов важную роль играют экспериментальные данные. Для описания данных используются феноменологические или полуфеноменологические модели, которые требуют экспериментальной проверки и настройки.

В ИЯФ СО РАН исследования электромагнитных взаимодействий проводятся в экспериментах на e^+e^- коллайдерах ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М и на накопителе ВЭПП-3. На коллайдерах изучаются процессы e^+e^- аннигиляции в адроны и измеряются, в частности, электромагнитные формфакторы пиона, каона, нейтрона и протона, а также различные радиационные процессы, из которых извлекаются мезон-фотонные переходные формфакторы и ширины радиационных переходов между мезонами. Подобного типа измерения проводятся сотрудниками ИЯФ также в рамках международных коллабораций BABAR (США), BES-III (Китай), главным образом, с использованием методики радиационного возврата.

На накопителе ВЭПП-3 проводятся эксперименты с поляризованной дейтериевой мишенью. В рамках данного проекта проведена де-

монстрация возможности создания плотной газовой мишени, состоящей из поляризованных молекул водорода.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В рамках работ по проекту на предыдущих этапах были измерены электромагнитные формфакторы протона в процессе $e^+e^- \rightarrow p \text{ anti-}p$. На детекторе КМД-3 по этому процессу завершён анализ данных, накопленных на коллайдере ВЭПП-2000 в 2010-2012 годах. Измерены эффективный формфактор протона в диапазоне от порога реакции до 2.00 ГэВ и отношение электрического и магнитного формфакторов. Предварительные результаты по измерению формфакторов протона на детекторе СНД согласуются с результатами КМД-3. Измерения эффективного формфактора, сделанные на ВЭПП-2000, находятся в согласии с предыдущими измерениями и имеют сравнимую точность. Как КМД-3, так и СНД подтверждают результат BABAR о том, что отношение формфакторов вблизи порога значительно превышает единицу.

На прототипе новой электроники калориметра детектора СНД получено временное разрешение лучше 1 нс.

Были проведены работы по увеличению быстродействия системы сбора данных детектора СНД. Была произведена новая оцифровывающая электроника для наиболее загруженной части детектора, системы катодных полосок дрейфовой камеры. Считывание информации с новой электроники осуществляется по протоколу TSP/IP непосредственно с каждой платы. Программное обеспечение системы сбора данных было модернизировано, чтобы реализовать чтение с новых плат. В результате загрузочная способность системы сбора данных детектора СНД возросла в 3 раза, приблизительно до 3 кГц.

В эксперименте BABAR с наилучшей в мире точностью был измерен электромагнитный формфактор заряженного каона в диапазоне энергий от 2.6 до 8.0 ГэВ. Измерения проводились с использованием методики радиационного возврата. Выше 5 ГэВ формфактор измерялся впервые. Результат измерения в сравнении с предсказаниями пертурбативной КХД приведен на рис. 1.1. Видно, что с ростом энергии экспериментальный формфактор приближается к предсказаниям.

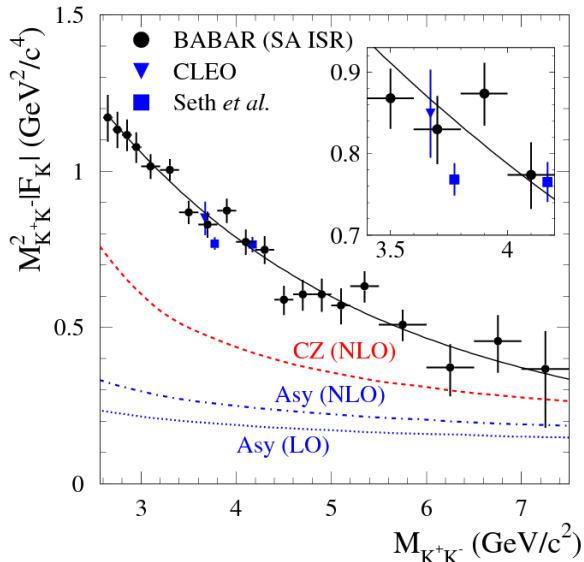


Рисунок 1.1. Нормализованный формфактор заряженного каона, измеренный в эксперименте BABAR, в сравнении с данными других экспериментов и теоретическими предсказаниями, основанными на пертурбативной КХД.

В эксперименте BABAR была исследована зарядовая асимметрия в различных процессах e^+e^- аннигиляции. Это исследование важно для определения ограничений по точности для измерения формфактора пиона методом радиационного возврата на В-фабриках, возникающих из-за излучения из конечного состояния. Было работе показано, что соответствующая относительная систематическая ошибка около $0.5 \cdot 10^{-3}$.

На накопителе ВЭПП-3 был проведен тестовый эксперимент с установкой Дейтрон, который продемонстрировал готовность систем мечения квазиреальных фотонов и регистрации к проведению запланированных с тензорно-поляризованным дейтроном.

2. Анализ данных с В-фабрик и детектора BES-III

В 2016 году по данным, накопленным в эксперименте BABAR, был начат анализ по измерению переходного формфактора для вершины $\gamma^* \gamma^* \eta'$ при больших виртуальностях обоих фотонов ($q_1^2 > 4 \text{ ГэВ}^2$ и $q_2^2 > 4 \text{ ГэВ}^2$). Формфактор измеряется в процессе $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$. При этом требуется регистрация обоих конечных электронов в детекторе. Этот анализ продолжает наши исследования переходных мезон-фотонных формфакторов для случая одного зарегистрированного электрона ($q_1^2 > 4$

ГэВ^2 и $q_2^2 \approx 0$) [1,2]. В этом случае формфактор при больших передачах ведет себя как $1/q_1^2$. Такое поведение предсказывается как в рамках КХД, так и в модели векторной доминантности (МВД). Для случая двух виртуальных фотонов предсказания отличаются: в КХД $-1/(\Lambda^2 + q_1^2 + q_2^2)$, в МВД $-1/(\Lambda^2 + q_1^2) \times 1/(\Lambda^2 + q_2^2)$, и мы надеемся увидеть это различие. Изучаемый процесс является редким. На полной статистике эксперимента ожидается несколько десятков событий. К настоящему моменту были выбраны условия отбора изучаемых событий, с помощью которых на экспериментальных данных удалось увидеть сигнал с небольшим, около 10%, уровнем фона. Было сделано моделирование изучаемого процесса. Ведется анализ распределений по q_1^2 и q_2^2 .

В эксперименте BESIII методом радиационного возврата было измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и электромагнитный формфактор пиона [3] в диапазоне энергии в системе центра масс от 600 до 900 МэВ. Систематическая погрешность измерения сечения 0.9%. Статистическая точность хуже, чем в измерениях экспериментов BABAR [4] и KLOE [5], но лучше, чем в экспериментах на ВЭПП-2М с детекторами КМД-2 [6] и SND [7]. Измеренный формфактор неплохо согласуется с данными KLOE ниже 0.8 ГэВ, выше 0.8 ГэВ разность с измерениями KLOE достигает 5%. С данными BABAR наоборот имеется хорошее согласие выше 0.8 ГэВ. Ниже 0.8 ГэВ данные BABAR в среднем лежат на приблизительно 2% выше. Был посчитан вклад от этого процесса в аномальный магнитный момент мюона $(g-2)_\mu$. Наблюдается хорошее согласие результата с расчетами, основанными на данных KLOE. Результат BABAR на 1.7 стандартных отклонения выше. В целом, новый результат BES, подтверждает предыдущие измерения, которые приводили к разнице между измеренным и вычисленным в рамках Стандартной модели значениями $(g-2)_\mu$ на уровне 3.0-3.5 стандартных отклонения.

3. Набор данных с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М

На коллайдере ВЭПП-4М продолжался эксперимент с детектором КЕДР. Основной массив данных (около 1 пб^{-1}) был набран в области резонанса $\psi(3770)$. Был проведен также пробный заход при энергии пучков 4 ГэВ, главным образом, с целью оценки фоновой ситуации и возможностей электроники и системы

сбора данных детектора для будущего эксперимента на «высокой» энергии, направленного, в частности, на изучение двухфотонной физики. Система регистрации рассеянных электронов, необходимая для этого изучения, работала в обоих экспериментах в штатном режиме.

4. Измерение мезон-фотонных переходных формфакторов и радиационных распадов ρ , ω и ϕ мезонов

В 2016 году был закончен анализ и опубликована статья [8] по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ на детекторе СНД по данным записанным в экспериментах на ВЭПП-2М. Сечение, а, следовательно, и переходный формфактор для вершины $\gamma\gamma^*\pi^0$ были измерены в диапазоне энергий в системе центра масс от 0.6 до 1.38 ГэВ. Результат измерения в сравнении с данными предыдущих экспериментов [9,10] приведен на рис. 4.1.

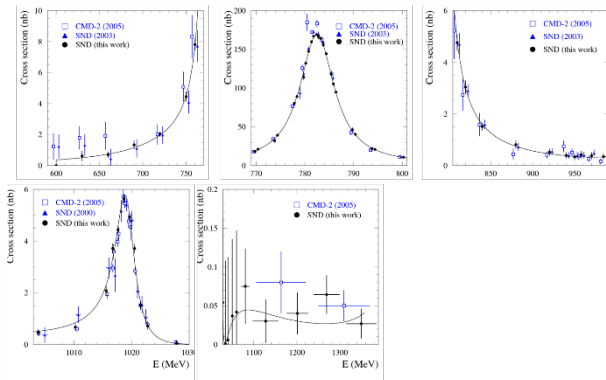


Рисунок 4.1. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в сравнении с результатами предыдущих измерений [9,10]. Кривая показывает результат аппроксимации сечения в модели векторной доминантности.

Это самое точное на сегодняшний день измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$. Кривая на рисунке показывает результат аппроксимации данных в модели векторной доминантности с резонансами $\rho(770)$, $\omega(782)$, $\phi(1020)$ и $\rho(1450)$. Последний резонанс нужен для того, чтобы описать энергетическую зависимость сечению при энергии выше 1.1 ГэВ. Значимость вклада от $\rho(1450)$ составляет 2.1 стандартных отклонения. Из аппроксимации были определены сечения в максимумов резонансов и произведения вероятностей распада:

$$\begin{aligned} V(\rho \rightarrow \pi^0\gamma)V(\rho \rightarrow e^+e^-) &= (1.98 \pm 0.22 \pm 0.10) \times 10^{-8}, \\ V(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)V(\omega \rightarrow e^+e^-) &= (6.336 \pm 0.056 \pm 0.089) \times 10^{-6}, \\ V(\phi \rightarrow \pi^0\gamma)V(\phi \rightarrow e^+e^-) &= (4.04 \pm 0.09 \pm 0.19) \times 10^{-8}. \end{aligned}$$

Это самые точные измерения этих параметров на сегодняшний день. Используя данные из таблицы [11] свойств частиц для $V(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)V(\omega \rightarrow e^+e^-)$, можно получить отношение $V(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)/V(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = 0.0992 \pm 0.23$, которое на 3.4 стандартных отклонения отличается от измерения этой величины в эксперименте KLOE [12]. Наше новое измерение подтвердило и усилило противоречие между параметрами ω мезона, полученными в экспериментах на ВЭПП-2М прямо на резонансе и измерением отношения $V(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)/V(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$, сделанным в эксперименте KLOE по отношению сечений процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ в двух модах распада ω -мезона [12].

5. Завершение анализа данных по когерентному рождению нейтрального пиона на поляризованном дейтроне, подготовка публикации

В 2016 продолжена работа по анализу данных эксперимента по измерению тензорной анализирующей способности T_{20} реакции когерентного фоторождения нейтрального пиона на дейтроне.

Значительная часть работы посвящена подробному Монте-Карло моделированию эксперимента. Для моделирования использовался пакет GEANT-4 из ЦЕРН и генератор событий фоновых реакций на дейтроне, основанный на пакете GENBOS из Лаборатории Джефферсона. Моделирование позволило:

- выполнить энергетическую калибровку сцинтилляционных счетчиков;
- отладить процедуру реконструкции энергии гамма-кванта;
- отладить процедуру идентификации частиц в дейтронном плече по времени пролета и по $\Delta E/E$ анализу;
- определить долю неотделимого фона в отобранных событиях.

На Рис. 5.1 продемонстрировано распределения событий по параметрам идентификации дейтрона. Хорошее соответствие данных и моделирования позволяет определить долю фоновых событий в тех данных, которые остались после наложения всех критериев отбора. Такая доля составила 2%–4% для различных кинематических диапазонов.

Важнейшим параметром, необходимым для извлечения тензорной анализирующей способности реакции является величина степени тензорной поляризации мишени. Она была

определена из анализа данных поляриметра, основанного на процессе упругого электрон-дейтронного рассеяния. Полученные значения, усредненные по всему времени набора данных: $P_{zz}^{(+)}=+0.42$ и $P_{zz}^{(-)}=-0.72$.

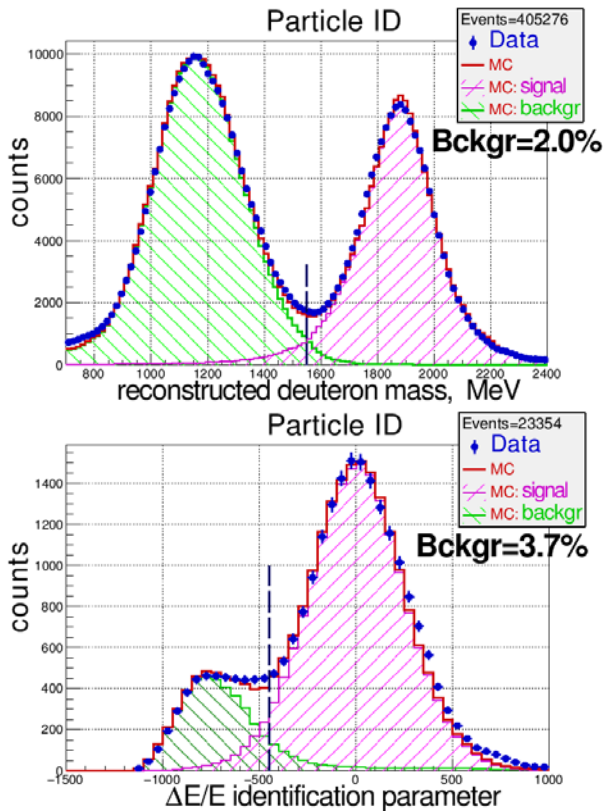


Рисунок 5.1. Гистограммы параметров идентификации дейтрона. Вверху — параметр идентификации, основанный на времени пролета (для $E_d < 80$ МэВ); внизу — основанный на $\Delta E/E$ -анализе (для $80 < E_d < 180$ МэВ). Используются данные, прошедшие все остальные критерии отбора, кроме показанного параметра идентификации. Гистограммы моделирования нормированы на гистограммы данных.

В эксперименте применен широко-апертурный детектор, позволивший получить широкий кинематический охват в одном сеансе набора данных. Это дает возможность разбивать данные на бины, так, чтобы изучать как угловую зависимость анализирующей способности T_{20} для нескольких энергетических диапазонов, так и её энергетическую зависимость для ряда угловых диапазонов. На рис. 5.2 показаны результаты такой обработки данных.

Новые данные значительно превосходят по точности опубликованные в 2009г результаты предыдущего измерения тензорной анализирующей способности T_{20} , выполненного также на ВЭПП-3. Результаты анализа данных нового эксперимента были доложены на международной конференции “EFB23” в Орхусе, Да-

ния [13]. Была подготовлена публикация в журнал «Few Body Systems», статья принята к печати.

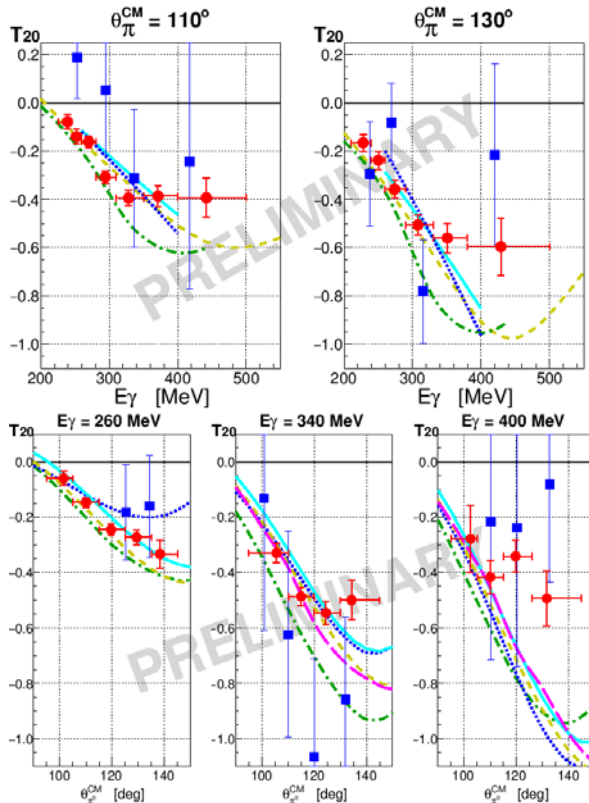


Рисунок 5.2. Результаты для анализирующей способности T_{20} реакции когерентного фоторождения нейтрального пиона на дейтроне, $\gamma + d \rightarrow \pi^0 + d$. Приведены результаты угловой зависимости T_{20} для трех энергий γ -кванта и энергетической зависимости T_{20} для двух угловых диапазонов. Обозначения: кружки — данный эксперимент; квадраты — результаты предыдущего эксперимента на ВЭПП-3. Представлены так же ряд теоретических кривых, рассчитанных в различных моделях.

6. Изучение параметров потока газа, проходящего через блок капилляров разрабатываемой плотной поляризованной газовой водородной мишени

Одним из важнейших вопросов получения плотной поляризованной мишени является создание источника молекул с высокой направленностью вперед, под нулевым углом к оси пучка. Ранее нами были произведены измерения интенсивности пучка из источника, представляющего собой блок капилляров диаметром 20 мм – микроканальная пластина, состоящая из трубочек диаметром 40 микрон и длиной 500 микрон. При данном расходе газа было измерено увеличение интенсивности вперед в три раза, по

сравнению с интенсивностью пучка из отверстия. Применение капилляров меньших размеров позволило бы получить пучок молекул с большей направленностью.



Рисунок 6.1. Многокольцевой щелевой источник.

В 2016 г. нами был предложен и изучен другой подход к решению проблемы узконаправленного источника молекул. Поскольку для получения поляризованной мишени эффективно использовать не точечный, а кольцевой источник атомов/молекул, то вместо капилляров можно применить набор кольцевых щелей очень малой ширины. Нами разработана конструкция многокольцевого щелевого источника с шириной щели 5 микрон (см. рис. 6.1). Источник будет выполнен в виде кольцевого цилиндра диаметром 37 мм, намотанным из титановой фольги толщиной 2 микрона с продольными прокладками из двухстороннего скотча толщиной 5 микрон. Работы в данном направлении продолжаются.

7. Адаптация детекторов КМД-3 и СНД для работы на модернизированном комплексе ВЭПП-2000 при повышенных нагрузках. Модернизация электроники и программного обеспечения систем сбора и обработки данных детекторов

На детекторе КМД-3 произведена замена устаревшей электроники для чтения информации с полосок жидкокислородного калориметра на современную, способную работать при нагрузках триггера до ~10 кГц. Произведено полномасштабное комплексное тестирование электроники сбора данных детектора. Обнаружены особенности в работе цифровых каналов приема-передачи данных, используемых в электронике системы сбора данных, приводившие к появлению наводок в новой электронике жидкокислородного калориметра. Произведена модернизация цифровых каналов приема-передачи данных, что позволило исключить данный источник наводок. Произведена модернизация

аппаратного и программного обеспечения системы сбора данных КМД-3 - организовано чтение данных и электроники через несколько независимых сетевых каналов. Продемонстрирована эффективная работа системы при частоте триггера до нескольких кГц.

На детекторе СНД была заменена электроника на катодных полосках трековой системы. Данные теперь считываются непосредственно с каждого модуля электроники по протоколу TCP/IP, что позволило распараллелить их чтение. Программное обеспечение системы сбора данных было адаптировано для чтения новой электроники. В результате этой модернизации максимальная скорость чтения событий с детектора возросла в 3 раза, с 1 кГц до 3 кГц.

8. Разработка и изготовление электроники азрогелевого счетчика детектора СНД для работы при высоких нагрузках на коллайдере ВЭПП-2000

В экспериментах на ВЭПП-2000 в 2010-2013 г. из-за наложений фона от пучков на записываемые события в некоторой части событий происходила потеря информации с системы азрогелевых черенковских счетчиков (АЧС). После модернизации комплекса ВЭПП-2000 (перехода на новый инжектор электронов и позитронов) ожидается существенное возрастание фоновой пучковой загрузки. Чтобы избежать потери информации была разработана и изготовлена новая электроника АЧС, основанная FACP с тактовой частотой 200 МГц FACP со считыванием данных по протоколу TCP/IP. Новая электроника позволила избежать потери информации, но существенно увеличило количество данных. Система сбора данных была модернизирована таким образом, что данные с электроники АЧС считываются отдельным процессом независимо от остальной электроники. Этот же процесс обеспечивает сжатие данных: подавления нулей и обработку осциллограммы, считываемой с FACP. После обработки с каждого сработавшего канала выдается два числа: время прихода сигнала и его интеграл. Разработанное программное обеспечение в конце 2016 года было проверено в реальных экспериментальных условиях.

9. Измерение каонного и протонного электромагнитных формфакторов на КМД-3 и СНД

В 2016 году закончены анализы и опубликованы работы по измерению электромагнитных формфакторов протона на детекторе КМД-

3 [14] и заряженного каона на детекторе СНД [15]. Оба анализа основаны на данных, накопленных во время экспериментов 2011-2012 годов на коллайдере ВЭПП-2000.

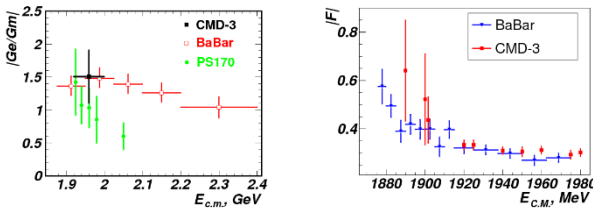


Рисунок 9.1. Слева: отношение электрического и магнитного формфакторов протона, измеренное в эксперименте КМД-3, в сравнении с результатами экспериментов BABAR [16] и PS170 [17]. Справа: Модуль эффективного протонного формфактора, измеренный в эксперименте КМД-3, в сравнении с результатами эксперимента BABAR [16].

Результаты измерения протонного эффективного формфактора и отношения электрического и магнитного формфакторов $|G_E/G_M|$ формфакторов показаны на рис. 9.1. Видно, что данные КМД-3 хорошо согласуются с данными BABAR [16]. Точность измерения эффективного формфактора слегка лучше, чем в эксперименте BABAR. Мы подтвердили наблюдение BABAR, что $|G_E/G_M|$ ниже 2 ГэВ превышает единицу.

Результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ показаны на рис. 9.2 в сравнении с данными наиболее точного предыдущего измерения в эксперименте BABAR [18]. Результаты этих двух измерений неплохо согласуются. Точность данных СНД не уступает точности данных BABAR.

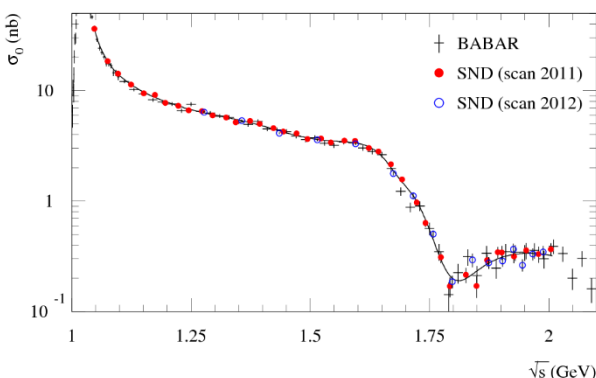


Рисунок 9.2. Измеренное СНД сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в сравнении с данными эксперимента BABAR [18].

10. Подготовка эксперимента по измерению тензорной асимметрии в реакции двух-ча-

стичной фотодезинтеграции дейтрона: конструирование адронных калориметров-сэндвичей, разработка и изготовление электроники программного обеспечения для новых дрейфовых камер и адронного калориметра

Эксперимент планируется провести в три этапа с энергиями пучка электронов 0.8, 1.2 и 2.0 ГэВ. При проведении эксперимента будет использована следующая аппаратура: модернизированная тензорно-поляризованная газовая внутренняя дейтериевая мишень, недавно созданная система мечения квазиреальных фотонов, а также новый двух-плечевой детектор частиц. Детектор частиц будет регистрировать протон-нейтронную пару от развала дейтрона на совпадениях, и, кроме того, процесс упругого (ed)-рассеяния при малых переданных импульсах для контроля поляризации мишени.

На первых двух этапах эксперимента в детекторе частиц, кроме некоторых старых (но модернизированных) элементов, будут использованы новые дрейфовые камеры (ДК), а также строящиеся адронные калориметры-сэндвичи (АКС). Для проведения третьего этапа эксперимента (при энергии пучка электронов 2.0 ГэВ) в целях улучшения идентификации сорта заряженных частиц потребуется создать многозорные резистивные плоские камеры (МРПК).

В отчетном году проведены работы по доведению новых дрейфовых камер до рабочего состояния: исправлены дефекты конструкции, выбраны режимы работы камер. Разработаны, отлажены, установлены на ДК усилители-формирователи. Создан стенд для работы ДК на космических частицах, оснащенный соответствующей электроникой оцифровки и сбора данных. Разработано программное обеспечение для набора данных на стенде, обработки и анализа получаемой информации. На стенде проведены испытания всех шести суперслоев ДК и измерены основные параметры. Измеренная на стенде эффективность камер составила 95%, а координатное разрешение ≈ 0.25 мм (см. рис. 10.1). Шесть супер-слоев ДК смонтированы в виде двух блоков (для двух плеч детектора частиц). Разработана и изготовлена система механической поддержки ДК на экспериментальном промежутке (см. рис. 10.1), которая предусматривает юстировку блоков в необходимых пределах.

Основное назначение адронного калориметра-сэндвича - регистрация нейтронов с высокой эффективностью и определение координат пролета нейтронов. В выбранной после тща-

тельного Монте-Карло моделирования конфигурации АКС эффективность регистрации нейтронов большой энергии (порядка 1 ГэВ) достигает 70%, а разрешение по углам влета (полярному и азимутальному) составляет около 1.6 градусов. Активная площадь АКС составит $1760 \times 1760 \text{ мм}^2$. Он будет содержать 10 периодов, в каждом из которых есть слой железа толщиной 16 мм, составленный из 11-ти полос с размерами $16 \times 160 \times 1900 \text{ мм}^3$ ("полезная" длина 1760 мм) и двух слоев пластических сцинтилляторов с толщиной 7 мм. Слои сцинтилляторов содержат по 22 сцинтилляционные полосы (СП) с размерами $7 \times 80 \times 1760 \text{ мм}^3$. Полосы сцинтилляторов в соседних слоях развернуты на 90 градусов для определения двух координат частиц по номеру сработавших полос.

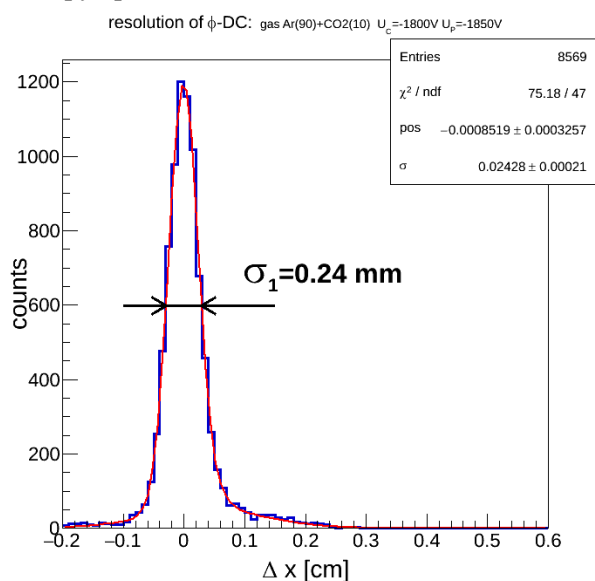


Рисунок 10.1. Вверху: гистограмма, демонстрирующая пространственное разрешение дрейфовой камеры, измеренное на стенде с помощью космических частиц. Внизу — фотография контрольной сборки блоков дрейфовых камер на экспериментальном промежутке с элементами поляризованной мишени.

Сбор света СП будет производиться с помощью спектросмещающих волокон, транспортирующих его к кремниевым фотоумножителям (КФУ). Волокна СП, расположенных друг под другом (группы по 10 шт.), будут собраны на один КФУ, что уменьшает в 10 раз как количество необходимых КФУ, так и каналов электроники. Такая экономия оправдана тем, что, хотя при таком походе в значительной степени теряется информация о распределении выделенной энергии вдоль треков регистрируемых частиц, - такая информация не особенно важна. К настоящему времени конструкция узлов АКС проработана, большая их часть находится в производстве.

Проведена модернизация конструкций, окружающих экспериментальный промежуток на накопителе ВЭПП-3, с целью возможности размещения, поддержки и юстировки АКС, габариты которых составляют $2.3 \times 2.3 \times 0.6 \text{ м}^3$, а вес каждого из них приближается к 5 т.

Заключение

Были получены следующие основные физические результаты:

1. В эксперименте ВЕС-III проведено прецизионное измерение электромагнитного формфактора пиона в диапазоне энергии в системе центра масс от 600 до 900 МэВ.
2. В эксперименте СНД проведено самое точное на сегодняшний день измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$ в диапазоне энергий в системе центра масс от 0.6 до 1.38 ГэВ [4, Приложение А].
3. Получены предварительные результаты по измерению анализирующей способности T_{20} реакции когерентного фоторождения нейтрального пиона на дейтроне, $\gamma + d \rightarrow \pi^0 + d$. Новые данные значительно превосходят по точности предыдущее измерение, сделанное также на ВЭПП-3.
4. В эксперименте КМД-3 проведено измерение электромагнитных формфакторов протона вблизи порога [3, Приложение А].
5. В эксперименте СНД проведено самое точное на сегодняшний день измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в диапазоне энергий в системе центра масс от 1.05 до 2.00 ГэВ [2, Приложение А].
6. Проведена частичная модернизация электроники и систем сбора данных детекторов СНД и КМД-3 для работы с высокой светимостью на модернизированном коллайдере ВЭПП-2000.

Список использованных источников

- [1] P. del Amo Sanchez *et al.* (BABAR Collaboration), Measurement of the $\gamma\gamma^* \rightarrow \eta$ and $\gamma\gamma^* \rightarrow \eta'$ transition form factors. *Phys. Rev. D* **84**, 052001 (2011).
- [2] B. Aubert *et al.* (BABAR Collaboration), Measurement of the $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ transition form factor, *Phys. Rev. D* **80**, 052002 (2009).
- [3] M. Ablikim *et al.* (BESIII Collaboration), Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section between 600 and 900 MeV using initial state radiation. *Phys. Lett. B* **753**, 629 (2016).
- [4] J. P. Lees *et al.* (BABAR Collaboration), Precise Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- (\gamma)$ Cross Section with the Initial-State Radiation Method at BABAR, *Phys. Rev. D* **86**, 032013 (2012).
- [5] F. Ambrosino *et al.* (KLOE Collaboration), Measurement of $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma (\gamma))$ and the dipion contribution to the muon anomaly with the KLOE detector, *Phys. Lett. B* **670**, 285 (2009); F. Ambrosino *et al.* (KLOE Collaboration), Measurement of $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$ from threshold to 0.85 GeV² using Initial State Radiation with the KLOE detector, *Phys. Lett. B* **700**, 102 (2011); D. Babusci *et al.* (KLOE Collaboration), Precision measurement of $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma)$ and determination of the $\pi^+\pi^-$ contribution to the muon anomaly with the KLOE detector, *Phys. Lett. B* **720**, 336 (2013).
- [6] R. R. Akhmetshin *et al.* (CMD-2 Collaboration), High-statistics measurement of the pion form factor in the rho-meson energy range with the CMD-2 detector, *Phys. Lett. B* **648**, 28 (2007).
- [7] M. N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ in the energy region $400 < \sqrt{s} < 1000$ MeV, *J. Exp. Theor. Phys.* **101**, 1053 (2005).
- [8] M.N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), 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.* (SND Collaboration), Experimental study of the $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ process in the energy region $\sqrt{s} = 0.60$ GeV - 0.97 GeV, *Phys. Lett. B* **559**, 171 (2003).
- [10] R. R. Akhmetshin *et al.* (CMD-2 Collaboration), Study of the processes $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$ in the c.m. energy range 600 MeV to 1380 MeV at CMD-2. *Phys. Lett. B* **605**, 26 (2005).
- [11] C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), *Chin. Phys. C* **40**, 100001 (2016).
- [12] F. Ambrosino *et al.* (KLOE Collaboration), Study of the process $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ in the ϕ -meson mass region with the KLOE detector. *Phys. Lett. B* **669**, 223 (2008).
- [13] I. A. Rachek *et al.*, Measurement of tensor asymmetry T20 in coherent π^0 photoproduction on deuteron. Talk given in 23th European conference on few-body problems in physics, Aarhus University, August 2016. <http://owwww.phys.au.dk/~efb23/presentations/rachek.pdf>.
- [14] R. R. Akhmetshin *et al.* (CMD-2 Collaboration), Study of the process $e^+e^- \rightarrow p$ anti-p in the c.m. energy range from threshold to 2 GeV with the CMD-3 detector, *Phys. Lett. B* **759**, 634 (2016).
- [15] M.N. Achasov *et al.*, Measurement of the $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ cross section in the energy range $\sqrt{s}=1.05-2.0$ GeV, *Phys. Rev. D* **94**, 112006 (2016).
- [16] J. P. Lees *et al.* (BABAR Collaboration), Study of $e^+e^- \rightarrow p$ anti-p via initial-state radiation at BABAR. *Phys. Rev. D* **87**, 092005 (2013).
- [17] G. Bardin *et al.* (PS170 Collaboration), Determination of the electric and magnetic form-factors of the proton in the timelike region. *Nucl. Phys. B* **411**, 3 (1994).
- [18] J. P. Lees *et al.* (BABAR Collaboration), Precision measurement of the $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\gamma$ cross section with the initial-state radiation method at BABAR. *Phys. Rev. D* **88**, 032013 (2013).

№ 15.3.1 Развитие концепции финальной фокусировки пучков Супер Чарм-Тау фабрики и других высокопроизводительных коллайдеров

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию концепции создания высокопроизводительных электрон-позитронных коллайдеров будущего, включая российский мегапроект «Супер Чарм-Тау фабрики», разрабатываемый в Новосибирске и проект FCC-ee с максимальной энергией пучков до 175 ГэВ и периметром 100 км, работа над которым начата в ЦЕРН. Одной из ключевых систем таких комплексов является система финального фокуса. Ниже приводятся результаты исследований элементов финального фокуса и некоторых аспектов динамики пучка, на которые эти элементы влияют, включая коррекцию натурального хроматизма и оптимизацию нелинейного энергетического акцептанса, на который сильные линзы финального фокуса оказывают существенное ограничивающее влияние. Полученные результаты существенно повышают перспективы реализации электрон-позитронных коллайдеров с методом встречи типа «краб-вэйст».

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

На предыдущих этапах выполнения проекта была разработана модель магнитного поля для элементов финального фокуса, показанных на рис. 1.1, показано распределение магнитного поля на оси детектора. Модель включает основной соленоид детектора с амплитудой продольного поля 2 Т, компенсирующий соленоид с полем 4 Т и экранирующий соленоид с полем 2 Т. На основе модели оптимизированы параметры соленоидального поля с целью получения приемлемого увеличения вертикального эмиттанса пучка.

Разработана компьютерная программа для моделирования движения частиц в магнитном поле финального фокуса, имеющего сложную трехмерную конфигурацию, в которой продольное распределение было разбито («слайсировано») на короткие отрезки, внутри которых поле считалось постоянным.

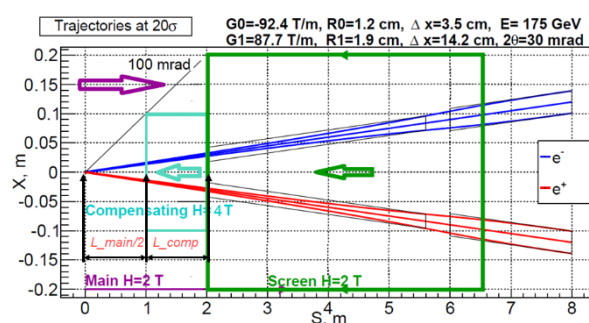


Рисунок 1.1. Схема размещения основных элементов системы финального фокуса.

С помощью программы Acceleraticum, разработанной в ИЯФ и учитывающей реальную магнитную структуру, синхротронное излучение и другие эффекты, оптимизирована динамическая апертура электрон-позитронного коллайдера с методом встречи типа Crab Waist, а также инжектора-бустера источника синхротронного излучения NSLS-II, разработанного и изготовленного в ИЯФ СО РАН для Брукхевенской национальной лаборатории США. Найдены параметры, обеспечивающие высокую светимость и эффективную инжекцию пучка.

Оптимизирован энергетический (динамический) акцептанс промежутка встречи с методом пересечения пучков типа Crab Waist с помощью коррекции хроматизма высокого порядка секступольными линзами, размещенными в правильно подобранных значениях набега бетатронной фазы. На рис.6 вверху показана исходная ситуация, когда энергетический акцептанс (устойчивая область бетатронных частот) составляет всего (-0.4%, +0.5%), внизу – результат оптимизации (-2.5%, +1.9%).

Разработан метод учета влияния и коррекции «крабовых» секступольных линз на динамику пучка. «Крабовые» секступоли используются в методе встречи пучков Crab Waist для взаимного разворота перетяжки сталкивающихся сгустков и компенсации «пучковых» резонансов связи.

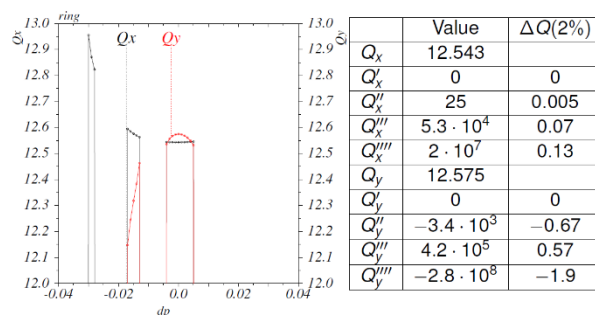


Рисунок 1.2. Акцептанс до оптимизации.

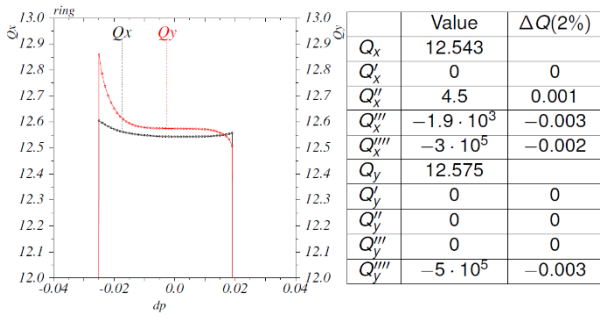


Рисунок 1.3. Акцептанс после оптимизации.

2. Разработка методов коррекции хроматизма финального фокуса высокопроизводительных коллайдеров

Получение маленьких бета-функций в месте встречи требует как можно более близкого расположения финальных линз к точке пересечения пучков. Перед линзами установлены соленоиды, компенсирующие продольное поле детектора. Так как обмотка основного соленоида детектора охватывает финальный дублет линз, они заключены в экранирующий соленоид, чтобы в линзах использовалась несвязанная оптика.

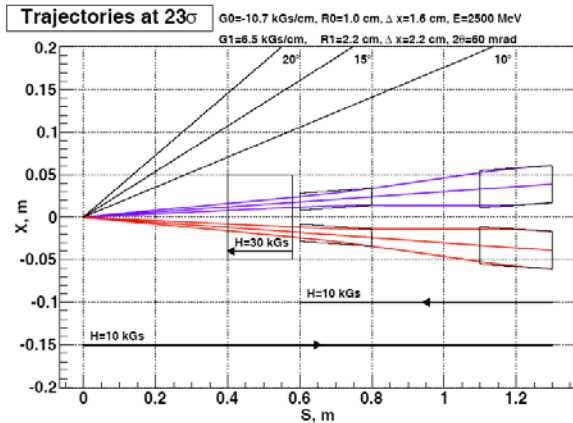


Рисунок 2.1. Схема места встречи, показаны траектории и огибающие пучков, компенсирующий, экранирующий и основной соленоиды, конусы в 10, 15 и 20 градусов.

На схеме рис. 2.1 показаны расположения основных элементов места встречи и трассы пучков. Финальная линза сделана двух-апертурной, чтобы входящий и выходящий пучки проходили по центру своей апертуры и не испытывали дипольного поля, генерирующего синхротронное излучение, которое создает существенную фоновую загрузку детектора. Угол встречи выбран таким, чтобы возможно было создать двух-апертурную линзу и получить требуемую светимость.

Маленькие величины бета функций в месте встречи приводят к большим величинам в финальных линзах, поэтому для компенсации хроматизма используются неперемежающиеся пары секступолей, разделенные $-I$ преобразованием внутри каждой пары. Для облегчения компенсации хроматических эффектов основой оптики промежутка встречи выбраны телескопические преобразования для основных частей промежутка встречи.

Оптические функции промежутка встречи показаны на рис. 2.2.

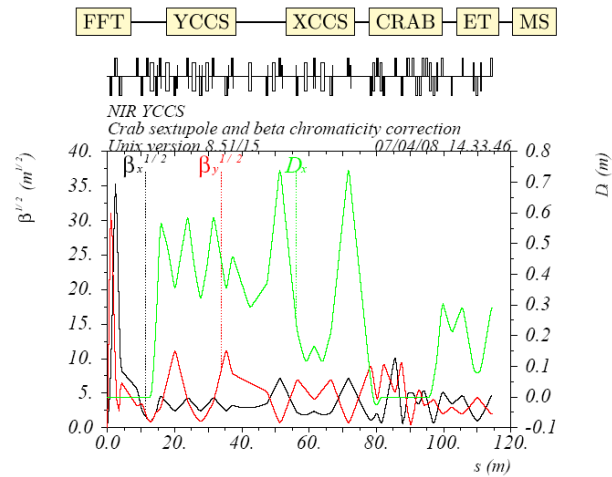


Рисунок 2.2. Оптические функции промежутка встречи. Сверху приведена блок-схема промежутка: FFT – финальный телескоп, YCCS и XCCS – секции коррекции хроматизма, CRAB – секция «крабовых» секступолей, ET – секция зануления горизонтальной дисперсионной функции и MS – секция согласования промежутка встречи и полукольца.

Первый (финальный) телескоп состоит из двух дублетов квадрупольных линз. Параметры телескопа выбраны с учетом следующих условий: бета функции на выходе должны быть согласованы с секцией коррекции хроматизма, считая, что хроматизм бета функции равен нулю в месте встречи, на выходе из финального телескопа он должен быть минимален.

Далее, следует секция коррекция хроматизма, корректирующая горизонтальный и вертикальный хроматизм места встречи. Она начинается с диполя, для возбуждения дисперсии для хроматических секступолей, и с дублета линз для обеспечения необходимых набега фазы и бета функций. Основная часть хроматизма бета функций возбуждается дублетом финальных линз, для его коррекции необходимы секступоли, отстоящие по соответствующей бетатронной фазе на $n\pi$. Коррекция геометрических aberrаций второго порядка секступолей

осуществляется расположением вторых секступолей, так что внутри пары соблюдается минус единичное преобразование. Для компенсации геометрических aberrаций третьего порядка, возникающих за счет конечной длины секступолей, после каждого основного секступоля поставлены (на небольшом расстоянии) корректирующие с силой около 10% от силы основного. Завершается секция 4 линзами и одним диполем, обеспечивая зануление дисперсии и телескопическое преобразование. Силы основных секступолей выбираются из условия хроматической прозрачности всего промежутка встречи. То есть, если на входе в промежуток имеются нулевые хроматизмы бета и альфа функций, нелинейной дисперсии, то и на выходе они должны быть тоже нулевыми. При этом основных секступолей оказывается недостаточно, поэтому установлены еще один секступоль (не нарушающий $-I$ пары) с силой меньше 30% от силы основных секступолей. Для уменьшения силы этих дополнительных секступолей, секция коррекции горизонтального хроматизма сдвигается по фазе относительно соответствующей финальной линзы.

3. Разработка методов увеличения энергетического акцептанса финального фокуса

Сильный хроматизм линз финального фокуса приводит к тому, что для частиц с неравновесной энергией частота бетатронных колебаний меняется и, приближаясь к резонансному значению, делает движение неустойчивым. Для сильной хроматичности расчетов зависимости частоты от импульса оказывается недостаточно, и были выведены выражения в следующих порядках (до четвертого включительно). Полученные выражения позволяют, используя линейную структуру и нелинейные элементы (секступольные и октупольные линзы) управлять зависимостью частоты бетатронной амплитуды от импульса вплоть до четвертого порядка. Рис. 3.1 показывает пример увеличения энергетического акцептанса финального фокуса коллайдера FCC-ee.

4. Разработка и создание прототипа линзы финального фокуса со спиральными сверхпроводящими обмотками

Жесткие требования предъявляются к линзам финального фокуса электрон-позитронных коллайдеров с технологией встречи типа «краб-вэйст». Такие линзы ставятся в непосредственной близости к месту встречи (0.3-1 м) внутри детектора и поэтому должны быть очень

компактными (чтобы не перекрывать телесного угла детектора). Кроме того, они должны обладать достаточно большим градиентом на уровне 60-100 Т/м. Рассматриваются различные варианты конструкции таких линз. Одним из возможных вариантов является линза со спиральными сверхпроводящими обмотками (рис. 4.1). По сравнению с обычной «косинусной» линзой такая конструкция более проста, поскольку не требует изгиба сверхпроводника малым радиусом на конце обмотки, и, соответственно, более надежна.

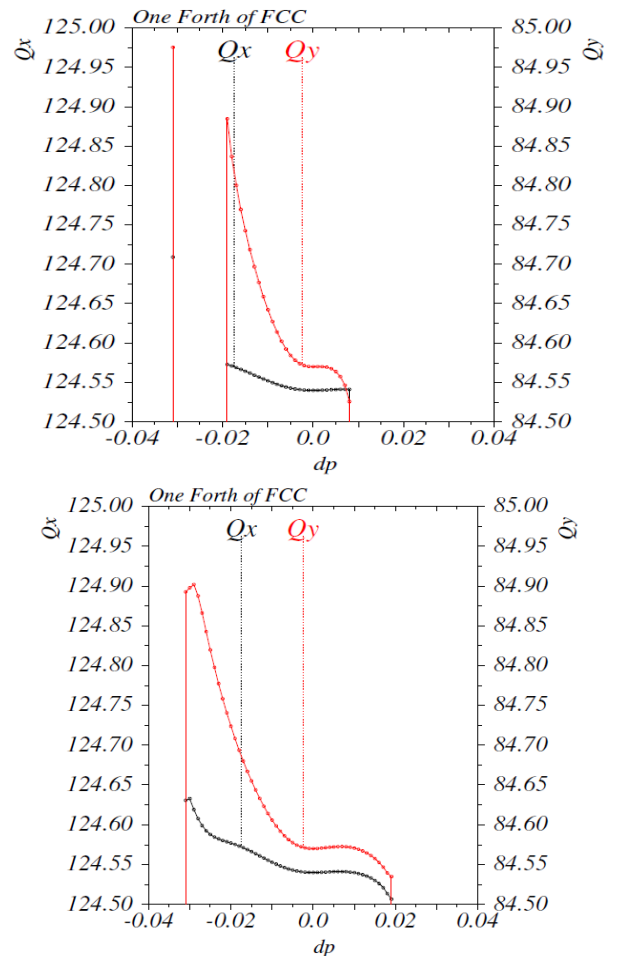


Рисунок 3.1. Энергетический акцептанс финального фокуса коллайдера до увеличения (вверху, -1.9%;+0.8%) и после (внизу, -3.1%; +1.9%).

В рамках рассматриваемого проекта были проведены расчеты трехмерного распределения магнитного поля линзы со спиральной намоткой (рис. 4.2). Проведено проектирование прототипа линзы с нормальнопроводящими обмотками для отработки технологии и изучения характеристик магнитного поля.

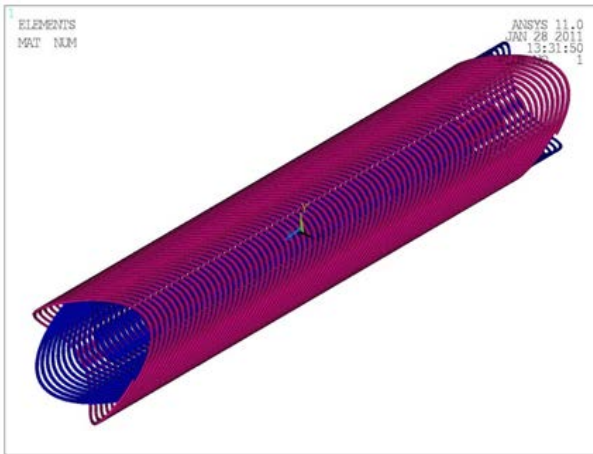


Рисунок 4.1. Схема намотки двухслойной сверхпроводящей линзы со спиральными обмотками (вверху). Оправка для намотки прототипа линзы (внизу).

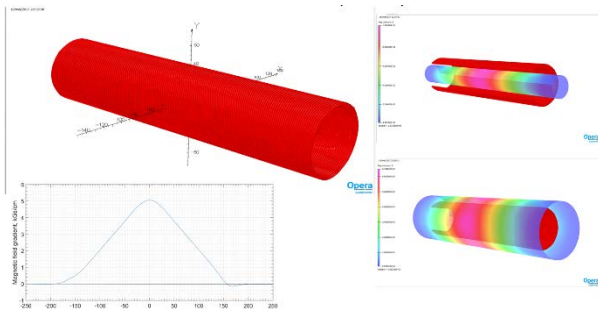


Рисунок 4.2. Геометрия и трехмерное распределение магнитного поля линзы со спиральными обмотками.

5. Исследование линз финального фокуса с градиентом 100 Т/м и больше

Для исследований линз финального фокуса был изготовлен одноапертурный прототип двухапертурной линзы, показанной на рис. 5.1.

Прототип линзы изображен на рис. 5.2 слева. Прототип был помещен в тестовый криостат и охлажден до температуры жидкого гелия. Затем в обмотку прототипа линзы был задан ток, который достиг рабочего значения после всего двух срывов. Такая короткая тренировка показывает приемлемое качество конструкции и изготовления.

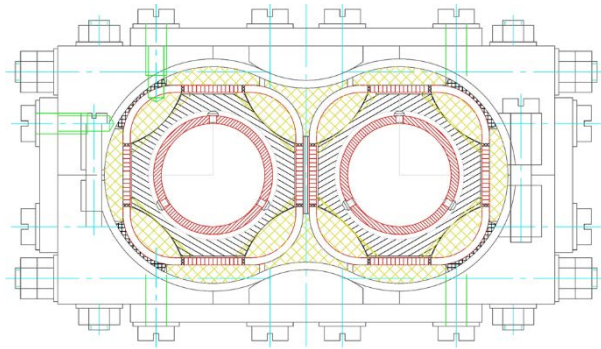


Рисунок 5.1. Чертеж общего вида линзы финального фокуса с торца.

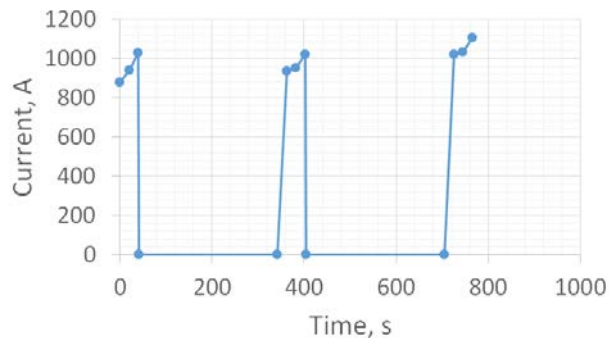


Рисунок 5.2. Фотография прототипа линзы (вверху) график задания тока в сверхпроводящую обмотку линзы (внизу). Рабочий ток 1100-1200 А.

Заключение

Рассмотрены вопросы коррекции хроматизма финального фокуса коллайдеров. Показаны возможные варианты оптимизации энергетического акцептанса. Получены выражения зависимости частоты бетатронных колебаний от неравновесного импульса частицы до четвертого порядка по параметру малости включительно. Рассмотрены различные варианты конструкции сверхпроводящих линз финального фокуса (в т.ч., по технологии намотки спиральных обмоток). Начато исследование прототипа линзы финального фокуса.

Список использованных источников

- [1] A.V. Bogomyagkov, E.B. Levichev, P.A. Piminov [Interaction Region Lattice for FCC-ee \(TLEP\)](#) Proc. of IPAC 2014, Dresden, Germany, 3779-3781.
- [2] I. Okunev et al. Field measurements of magnets for modern SR sources and FEL, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, June 2016.
- [3] I. Okunev et al. X-FEL quadrupole with gradient 100 T/m, Physics Procedia, 84C, 2016, 101-107.
- [4] M.Benedikt, K.Oide, F.Zimmermann, A.Bogomyagkov, E.Levichev, M.Migliorati, U.Wienands, Status and Challenges for FCC-ee, <http://arxiv.org/abs/1580.03363>, p.12.
- [5] K.Oide,..., A.Bogomyagkov,..., E.Levichev et al. Design of beam optics for the future circular collider e+e- collider rings. PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 19, 111005 (2016).
- [6] A. Bogomyagkov, E. Levichev and P. Piminov. Final focus design for crab waist colliders. PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 19, 121005 (2016)

№ 15.3.2 Развитие методов получения высокой интенсивности электронных и позитронных пучков ускорительного комплекса ВЭПП-4 для экспериментов по ФВЭ, ядерной физике и СИ

Введение

Комплекс ВЭПП-4 состоит из уникальных установок для проведения экспериментов со встречными пучками, пучками синхротронного излучения, пучками жестких рентгеновских квантов, ядерной физики. Комплекс ВЭПП-4 включает в себя инжектор электронов и позитронов, накопитель ВЭПП-3 (энергия пучка до 2 ГэВ), электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М (энергия пучка до 6 ГэВ) с универсальным детектором КЕДР. ВЭПП-4М является модернизированным коллайдером ВЭПП-4, работавшим на эксперименты по физике высоких энергий с 1977 года. Модернизация позволила значительно увеличить светимость. Детектор КЕДР — это универсальный магнитный детектор, позволяющий проводить эксперименты по физике высоких энергий в области от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс.

Кроме физики высоких энергий, на накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М проводятся эксперименты с использованием синхротронного излучения и пучками жестких гамма-квантов. Основные направления — материаловедение, исследование взрывных процессов, археология, биомедицина, нанотехнологии и т.д.

На накопителе ВЭПП-3 также проводятся эксперименты по ядерной физике на внутренней газовой мишени, позволяющие получить уникальную информацию о структуре и свойствах протона.

Кроме того, на комплексе ВЭПП-4 регулярно проводятся эксперименты по исследованию динамики пучка и физики ускорителей.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Для создания новых станций синхротронного излучения на коллайдере ВЭПП-4М активно велись работы по запуску канала вывода синхротронного излучения (СИ) из семи-полюсного вигглера, установленного для генерации мощных пучков СИ. В частности, для тонкой юстировки в экспериментальном зале СИ была выставлена геодезическая сеть, совмещенная с геодезической сетью комплекса

ВЭПП-4М, позволившая достигнуть точности первоначальной установки канала излучения вигглера лучше, чем 1 мм. Также были проведены точные выставки радиационно-защищенных объемов экспериментальных станций. Точность подтверждена экспериментальными данными. Для обеспечения возможности работы с высокоинтенсивными пучками СИ на вигглере канал радиационный затвор канала был усилен установкой дополнительного поглотителя излучения с водным охлаждением запорного элемента. Поглотитель был успешно испытан во всех рабочих режимах.

Кроме того, для генерации жесткого рентгеновского излучения используется 7-полюсная электромагнитная «змейка» (тип магнита) с полем 13 кГс. Эксперименты с излучением из змейки проводятся на станциях синхротронного излучения «Фазоконтрастная рентгенокопия и рентгено-флуоресцентный анализ в жестком спектре СИ» и «Исследование экстремального состояния вещества».

Для увеличения жесткости излучения, режим генерации излучения из змейки проводился на максимальной доступной в настоящее время энергии пучка накопителя ВЭПП-4М равной 4 ГэВ. Для получения основного режима с максимальным полем в змейки была произведена коррекция параметров накопителя. Разработана система подавления дипольных вертикальных колебаний для интенсивности рентгеновского излучения. Для экспериментов с временным разрешением, в накопителе ВЭПП-4М были получены режимы с одним сгустком электронов (1.2 мксек), с двумя сгустками, расположенными через половину периметра накопителя (0.6 мксек) и с четырьмя сгустками, расположенными через четверть периметра накопителя (0.3 мксек).

Для проведения долговременных экспериментов с пучками синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М была разработана и внедрена в систему управления комплекса процедура автоматической стабилизации орбиты пучка электронов (по вертикали и по горизонтали). Измерения орбиты производится по датчикам положения пучка, а коррекция осуществляется малым числом корректоров.

Для проведения экспериментов по физике высоких энергий и экспериментов с пучками синхротронного излучения и жестких гамма-квантов на установке «выведенный пучок», требуется ускорение электронов и позитронов в ВЭПП-4М до энергии 4 ГэВ. Для этой цели была осуществлена настройка параметров накопителя на промежуточных энергиях. Для работы на высокой энергии была увеличена

сила сосредоточенной секступольной линзы, расположенной вблизи системы финального фокуса и имеющей бета-функцию существенно больше чем в элементах периодичности.

Для увеличения скорости подъема энергии пучков частиц в ВЭПП-4М было разработано и внедрено в автоматизированную систему управления комплексом процедура динамической коррекции оптики накопителя в процессе ускорения частиц. Экспериментальным путём были определены значения дипольной и квадрупольной коррекции оптики, что позволило повысить скорость ускорения частиц в три раза и достичь значения 10 МэВ/с.

2. Подготовка к переходу на инжекцию пучков электронов и позитронов из инжекционного комплекса. Настройка работы коллайдера ВЭПП-4М с инжекционным комплексом

До настоящего времени комплекс ВЭПП-4 использовал в качестве источника электронов и позитронов инжектор Позитрон, интенсивности которого было достаточно для проведения экспериментов с пучками синхротронного излучения и экспериментов по физике элементарных частиц с детектором КЕДР на низкой энергии коллайдера ВЭПП-4М (до 1.85 ГэВ). С переходом коллайдера ВЭПП-4М на энергию выше 1.85 ГэВ интенсивность инжектора Позитрон является не достаточной, т.к. максимальные пороговые токи по эффектам встреч — одному из основных эффектов, ограничивающему интенсивности пучков — растут как третья степень энергии. В связи с этим, принято решение по использованию в качестве источника частиц Инжекционный комплекс (ИК). В таблице 2.1 приведено сравнение инжектора Позитрон и ИК.

Таблица 2.1. Параметры инжектора Позитрон и ИК.

	Позитрон	ИК	
Энергия	355	400	МэВ
Частота накопления	1	10	Гц
Частоты выпуска	1	1	Гц
Интенсивность	10^8	$2 \cdot 10^9$	$e^+/\text{сек}$

ИК комплекс состоит из источника электронов (электронная термо-пушка), линейного ускорителя электронов, конверсионной си-

стемы, линейного ускорителя позитронов, накопителя-охладителя и транспортных каналов. Накопитель-охладитель инжекционного комплекса будет связан с накопителем ВЭПП-3 с помощью транспортного канала К-500, состоящего из участка спуска, длинного прямолинейного канала, участка подъема в зал ВЭПП-3.

В настоящее время выполнены все работы по монтажу транспортного канала К-500: собраны все элементы магнитной и вакуумной системы канала, получен вакуум, проведен электромонтаж системы питания, т.д. Проведена работа по модернизации системы синхронизации комплекса ВЭПП-4: ВЧ-система накопителя ВЭПП-3 автоматически синхронизируется с ВЧ-системой накопителя-охладителя ИК на время инжекции частиц.

3. Выбор режимов коллайдера ВЭПП-4М для проведения экспериментов с детектором КЕДР в диапазоне энергии от 4 до 8 ГэВ в системе центра масс

В настоящее время на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР ведется подготовка к проведению экспериментов по физике высоких энергий в диапазоне от 4 до 8 ГэВ в системе центра масс. В связи с этим была проведена работа по получению режимов коллайдера в этом диапазоне энергий с шагом 250 МэВ. В этих режимах были проведены следующие мероприятия.

1. Проведена коррекция замкнутой орбиты пучка частиц с помощью дипольных корректоров.
2. Коррекция оптики накопителя к расчетной с помощью градиентной коррекций квадрупольных линз.
3. Коррекция вертикальной дисперсионной функции накопителя с помощью скью-квадрупольных корректоров в элементах периодичности накопителя и отдельно стоящих скью-квадрупольных линз. Осуществлена компенсация связи бетатронных колебаний.
4. Осуществлена коррекция натурального хроматизма в помощью распределенной секступольной коррекции и двух семейств отдельно стоящих линз.
5. Выполнена настройка системы электро-статического разведения. Для разведения двух электронных и двух позитронных сгустков в накопителе ВЭПП-4М используется система электро-статического разведения пучков. Значения генераторов были подобраны так чтобы развести сгустки в паразитных местах

встречи и скомпенсировать их влияние вне этих мест, включая основное место встречи, где пучки встречаются.

4. Расчет и конструирования нового многополюсного магнита для генерации синхротронного излучения в накопителе ВЭПП-4М

В ИЯФ СО РАН разрабатывается новый магнит со знакопеременным полем (вигглер) для генерации синхротронного излучения, который предполагается установить на накопитель ВЭПП-4М взамен существующего вигглера. Данный вигглер обладает более высоким полем и большим числом полюсов (меньшим периодом поля), что позволит увеличить поток жестких гамма-квантов. Это позволит значительно расширить программу исследований с синхротронным излучением реализуемую в ИЯФ СО РАН. В таблице 4.1 приведены сравнительные характеристики вигглеров.

Таблица 4.1. Параметры существующего и нового вигглера.

Параметр		Существующий	Новый
Максимальное поле	T	1.2	2.05
Длина периода	cm	20	14
Количество основных полюсов		5	7
Всего полюсов		7	9
Межполюсной зазор	cm	4	3

Поле в вигглере формируется 7 полюсами из электротехнической стали с электрообмотками. По краям поля устанавливаются по одному полюсу с половинным интегралом поля для зануления искажения траектории частицы. Увеличение поля вигглера достигается за счет уменьшения межполюсного зазора до 30 мм, а также за счет использованию постоянных магнитов из NbFeB, установленных между полюсами (рис. 4.1). Благодаря использованию постоянных магнитов данный вигглер называется гибридным.

Для питания гибридного вигглера требуется более мощный источник питания. Проведены расчеты и разработан проект модернизации источника питания существующего вигглера.

Из-за уменьшения межполюсного зазора, для постановки гибридного вигглера требуется заменить вакуумную камеру. В связи с

этим, выполнено конструирование новой вакуумной камеры с уменьшенным зазором.

Выполнены расчеты магнитного поля вигглера. В полном объеме выполнено конструирование всех узлов вигглера, в том числе и новой вакуумной камеры.

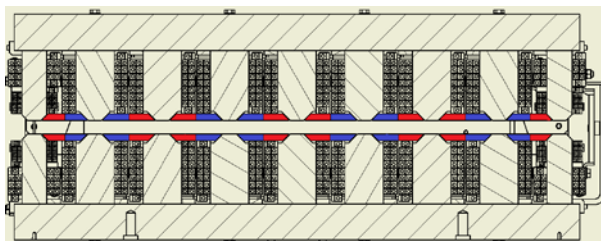


Рисунок 4.1. Гибридный вигглер с постоянными магнитами между полюсами.

5. Оптимизация работы ускорителя ВЭПП-4М для работы с использованием синхротронного излучения

Эксперименты с синхротронным излучением на накопителе ВЭПП-4М проводятся с пучками электронов с энергии 4 ГэВ. Т.к. максимальная энергия инжекции в ВЭПП-4М равна 1.85 ГэВ, требуется ускорение частиц в накопителе ВЭПП-4М. Из-за нестационарного режима работы всех систем ускорителя, а также тепловых уходов магнитных элементов, орбита циркулирующего пучка электронов искажается и, в свою очередь, меняется положение источника излучения, что осложняет проведение долговременных экспериментов с пучками СИ.

Для стабилизации орбиты в накопителе ВЭПП-4М разработана процедура автоматической коррекции орбиты с помощью магнитов с дипольной компонентой поля в горизонтальном и вертикальном направлении. Измерение орбиты производится с помощью системы датчиков положения пучка. Коррекция орбиты осуществляется к орбите, записанной в определенный момент, когда излучение выводится во все экспериментальные каналы СИ, время жизни пучка частиц максимально.

6. Запуск новой управляющей малошумящей электроники системы подавления когерентных поперечных колебаний для увеличения интенсивности пучка накопителя ВЭПП-4М

Цифровая система поперечной обратной связи, работающая на комплексе ВЭПП-4М, была спроектирована для подавления неустойчивостей пучков заряженных частиц, вызванных их электромагнитным взаимодействием со структурой ускорительного комплекса или со

встречными пучками. Основными режимами работы системы было обеспечение впуска и подъема до энергии 5 ГэВ 2-х электронных и 2-х позитронных сгустков при среднем токе 40 мА. В настоящее время потребность в увеличении интенсивности пучков в накопителе существенно ограничивается как устаревшей конфигурацией системы, так и шумовыми характеристиками ее электроники. Для удовлетворения этих требований, а также решения большинства перспективных задач в ближайшем будущем, была разработана новая система обратной связи (рис. 6.1.).

Основная модернизация новой системы, все модули которой выполнены в стандарте евромеханики, коснулась входной и выходной электроники. Новая многоканальная пикап-станция с малошумящей электроникой, цифровым управлением и индикацией обладает повышенной чувствительностью, и используется для измерения и масштабирования сумма-разностных сигналов положения пучков позитронов и электронов. Использование модуля вычитания равновесной орбиты пучка позволяет увеличить ее входной динамический диапазон.

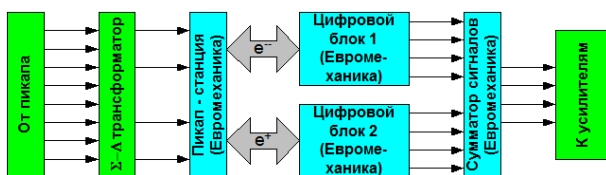


Рисунок 6.1. Блок схема системы поперечной обратной связи ВЭПП-4М.

С целью повышения вычислительной мощности системы и независимого (отдельно для электронов и позитронов) расчета поведения пучков в сепаратрисе, используются два аналого-цифровых модуля обработки сигналов с пикап-станции и выдачи необходимого аналогового сигнала подавления колебаний пучка.

Сопряжение каналов системы обратной связи для разных типов пучков с силовой частью осуществляется с помощью сумматора сигналов коррекции пучка. Данный модуль используется также для диагностика работы силовой части системы и может применяться для масштабирования выходных сигналов, что позволяет уменьшить выходные шумы дискретизации ЦАП.

Новая система обратной связи позволяет:

- работать с любой конфигурацией пучков, востребованных для текущих и перспективных задач на комплексе, без потери времени на переконфигурирование системы;

- автоматизировать и синхронизировать между собой все ее модули;
- осуществлять специальные режимы работы обратной связи, в том числе, измерять бета-тронные частоты в режиме подавления колебаний и производить оптимизацию режима работы системы для минимизации шумов, воздействующих на пучок.

В настоящий момент новая система запущена в холостом режиме, с целью проверки программного обеспечения для базовых режимов работы и подтверждения технических параметров.

7. Постановка и наладка системы подавления когерентных фазовых колебаний для увеличения интенсивности пучка накопителя ВЭПП-3

Система предназначена для увеличения декремента когерентных фазовых колебаний пучка накопителя ВЭПП-3 при работе его с двумя сгустками электронов или позитронов. Запуск системы позволит накапливать в накопителе большие токи и повысит эффективность установки. Система использует пикап-электрод, выделяющий сигналы четной и нечетной гармоник (16, 20 МГц) частоты обращения, наведенных токами сгустков. Эти сигналы поступают в цепи обратных связей для подавления соответственно синфазной и противофазной мод синхротронных колебаний. Каждый из сигналов приходит на фазовый детектор, выходной сигнал которого после соответствующей коррекции управляет балансным модулятором канала. Выходные сигналы балансных модуляторов каналов суммируются и подаются на усилитель мощности 1 кВт. Усилитель нагружен на широкополосный резонатор с продольным электрическим полем. Полоса пропускания усилителя и резонатора 16÷20 МГц.

В настоящее время резонатор изготовлен, испытан и установлен в кольцо. Постановка резонатора ОС потребовала развакуумирования участка прямолинейного промежутка накопителя ВЭПП-3. После постановки резонатора вакуум восстановлен, проведены вакуумные тесты, произведено обезгаживание вакуумной камеры накопителя ВЭПП-3.

Комплект маломощной электроники также готов и установлен в радиостойку. Проверена правильная обработка сигналов от пикап-электродов электроникой. Изготовлен источник питания усилителя 200 В, 2 кВт.

8. Оптимизация работы коллайдера ВЭПП-4М для получения максимальной светимости

Интегральная светимость коллайдера (число полезных событий) определяется временем набора светимости, токами пучков электронов и позитронов, геометрической светимостью. Максимальные токи пучков ограничены эффектами встреч и в коллайдере ВЭПП-4М они достигаются после инъекции новой порции частиц из накопителя ВЭПП-3. Между инъекциями интенсивность пучков электронов и позитронов экспоненциально падает, эффекты встреч ослабевают, меняются поперечные размеры пучков, и, в свою очередь, меняется геометрическая светимость.

Для поддержания оптимальной светимости (максимальной геометрической светимости) при разном уровне токов пучков требуется производить оптимизацию оптики коллайдера: перестраивать связь бетатронных колебаний с помощью группы скью-квадрупольных линз, настраивать сведение пучков с помощью пластин электростатики, оптимизировать бетатронные частоты, и т.д.

На коллайдере ВЭПП-4М разработана автоматическая процедура оптимизации светимости, встроенная в систему управления комплексом. В качестве функции-цели используется измеренная светимость. Измерение светимости осуществляется с помощью монитора светимости, основанного на процессе однократного тормозного излучения. Элементы, участвующие в оптимизации, а также их параметры определены экспериментально. Оптимизация осуществляется непрерывно, что позволяет получить максимальную геометрическую светимость при разных интенсивностях пучков электронов и позитронов. При необходимости, процесс оптимизации может быть отключен и настройка коллайдера выполнена в ручном режиме.

Заключение

При выполнении научно-исследовательской работы были получены следующие результаты:

1. Выполнена подготовка к переходу на инъекцию пучков электронов и позитронов из инжекционного комплекса.
2. Произведена настройка режимов работы коллайдера ВЭПП-4 для проведения экспериментов с детектором КЕДР в диапазоне энергии от 4 до 8 ГэВ в системе центра масс.
3. Выполнен расчет и конструирование нового многополюсного магнита для генерации синхротронного излучения в накопителе ВЭПП-4М.
4. Проведена оптимизация работы ускорителя ВЭПП-4 для работы с использованием синхротронного излучения.
5. Осуществлен запуск новой управляющей малошумящей электроники системы подавления когерентных поперечных колебаний пучка в накопителе ВЭПП-4М.
6. Выполнена постройка и наладка системы подавления когерентных фазовых колебаний пучка в накопителе ВЭПП-3.
7. Произведена оптимизация работы коллайдера ВЭПП-4 для получения максимальной светимости.

№ 15.3.3 Развитие метода круглых пучков при работе коллайдера ВЭПП-2000 для экспериментов по физике высоких энергий в широком диапазоне энергий

Введение

В отчёте представлены результаты работ по развитию метода круглых встречных пучков в электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. В 2016 году были, фактически, завершены работы по созданию экспериментальной установки, которая позволит достичь высокой проектной светимости коллайдера во всём диапазоне энергий от 150 МэВ до 1 ГэВ в пучке. Полученные в 2016 году и описанные в отчёте результаты исследований наглядно демонстрируют работоспособность всех отдельных систем ускорительного комплекса, успешную работу с пучками Инжекционного Комплекса ИЯФ СО РАН. Все основные параметры, в т.ч. параметры пучка, соответствуют расчётным значениям. Начата работа по набору статистики двумя детекторами коллайдера.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

На предыдущих этапах выполнения проекта была выполнена модификация магнитных элементов БЭП с целью повышения уровня поля и компенсации хроматизма фокусировки во всём диапазоне энергий. Для достижения полей в 26 кГс на энергии 1 ГэВ были значительно доработаны конструкции дипольных магнитов БЭП, квадрупольных линз с секступольной компонентой.

Для искажения орбиты перед выпуском из БЭП и подведения пучка к ножу септум-магнита были созданы новые импульсные С-образные, т.н. ВУМР-магниты шихтованные магниты, расположенные в двух прямолинейных промежутках. Для этих участков также сконструирована и изготовлена новая вакуумная система, включающая порты вакуумной откачки.

Для дипольных магнитов и квадрупольных линз были проведены измерения карты поля на различных токах, исследовано распределение краевых полей, определены зависимости эффективного поля, мультипольные гармоники интегрального поля (для линз).

Кольцо БЭП было полностью собрано, проведено точное позиционирование с привязкой к геознакам с точностью выставки ± 50 мкм,

собрана вакуумная камера (Рис. 1.1) подключена система охлаждения, проведены контрольные тесты и измерения.

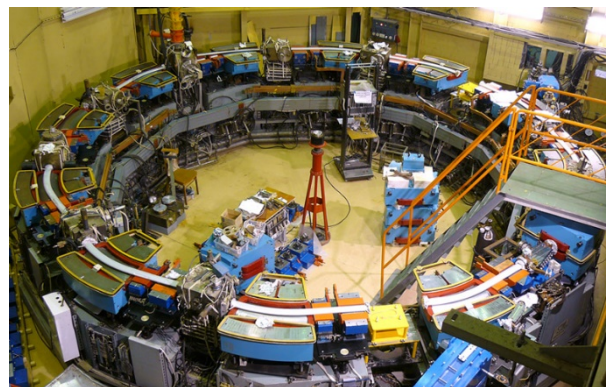


Рисунок 1.1 Сборка вакуумной камеры.

Для инжекции и захвата пучков электронов и позитронов из канала К-500 были изготовлены и установлены два новых импульсных магнита: т.н. «доворачивающий» (PM1) и впускной (PM2) с длительностью импульса около 100 мкс, к ним подведен специальный импульс от блока синхронизации, отвечающего за совместную работу Накопителя-Охлаждителя ВЭПП-5 и бустера БЭП.

Для успешного перепуска пучков на энергии 1 ГэВ из бустера БЭП в кольцо ВЭПП-2000 была проведена существенная модернизация перепускного канала с изготовлением новых элементов магнитной системы и вакуумной камеры. Все элементы готовы к работе, проведены магнитные измерения полей. Для диагностики пучка при работе на энергии 1 ГэВ с большим током до 200 мА была проведена замена зеркал вывода СИ для диагностики.

Кроме того, для настройки рабочего режима были созданы программы автоматической настройки светимости, которые позволили сократить время настройки до нескольких часов (с нескольких дней).

2. Инжекция и захват в модернизированный накопитель БЭП пучков электронов и позитронов из канала К-500

В январе 2016 года от Инжекционного Комплекса (ИК) пучок электронов был приведён по каналу транспортировки К-500 до ускорительного комплекса ВЭПП-2000. К этому моменту сборка бустерного синхротрона БЭП после глубокой его модернизации была завершена: собраны и скоммутированы по питанию и охлаждению магнитные элементы; собрана вакуумная система, получен рабочий уровень вакуума; включён и оттренирован новый ВЧ-

резонатор; для первичного захвата установлены камеры видеонаблюдения. Также были проведены работы по синхронизации быстрых импульсов инфлектора с временем прилёта пучка. Первый пучок электронов с энергией 390 МэВ был захвачен в кольцо 27.01.2016 (см. Рис. 2.1).



Рисунок 2.1 Синхротронное излучение первого захваченного в БЭП циркулирующего пучка электронов.

Далее последовал этап рутинной работы по настройке проводки и коэффициента перепуска, юстировке магнитных элементов и системы диагностики. Для выхода на рабочий уровень динамического вакуума БЭП работал в многоступковом режиме с током пучка до 500 мА для обезгаживания вакуумной камеры синхротронным излучением (СИ).

Для захвата позитронного пучка накопитель БЭП меняет полярность всей магнитной системы. Инжекция позитронов происходит аналогично работе с пучком электронов, однако требуется отдельно производить синхронизацию импульсов инфлектора с точностью до 5 нс. Пучок позитронов от ИК был захвачен в июне 2016 года.

3. Ускорение частиц в БЭП до энергии 1 ГэВ и отладка выпуска с использованием новых импульсных магнитов для искажения орбиты

При ускорении пучка в БЭП происходит синхронный подъем магнитного поля во всех элементах кольца. Все основные магнитные элементы (дипольные магниты и квадрупольные линзы) запитаны последовательно от одного источника питания (10 кА, 250 В), однако при вы-

соком уровне поля происходит сильное насыщение железа магнитопроводов, и поле с током меняется нелинейно, причём кривая насыщения зависит от конструкции конкретного магнитного элемента. Это может приводить к искажениям равновесной орбиты, а также дрейфу рабочей точки, искажениям структурных функций, вплоть до потери устойчивости поперечных колебаний. На этапе проектирования модернизации БЭП были предприняты меры для унификации кривых насыщения диполей и двух типов квадрупольных линз (см. Рис. 3.1). Необходимая для компенсации хроматизма секступольная компонента поля, заложенная в квадрупольях с помощью специального асимметричного профилирования полюсов, которая неизбежно насыщается на высокой энергии, была с упреждением увеличена на 30%. После доработки магнитных элементов были проведены магнитные измерения, которые показали хорошее согласие с расчётами.

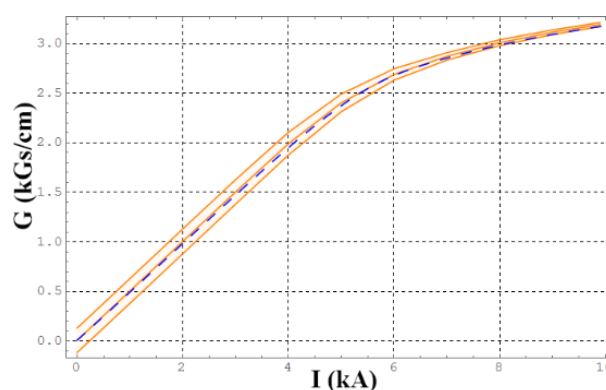


Рисунок 3.1 Кривая насыщения квадрупольных QF (центральная оранжевая линия) с «коридором», соответствующим возможностям корректирующих катушек QX. Синяя штрихованная линия показывает перенормированную кривую насыщения диполей.

Также был модифицирован источник питания основного поля для достижения тока свыше 10 кА, что необходимо для достижения энергии 1 ГэВ.

Летом 2016 года были проведены тестовые ускорения в БЭП пучка малой интенсивности. Пучок с током 1.5 мА был ускорен до энергии 998 МэВ, что соответствует току питания 10.3 кА, напряжению 244 В (см. Рис. 3.2). При этом в шинах выделяется мощность свыше 2.5 МВт. Планируется работать с ускорением до максимальной энергии лишь на краткий период (2-3 с), необходимый для выпуска пучка.

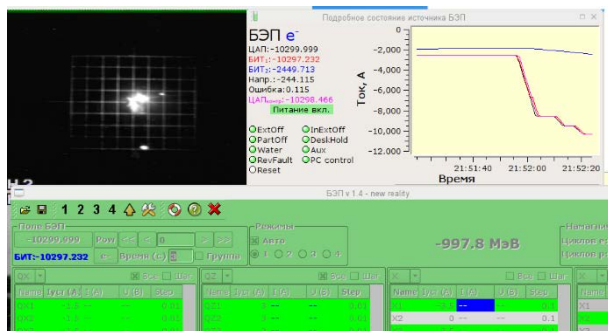


Рисунок 3.2 Фрагмент «рабочего стола» оператора при тестовом ускорении в БЭП до высокой энергии, с изображением пучка (слева сверху), монитором источника питания основного поля (справа сверху) и программой управления магнитными элементами бустера.

Ускорение интенсивного пучка в БЭП было ограничено мощностью предусилителя ВЧ-генератора. Для устранения этого ограничения был создан новый 200 Вт предусилитель, что позволяет получать напряжение свыше 100 кВ (что необходимо на энергии 1 ГэВ, вследствие потерь на синхротронное излучение 70 кэВ/оборот) на нагруженном пучком резонаторе. Также, для подавления пучковых неустойчивостей и стабильной работы ВЧ-системы при захвате и выпуске пучка был отлажен т.н. ТХ-режим работы резонатора, с сильной его расстройкой.

Для выпуска из БЭП используется система адиабатического искажения равновесной орбиты специальными импульсными магнитами (т.н. ВUMP). До модернизации для этого использовались 4 корректирующие катушки в основных диполях, которые становились крайне неэффективны при насыщении железа на высокой энергии, это, в частности, ограничивало энергию выпуска на уровне 800 МэВ. Теперь искажение орбиты такой же амплитуды 25 мм возле ножа выпускного септума создаётся специализированными магнитами с небольшим полем 1.7 кГс (при энергии 1 ГэВ). В июле 2016 года была продемонстрирована возможность выпуска до энергии 950-980 МэВ. Возможно, для выпуска на максимальной энергии потребуются модернизировать систему кикеров БЭП для увеличения их амплитуды на оставшиеся 5-10%.

4. Монтаж модернизированных для работы на энергии до 1 ГэВ магнитов канала БЭП – ВЭПП-2000

Магниты постоянного питания в каналах транспортировки БЭП – ВЭПП питаются последовательно с магнитными элементами БЭП. При модернизации бустера эти магниты (4

«коротких» + 4 «длинных») были изготовлены в Экспериментальном Производстве ИЯФ, произведены магнитные измерения их краевого поля. Также были изготовлены новые участки вакуумной камеры в этих магнитах, потребовалась модификация подставок как под магниты, так и под квадрупольные линзы каналов.

В первом квартале 2016 года сборка каналов была успешно завершена, магниты отъюстированы, ошинованы, подключены к системе охлаждения. В начале апреля первый пучок электронов на энергии инжекции в БЭП прошёл по каналу до точки инжекции в кольцо ВЭПП-2000.

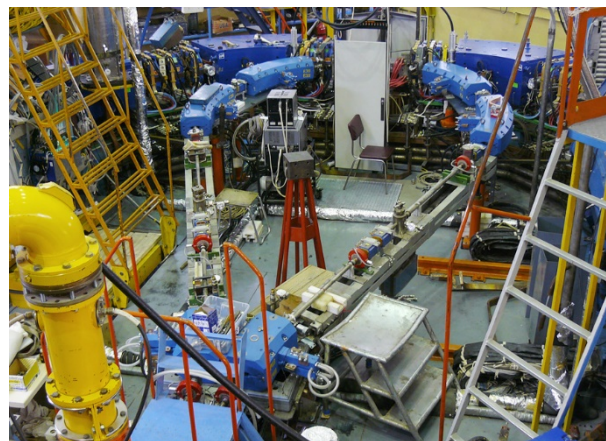


Рисунок 4.1 Каналы транспортировки пучков из БЭП в ВЭПП-2000, завершение сборки после модернизации.

5. Инжекция пучков электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000 во всём диапазоне энергий до 1 ГэВ с использованием дополнительных кикеров

Инжекция в кольцо ВЭПП-2000 пучков e^+/e^- производится с помощью двух импульсных магнитов, т.н. «доворачивающего» (ME4/MP4) и «впускного» (ME5/MP5), которые не потребовали модернизации для инжекции во всём диапазоне энергий. Далее остаточные колебания гасятся быстрым инфлектором с амплитудой импульса до 70 кВ, и «полочкой» 10 нс. Для того, чтобы обеспечить захват пучка из модернизированного бустера БЭП на высокой энергии (900-1000 МэВ) в ВЭПП были установлены дополнительные пластины кикера, в диполях противоположной части кольца (см. Рис. 5.1). Это потребовало замены вакуумных камер в двух магнитах. В начале 2016 года пластины были скоммутированы с генераторами в высоковольтном блоке, а непосредственно на магнитах установлены вновь изготовленные нагрузки. В июле 2016 года, после модернизации системы управления кикерами, и их синхронизации,

были проведены тесты «удара» новыми инфлекторами по пучку, с наблюдением возбуждения бетатронных колебаний по пикапам.

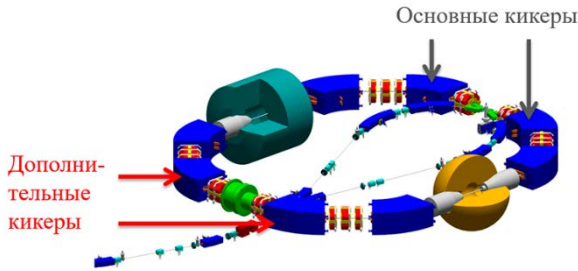


Рисунок 5.1 Расположение новых пластин инфлекторов ВЭПП-2000.

Первая после модернизации комплекса инжекция электронов в ВЭПП-2000 была проведена на энергии 390 МэВ без ускорения в БЭП, в апреле 2016 года (см. Рис. 5.2). Вскоре после этого был настроен режим работы ВЭПП на энергии 510 МэВ, и перепуск из бустера на этой энергии. В июне 2016 года на этой же энергии был инжектирован первый пучок позитронов, полученный с ИК.

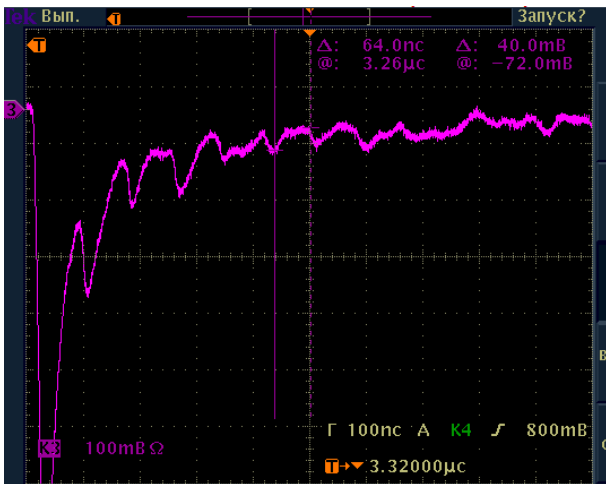


Рисунок 5.2 Сигнал ФЭУ от первых оборотов инжектированного пучка электронов.

Поскольку первый этап работы подразумевал использование для отладки систем и обезгаживания вакуумной камеры синхротронным излучением т.н. «тёплой» оптики накопителя, с выключенными соленоидами финального фокуса, а такой режим ограничен по энергии питанием одного из семейств квадруполей, то инжекция на более высокой энергии пока не производилась.

6. Отладка системы пучковой диагностики на основе выведенного модернизированными зеркалами СИ в кольце ВЭПП-2000

Зеркала вывода видимой части синхротронного излучения пучка на ПЗС-камеры для нужд пучковой диагностики были заменены в период остановки комплекса на модернизацию. Новые зеркала представляют собой косвенно охлаждаемую медную призму с двумя отражающими гранями (Рис. 6.1). Летом 2016 года в кольцо ВЭПП-2000 были захвачены одновременно два пучка, электронный и позитронный, с очень малой интенсивностью, ~ 0.1 мА (см. Рис. 6.2).

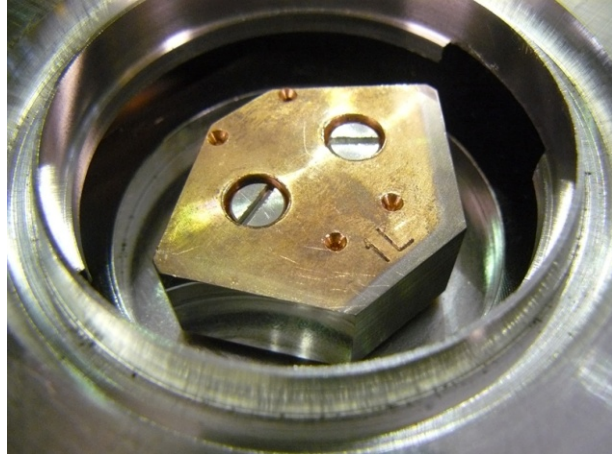


Рисунок 6.1 Зеркало вывода СИ двух пучков для системы диагностики, установленное в вакуумной камере поворотного магнита.

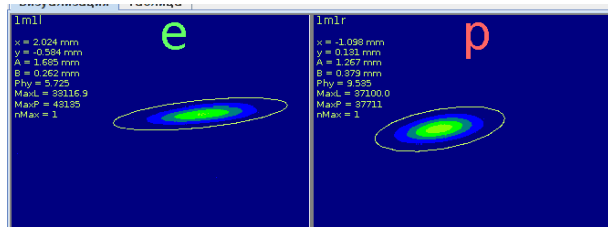


Рисунок 6.2 Пучки электронов и позитронов в техническом режиме работы на ПЗС-камерах.

Поскольку кольцо работало в техническом режиме «тёплой» оптики, а в коллайдере нет системы разведения пучков, т.е. пучки всегда находятся в режиме столкновения, эффекты встречи не позволят иметь интенсивность встречного пучка более 1 мА. Два пучка были необходимы для юстировки оптических трактов выведенного СИ одновременно с двух направлений. Эта работа была успешно произведена. Система диагностики на основе 16 ПЗС-камер является базовой для правки оптики накопителя, использующей анализ матриц откликов. Без отлаженной работы этой системы (см. Рис. 6.3) невозможна настройка фокусирующей структуры и достижение высокой светимости.

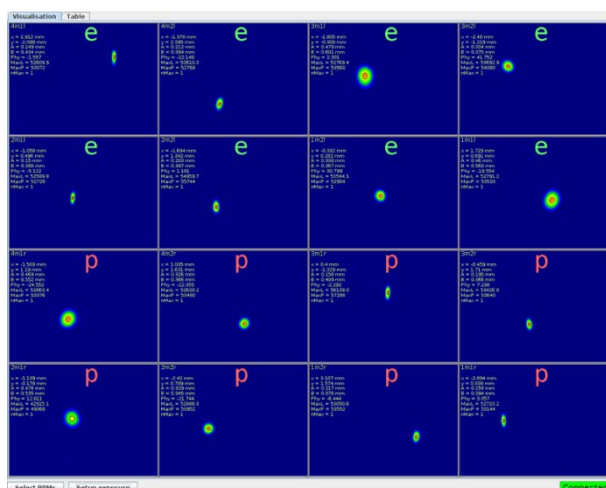


Рисунок 6.3 Изображение пучков на 16 ПЗС-камерах в режиме круглых пучков.

7. Запуск ускорительного комплекса ВЭПП-2000 для работы с инжекционным комплексом

На первом этапе работа ускорительного комплекса ВЭПП-2000 с пучками из ИК строилась на запуске различных систем, и проверке их функционирования с одним пучком, электронов или позитронов. Одновременно производилось обезгаживание вакуумной системы под воздействием синхротронного излучения интенсивного пучка (см. Рис. 7.1).

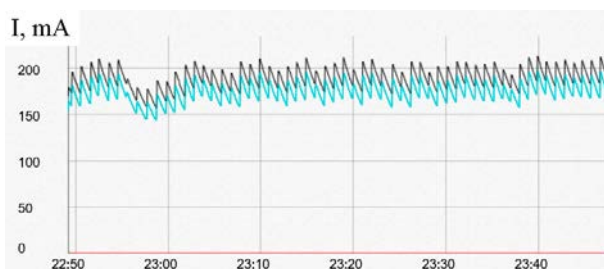


Рисунок 7.1 Ток пучка в накопителе ВЭПП-2000 в режиме обезгаживания.

Одним из важных этапов подготовки к работе на эксперименты по физике частиц была отладка быстрого и надёжного переключения режимов работы между типами частиц всей цепи ускорителей, от линаков ИК до бустера БЭП. Эта работа была начата в июле 2016 года для получения двух пучков в кольце ВЭПП-2000 и юстировки системы пучковой диагностики. После плановой технической остановки комплекса в августе-сентябре, и включении ВЭПП-2000 в новом сезоне уже в штатной «холодной» оптике, работа с переключением между режимами продолжала отлаживаться. К декабрю 2016 года надёжность совместного

функционирования двух ускорительных комплексов достигла достаточного уровня, чтобы обеспечить для задач по калибровке на энергии 510 МэВ два детектора, установленных на коллайдере, светимостью, ограниченной лишь фундаментальными эффектами встречи.

8. Настройка и оптимизация режимов транспортировки и накопления пучков инжекционного комплекса в коллайдере ВЭПП-2000

Получение высокой светимости невозможно без стабильных перепусков между накопителями и инжекцией частиц. После настройки прохождения и фокусировки пучка в канале К-500 был достигнут темп накопления позитронов на уровне $2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ (см. Рис. 8.1) что на порядок превосходит возможности старой системы производства частиц, с которой ВЭПП-2000 работал в 2010-2013 гг. Однако коэффициент перепуска не превышал 50-60%, что является невысоким показателем для электронных пучков с малым эмиттансом. Планируется дальнейшая оптимизация фокусирующей структуры канала, методом анализа матрицы откликов, который хорошо зарекомендовал себя для правки оптики в накопительных кольцах.

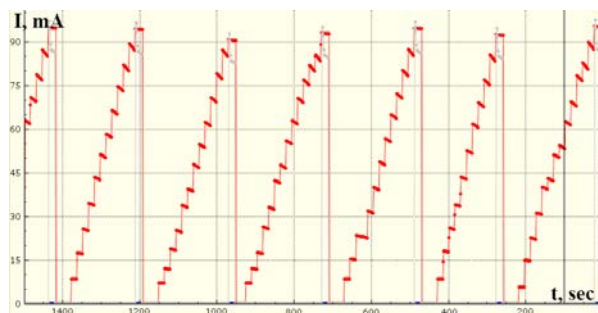


Рисунок 8.1 Циклы накопления позитронов из канала К-500 в БЭП и выпуска в ВЭПП.

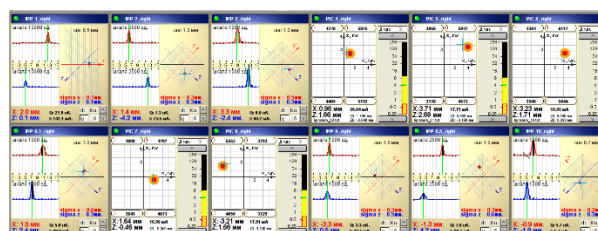


Рисунок 8.2 Показания датчиков положения пучка двух типов при его прохождении по каналу транспортировки БЭП-ВЭПП, на энергии 510 МэВ.

Также производилась настройка перепускных каналов БЭП-ВЭПП. При однократном захвате пучка были достигнуты значения коэффициента перепуска на уровне 90%, однако в

рабочем режиме, с накоплением инжектируемой порции, в присутствии встречного пучка этот показатель стандартно падает до 50-60%.

9. Изучение режимов столкновения сгустков в коллайдере ВЭПП-2000 в режиме круглых пучков при высоких токах электронов и позитронов

С началом нового сезона работы осенью 2016 года ВЭПП-2000 был включён в режиме номинальной оптики для обеспечения столкновения пучков. После получения инъекции на энергии 510 МэВ была произведена юстировка соленоидов «по пучку», что необходимо для минимизации тока дипольных коррекций, которые имеют невысокое качество поля, будучи выполненными в виде дополнительных обмоток в квадрупольных линзах, и могут приводить к сокращению динамической апертуры (ДА) при включении с большим током питания.

Производилось сканирование по бетатронным частотам с целью выявления оптимальной рабочей точки по эффектам встречи. На Рис. 9.1 представлен типичный спектр когерентных колебаний сталкивающихся сгустков, связанных через эффекты встречи. Пара пиков слева – «номинальные» бетатронные частоты (сигма-моды), пики в правой части соответствуют пи-модам, имеющим сдвиг частоты.

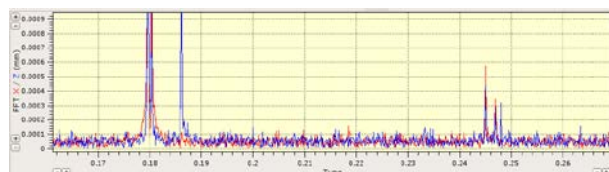


Рисунок 9.1 Спектр когерентных колебаний встречных пучков.

После проведённой рутинной оптимизации машины была достигнута пиковая светимость на уровне $9 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (см. Рис. 9.2), что ожидаемо несколько ниже (~20%) рекордных значений 2013 года при работе с укороченным соленоидом.

10. Оптимизация светимости коллайдера ВЭПП-2000 при работе в режиме эксперимента с детекторами СНД и КМД-3

На первом этапе ставилась задача обеспечить светимость на энергии 510 МэВ детекторам СНД и КМД-3. На этой энергии максимальный ток пучков, ограниченный эффектами встречи достигался и со старой системой производства пучков. Однако, максимальные значения пиковой светимости были достигнуты в

2013 году в режиме т.н. «коротких» соленоидов, когда запитаны лишь ближние к месту встречи половинки соленоидов финального фокуса. Этот режим доступен только в области низких энергий (ниже 500 МэВ). Поскольку ключевая часть физической программы экспериментов сосредоточена в области высокой энергии, сезон 2016/2017 начат с номинальной оптикой.

Блокировка ВЫКЛ.	
Светимость	
L ₅	983.86
L ₃₀	682.68
L	930.48
I _e	34.15
I _p	40.57
I _{FZ}	81.63
(I _e I _p) _{avg}	1386.01
L/(I _e I _p)	0.67
Фоновые условия	
STF	13442.13
STFN	2.00
FLT	1126.35
DC1	90832
T _{live}	91.59

Рисунок 9.2 Показания монитора светимости детектора СНД. Работа на энергии 510 МэВ.

Опыт предыдущей работы показал важность настройки линейной оптики. На Рис. 10.1 показаны измеренные размеры пучков после правки структурных функций. На Рис. 10.2 приведён отклик на вариацию частоты ВЧ-резонатора (измерение дисперсионной функции). Рутинная процедура настройки режима для светимости.

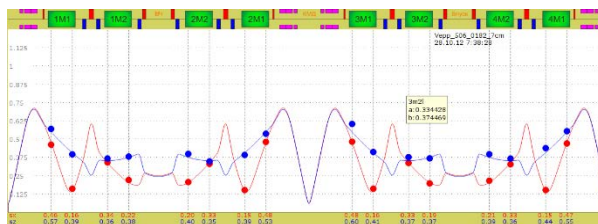


Рисунок 10.1 Измеренные (точки) и расчётные (линии) поперечные размеры пучка после правки оптики.

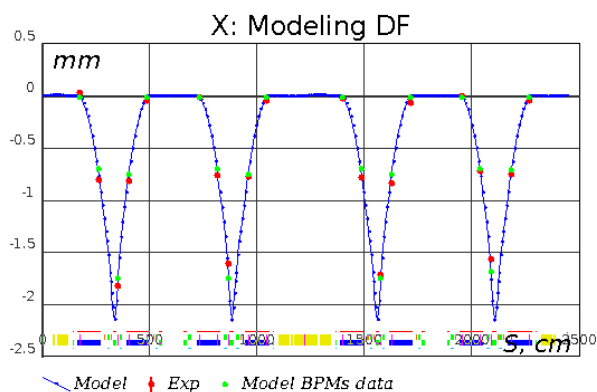


Рисунок 10.2 Рабочее окно программы измерения дисперсионной функции.

Заключение

Следует отметить, что, хотя инжекция обоих (электронного и позитронного) пучков, транспортированных через модернизированный канал, успешно состоялась, дополнительные пластины кикеров установлены в кольцо и испытаны, в т.ч. с пучком, не весь диапазон энергий пока использован для проведения экспериментов. Дополнительные кикеры необходимы для инжекции в верхнем диапазоне, при энергии пучка 900-1000 МэВ. В ходе работ 2017 года на высокой энергии будет завершена экспериментальная проверка перепуска из бустерного накопителя БЭП в кольцо коллайдера ВЭПП-2000 во всём диапазоне энергий.

Список использованных источников

- [1] P. Shatunov, et al., "Status and perspectives of the VEPP-2000", Phys. Part. Nuclei Lett., 13, p.995, (2016).
- [2] G.V. Fedotov et al., "Overview of the CMD-3 recent results at e+e- collider VEPP-2000", EPJ Web Conf. 130 (2016) 01014.
- [3] D. Berkaev, et al., "Commissioning of Upgraded VEPP-2000 Injection Chain", Proc. IPAC'2016, Busan, Korea, p.3811, (2016).
- [4] D. Shwartz et al., "Implementation of Round Colliding Beams Concept at VEPP-2000", Proc. eeFACT'2016, Daresbury, UK, paper MOT3AH3, (2016).
- [5] D. Shwartz et al., "Recommissioning and Perspectives of VEPP-2000 e+e- Collider", Proc. ICHEP'2016, Chicago, USA, (2016).
- [6] I. Zemlyansky et al., "Commissioning of e+/e- Transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility", Proc. RuPAC'2016, St. Petersburg, Russia, paper TUPSA001, (2016).

№ 15.4.1 Разработка методов мало- ракурсной радиографии сверх- плотных объектов на основе мощ- ных сфокусированных пучков электронов

Введение

В отчете представлены результаты работ по разработке технологий изготовления ключевых элементов для рентгенографического комплекса ЛИУ-20 - ускорительных трубок и формирующих линий, а также результаты проектирования оптических элементов финального фокуса. Эти результаты подтверждают перспективу дальнейшей реализации комплекса ЛИУ-20 в целом.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В ходе предыдущих этапов работы в ИЯФе имело место существенное продвижение в развитии метода мало-ракурсной импульсной томографии объектов с большой оптической толщиной, который позволяет решить задачи поддержки и развития ядерного арсенала России в условиях действия договора о всеобщем запрете ядерных испытаний. Методы, разработанные и используемые в ИЯФ СО РАН, являются пионерскими и институт занимает лидирующие позиции по данному направлению в мире.

На базе экспериментального производства ИЯФ СО РАН была разработана отечественная технология пайки секционированных высоковольтных изоляторов диаметром 250 мм в высоковакуумном прогревном исполнении (рабочий вакуум порядка 10^{-10} торр). Освоен серийный выпуск таких изоляторов. Разработана технология сборки, настройки, сушки и пропитки высоковольтных формирующих линий на основе плёночных конденсаторных ячеек производства Новосибирского конденсаторного завода. Начато серийное производство формирующих линий.

Были проведены расчёты магнитных полей септум-магнита и спроектирован его прототип. Была разработана гидростатическая система определения положения элементов ускорителя, основанная на использовании четырёх датчиков.

2. Создание технологии изготовления изоляторов

Разработана технология пайки металлокерамических узлов с медными электродами с использованием активных припоев на базе титана МТНЖК [1]. В связи с активным взаимодействием титана с водородом при высоких температурах пайка проводится в вакууме (температура пайки 1020 С, давление – на порядок ниже, чем при термокомпрессионной сварке).



Рисунок 2.1. Изоляторы для УТ на основе керамика 22ХС, изготовленные по технологии пайки активными припоями без металлизации.

3. Отработка технологии герметичной сборки линий и заполнения их жидкой изоляцией

С целью наладки производства емкостных накопителей энергии со свойствами формирующих линий, для применения в высоковольтных сильноточных генераторах импульсов длительностью от десятков наносекунд и выше, отработана технология герметичной сборки линий и заполнения их жидкой изоляцией [2]. Технология сборки линий описана ниже.

1. Подготовка помещения и материалов к сборке ячеек.

В помещении, где ведется сборка ячеек, должны круглосуточно работать кондиционер и осушитель воздуха.

Сушка конденсаторных секций, поступивших с намоточного производства, проводится в печи в открытых коробках в течение трех суток при температуре 80⁰С. Просушенные секции могут храниться в запаянных полиэтиленовых мешках в комнате с кондиционером. Вскрывать мешок с просушенными секциями можно только непосредственно перед сборкой ячеек.

Каждая партия касторового масла испытывается на пробивное напряжение, затем помещается в тару из нержавеющей стали и предварительно сушится в печи при температуре 80°C в течение трех суток.

Окончательная сушка подогретого касторового масла осуществляется под вакуумом в течение 4-х часов.

Просушенное касторовое масло сливается в полиэтиленовые канистры и хранится в них с плотно закрытой крышкой.

2. Сборка ячейки из конденсаторных секций.

Ячейка собирается из предварительно просушенных секций, прошедших контроль по номинальной емкости и по току утечки, причем ячейка должна состоять из секций одной группы по току утечки.

Секции укладываются в картонную гильзу, затем сверху укладывают вторую картонную гильзу (рис. 3.1).

С помощью струбцин сжимают ячейку с помощью струбцин до требуемого размера. В сжатом состоянии по краям фиксируют картонную гильзу скотчем шириной 10 – 12 мм. Струбцины снимаются, при этом скотч должен удерживать ячейку в сжатом состоянии.

Храниться ячейки должны в запаянной полиэтиленовой таре и вскрываться только непосредственно перед сборкой формирующей линии.



Рисунок 3.1. Конденсаторные секции, собранные в ячейки ФЛ.

3. Сборка Формирующей Линии.

Сборка формирующей линии (ФЛ) должна проводиться в чистой комнате с кондиционером и осушителем воздуха. Перед сборкой ФЛ проверить и скомплектовать все необходимые детали. Детали должны быть тщательно очищены и помыты. Сборка проводится в безворсовых перчатках. Сборка начинается с установки нижней прижимной пластины из СТЭФа (рис. 3.2), на нее укладывается медная шина, обеспечивающая электрическое соединение ячеек. Затем на шину укладываются конденсаторные ячейки. В прорези верхней прижимной пластины из СТЭФа устанавливают гибкие

медные луженые контакты. Верхнюю прижимную пластину в сборе устанавливают на конденсаторные ячейки, стоящие на нижней пластине.

Затем с помощью струбцин (рис. 3.2) равномерно сжимают верхнюю и нижнюю пластины из СТЭФа до требуемого размера по всей длине пластин, контролируя значение емкости ячеек. Измеряют LC-метром емкость всех ячеек. Не снимая струбцин, накладывается бандаж из стеклоленты, пропитанной эпоксидной смолой. После окончания полимеризации бандажа, снимаются струбцины, измеряется емкость ячеек. Уменьшение емкости ячеек при этом должно быть не более 2%.

Сушка собранной линии осуществляется в сушильном шкафу при температуре $70-80^{\circ}\text{C}$ в течение 12 часов.

Корпус формирующей линии изготавливается из листового полипропилена толщиной 5мм (рис. 3.3). Отдельные детали корпуса свариваются между собой ручным экструдером с помощью присадочного прутка из полипропилена. В корпусе предусмотрено заливочное резьбовое отверстие для последующей откачки линии на вакуум и заливки касторового масла.



Рисунок 3.2. Ячейки ФЛ в сборе (сверху), сжатие ФЛ струбцинами и наложение бандажа (снизу).

На контакты формирующей линии, выполненных в виде шпилек М8 устанавливаются шайбы “Usit Ring”, устанавливается крышка из полипропилена, плотно затягивают гайки М8, смазанные стопором резьбы.

Весь этот узел устанавливают в корпус и приваривают крышку присадочным прутком из полипропилена к корпусу ФЛ. Сварка должна

обеспечить полную герметичность корпуса. Перед проверкой герметичности корпуса ФЛ подается внутрь корпуса избыточное давление 0,5 атм. Гелиевым течеискателем проверяют герметичность корпуса ФЛ. Затем проводят отжиг собранной в герметичном корпусе ФЛ при температуре 120⁰С в течение 3 часов с последующим медленным остыванием.



Рисунок 3.3. Сборка ФЛ в корпусе при заполнении жидкой изоляцией.

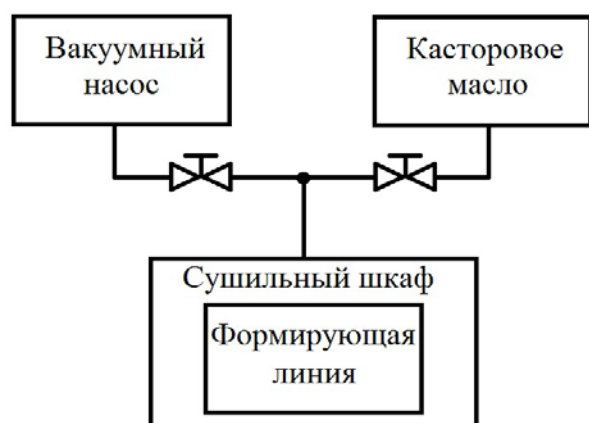


Рисунок 3.4. Блок схема откачного-пропиточного поста.

Вакуумную откачку ФЛ проводят с подогревом при температуре 80⁰С в течение 6 часов. Блок схема откачного-пропиточного поста представлена на рисунке 3.4. Просушивают касторовое масло в сушильном шкафу при температуре 80⁰С в течение 6 часов. Просушенное и подогретое касторовое масло до температуры 80⁰С заливают в герметичный корпус ФЛ под вакуумом. Заливочное отверстие закрывается резьбовой пробкой с силиконовой прокладкой. В течение двух суток конденсаторная бумага формирующей линии окончательно пропитывается касторовым маслом, при этом устанавливаются окончательные значения ячеек емкостей линии ФЛ, которые записываются в паспорт.

4. Проектирование оптических элементов финального фокуса

4.1 Дипольный магнит с квадрупольной фокусировкой.

Поворотный магнит с регулируемым градиентом обеспечивает основное магнитное поле около 250 Гс с однородностью 5% в области радиусом 4 см вокруг оси движения пучка. Так же поворотный магнит должен иметь возможность получать градиент магнитного поля от -3 Гс/см до +3 Гс/см независимо от основного поля.

Основными узлами дипольного магнита являются: магнитопровод, дипольные обмотки и квадрупольный корректор. Магнитопровод состоит из верхнего и нижнего ярма, которые, изготовлены из пластин электротехнической стали толщиной 1 мм с клеевым покрытием типа STABOLIT-70. Габаритные размеры пластины 140x540 мм. Пластины укладываются пакетами на сборочном стапеле и сжимаются. Затем в печи происходит нагрев и полимеризация. Коэффициент заполнения магнитопровода сталью 0.98. На верхнем ярме магнитопровода выполняются отверстия под «геознаки» для установки уголковых отражателей и обеспечения контроля выставки поворотного магнита лазертрекером.

Дипольные обмотки выполняются двухслойными из провода ПСДКТ сечением 1.25x6.3 мм. В обмотке 50 витков. Обмотка пропитывается эпоксидным компаундом по методу «Монолит». Обмотка имеет площадку для установки датчика контроля температуры. Параметры диполя приведены в таблице 4.1.1

Таблица 4.1.1. Основные параметры дипольного магнита.

Наименование	Значение
Угол поворота, °	12
Радиус поворота, мм	3253
Длина ярма, мм	500
Эффективная длина, мм	680
Магнитное поле, Гс	210
Количество витков в обмотке	50
Ампер-витки, А	2500
Сечение витка, мм ²	7.87
Сопротивление обмотки, мОм	210
Толщина пластины ярма, мм	1
Общий вес, кг	250

Поворотный магнит имеет квадрупольный корректор, конструкция которого выполнена по принципу линзы Пановского. Обмотки корректора также выполнены из провода ПСДКТ сечением 1.25x6.3 мм и имеют по 20

витков, которые сразу укладываются в ячейки разъемного (из двух частей) каркаса корректора. Материал каркаса корректора – нержавеющая сталь с магнитной проницаемостью 1.02...1.05.

Квадрупольный корректор крепится непосредственно на магнитопроводе поворотного магнита. Внутри квадрупольного корректора будет проходить вакуумная камера. Максимальный внутренний размер вакуумной камеры может быть 150 мм. Параметры квадрупольного корректора приведены в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.2. Основные параметры квадрупольного корректора.

Наименование	Значение
Градиент, Гс/см	12.384
Апертура (гор. вер.), мм	150x150
Ампер-витки обмотки, А	1440
Количество витков в обмотке	20
Сечение витка, мм ²	7.875
Сопrotивление обмотки, мОм	72

Все неизолированные токопроводящие элементы поворотного магнита закрыты защитными крышками из прозрачного и негорючего поликарбоната.

Общий вид дипольного магнита с квадрупольной фокусировкой показан на Рис. 4.1.1.

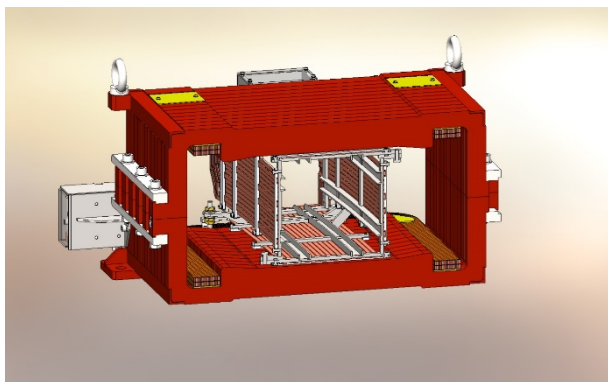


Рисунок 4.1.1. Общий вид дипольного магнита с квадрупольной фокусировкой.

4.2 Квадрупольные линзы.

Квадрупольная линза предназначена для фокусировки электронного пучка. Квадрупольная линза имеет классическую осесимметричную конструкцию. Основными узлами линзы являются: магнитопровод и обмотки.

Общий вид магнитопровода квадрупольной линзы показан на Рис. 4.2.1. Магнитопровод состоит из четырех шихтованных квадрантов. Полюс выполнен заодно с соответствующим

участком магнитопровода. Профиль полюса представляет собой гиперболу.

Каждый квадрант изготовлен из пластин электротехнической стали М1200-100А толщиной 1 мм с клеевым покрытием. Пластины укладываются пакетами по 20 штук на сборочном стапеле и сжимаются и спекаются в печи. Каждый следующий пакет развернут относительно предыдущего. Пластина имеет несимметричную форму, благодаря чему образуются пазы для крепежных шпилек. При нагреве происходит полимеризация клеевого покрытия. Коэффициент заполнения магнитопровода сталью 0.98.

Магнитное поле в квадрупольной линзе создается током, протекающим по обмоткам, расположенным на полюсах. Обмотка изготавливается из медного провода ПСДТ сечением 2x6мм. Обмотка имеет 62 витка. Обмотка изолируется стеклолентой и пропитывается эпоксидным компаундом по методу «Монолит». Обмотка имеет площадку для установки датчика контроля температуры.

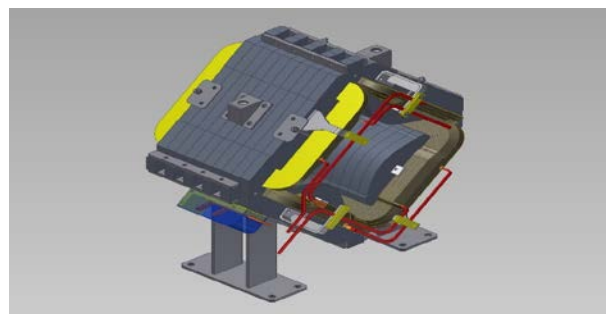


Рисунок 4.2.1. Общий вид квадрупольной линзы в сборе.

Шины, соединяющие обмотки также выполнены из провода ПСДТ сечением 2x6мм. Шины прижимаются к кронштейну пластинами из капрлона. Кронштейн крепится непосредственно на магнитопроводе квадрупольной линзы. Токопроводящие элементы линзы закрыты защитной крышкой из прозрачного и негорючего поликарбоната. Параметры квадрупольной линзы приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1. Параметры квадрупольной линзы.

Наименование	Значение
Градиент, Гс/см	154
Радиус апертуры, мм	80
Длина линзы, мм	200
Ампер-витки обмотки, А	4000
Количество витков в обмотке	62
Сечение витка, мм ²	12
Вес линзы, кг	185

5. Создание проекта системы управления

5.1 Проект системы управления.

Разработан проект системы управления для нового рентгенографического комплекса на базе ускорителя ЛИУ-20 [3]. Общая схема системы управления рентгенографическим комплексом представлена на рис. 5.1.1.

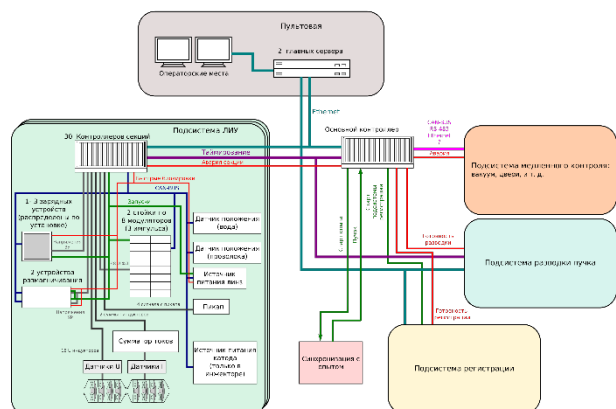


Рисунок 5.1.1. Схема системы управления ускорителя ЛИУ-20.

По функциональному признаку её можно разделить на следующие взаимодействующие подсистемы и элементы:

5.1.1 Подсистема управления линейным индукционным ускорителем.

В задачи этой подсистемы входит обеспечение слаженной работы и контроль параметров всех элементов линейной ускоряющей структуры: катода, модуляторов, источников питания линз, источников размагничивания, зарядных устройств, датчиков положения пучка и ускорительных секций, датчиков напряжения. Структурно она разделена на 30 единообразных контроллеров секций, каждый из которых осуществляет все необходимые операции по управлению двумя стойками по 8 модуляторов в каждой. Контроллеры состоят из набора электронных устройств, выполненных в формате VME и собранных в одну корзину. Ряд управляющих электронных устройств выполнен в виде отдельных блоков, и связывается по протоколу CAN-BUS. Более подробно эта подсистема будет рассмотрена далее. Связь с контроллерами секций осуществляется посредством сети Ethernet, также от каждого контроллера отходит аппаратная линия быстрой блокировки для запрета опыта в случае неисправности.

5.1.2. Подсистема разрядки пучка.

Задача этой подсистемы — обеспечить работу элементов и контроль параметров электронно-оптической структуры разведения пучка: источников питания линз и корректоров,

кickers, датчиков положения пучка и т. д. Аппаратно подсистему разрядки предполагает выполнять аналогично подсистеме управления линейной ускоряющей структурой.

5.1.3. Подсистема медленного контроля.

Подсистема медленного контроля обеспечивает работу вакуумных насосов, дверных блокировок, измерителей вакуума и прочего оборудования, которое требует относительно медленного (раз в несколько секунд) но длительного (сутки) контроля. Подсистему планируется реализовать на основе промышленных контроллеров (PLC), либо контроллеров собственной разработки. Связь с подсистемой должна осуществляться путём: Ethernet, CAN, RS-485. Система также обеспечивает аппаратную блокировку для запрета проведения опыта.

5.1.4. Подсистема регистрации изображений.

Эта подсистема занимается регистрацией рентгеновского изображения. Связь с подсистемой осуществляется по сети Ethernet. Система должна предоставить аварийный сигнал готовности, для разрешения проведения опыта.

5.1.5. Подсистема синхронизации с опытом.

Задача подсистемы синхронизации с опытом, работа которой обеспечивается основным контроллером — проверить все сигналы готовности, и дать сигналы на проведение опыта и на регистрацию в соответствующий момент.

5.1.6. Подсистема таймирования.

Подсистема таймирования обеспечивает общее время на всех VME-крейтах системы управления с точностью не хуже 4 нс, а также передачу запускающих событий (event-ов) с такой-же точностью синхронизации.

5.1.7. Общее управление.

Управляющее программное обеспечение, осуществляющее общую координацию работы, раздачу уставок, выбор режимов, сохранение технологических данных и данных эксперимента, а также раздачу прошивок по TFTP планируется разместить в двух стоечных серверах. Операторские машины с клиентским ПО соединяются по Ethernet. Для хранения всех необходимых данных предусмотрено сетевое хранилище NAS. Более подробно эта подсистема будет также рассмотрена далее.

5.1.8. Блок синхронизации с опытом.

Блок синхронизации с опытом по сигналу от системы управления инициирует начало опыта. После начала опыта, он передаёт сигнал об успехе, по которому происходит генерация пучка.

5.2 Аппаратные средства системы управления.

Аппаратно система управления строится на базе локальных контроллеров, размещающихся в стойках управления (рис. 5.2.1), в которой располагаются:

1. Крейт с управляющей электроникой.
2. Контроллер медленных блокировок (не в каждой стойке).
3. Геодезическая система определения положения ускоряющего модуля с помощью ультразвуковых датчиков с водой [4].
4. Геодезическая система определения положения ускоряющего модуля с помощью проволоки.
5. Ethernet switch (не в каждой стойке, равномерно распределены по длине установки).
6. Источники питания линз.

В состав каждого управляющего крейта в стандарте VME (рис. 5.2.2) входит ряд разработанных в ИЯФ модулей, характеристики которых приводятся в [5]:

1. Интеллектуальный контроллер.
2. Таймер.
3. Четыре 16-канальных модулей синхронизации.
4. Один 64-канальный модуль блокировок.
5. Шесть 4-канальных быстрых осциллографических модулей.
6. Два 32-канальных медленных осциллографических модуля.
7. CAN-контроллер на два порта.

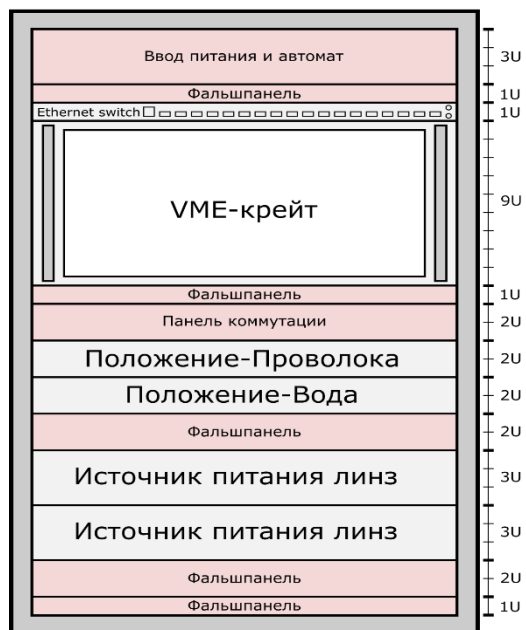


Рисунок 5.2.1. Состав локальной стойки управления.

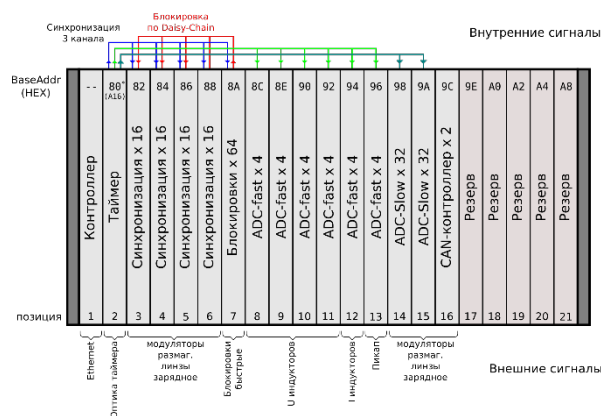


Рисунок 5.2.2. Состав управляющего крейта.

5.3 Программные средства и вычислительная инфраструктура.

Компоненты вычислительной инфраструктуры представлены на рис. 5.3.1 [6].

В её состав входят сервер (2.0 GHz, 4 Cores, Intel x86-64, 32Gb RAM, Gigabit Ethernet, 4TB SCSI, RAID-5), контроллер крейта VME (Power-PC, Diskless), ПК оператора (2.2 GHz 2 Cores, Intel x86-64, 4Gb RAM, до 4 мониторов).

Системное ПО основано на использовании изолированных виртуальных окружений. Несколько виртуальных машин используется для обеспечения удалённой загрузки, хранения баз данных, NFS, NTP, и прочих сервисов.

Программное обеспечение, разрабатываемое для системы управления, делится на несколько уровней, общая картина представлена на рис. 5.3.2. ПО системы управления базируется на открытой программной системе TANGO.

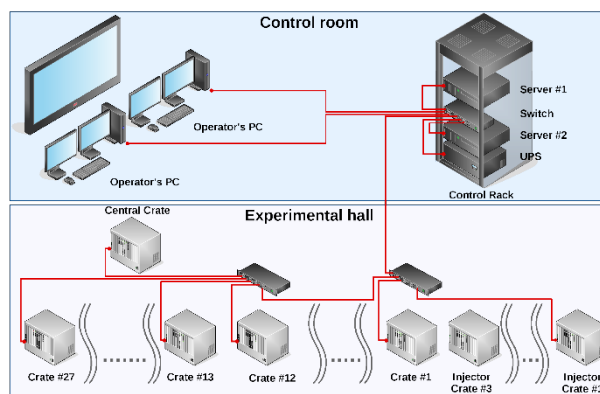


Рисунок 5.3.1. Вычислительная инфраструктура.

Низкоуровневое ПО предоставляет доступ к CANBus и VME и скрывает детали реализации. Уровень драйверов устройств (Device Driver) представляет набор библиотек, которые реализуют взаимодействие с определённым устройством. Устройства Tango нижнего уровня оборачивают Device Driver и представляют устройство на уровне Tango. Устройства

Tango верхнего уровня и пользовательские приложения контролируют отдельные подсистемы ускорителя. Приложения пользователя подразделяются на два типа: «инженерное ПО» и «ПО оператора».

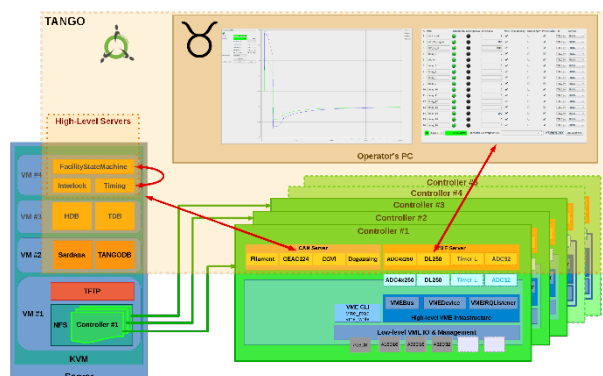


Рисунок 5.3.2. Программные средства.

Заключение

В течение 2013-2016 гг. были успешно реализованы следующие блоки проекта:

- расчет напряженности электрических полей в изоляторе
- отработка технологии пайки секций изолятора
- отработка технологии пайки концевое соединительного узла изолятора
- создание технологии изготовления изолятора
- отработка технологии намотки пленочных конденсаторов
- отработка технологии сборки конденсаторов в линии
- отработка технологии настройки неоднородных формирующих линий
- отработка технологии герметичной сборки линий и заполнения их жидкой изоляцией.
- проектирование электромагнитного кикера
- проектирование септум-магнита
- проектирование квадруполь фокусирующей системы
- проектирование оптических элементов финального фокуса.
- проектирование электромагнитной системы с натянутой проволокой
- проектирование гидростатической системы
- проектирование системы лазерной калибровки
- создание проекта системы в целом.

Достигнутые результаты по этой работе явились заделом для решения комплексной задачи и составили базис отработки технологий

изготовления ключевых элементов для реализации проекта рентгенографического комплекса ЛИУ-20.

Список использованных источников

- [1] V.P. Yakovlev, M.A. Batazova, G.I. Kuznetsov Electron Gun For A 34.3 GHz 100 MW Magnicon In: PAC2001, Chicago, June 17-22, 2001.
- [2] A.V. Akimov, O.V. Anchugov, A.F. Baidak, P.A. Bak, D.A. Shvedov Pseudospark switches commutation depending on trigger characteristics in Proceedings of 19th International Symposium on High Current Electronics (SHCE) EFRE-2016, Томск, 2-7 Октября 2016 г.
- [3] G.A. Fatkin, E. Bekhtenev, A.V. Pavlenko, A. Senchenko, S.S. Serebnyakov, A.O. Baluev, A. M. Batrakov, A. G. Chuprya, E.S. Kotov, Ya.M. Macheret, V. Mamkin, A.V. Ottmar, A. Panov, P.A. Selivanov, K.S. Shtro, S. Singatulin, M. Vasilyev Structure and Hardware of LIA-20 Control System in Proceedings of XXV Russian Particle Accelerators Conference, St. Petersburg, 2016, THCBSH02.
- [4] A.G. Chuprya, E. Bekhtenev System of Geodetic Measurements for LIA-20 in Proceedings of XXV Russian Particle Accelerators Conference, St. Petersburg, 2016, THPSC083.
- [5] E.S. Kotov, G.A. Fatkin, A.V. Pavlenko, M. Vasilyev, A.M. Batrakov, K.S. Shtro VME Based Digitizers for Waveform Monitoring System of Linear Induction Accelerator LIA-20 in Proceedings of XXV Russian Particle Accelerators Conference, St. Petersburg, 2016, THPSC081.
- [6] A. Senchenko, G.A. Fatkin, S.S. Serebnyakov, P.A. Selivanov Software and Computational Infrastructure of LIA-20 Control System in Proceedings of XXV Russian Particle Accelerators Conference, St. Petersburg, 2016, THPSC088.

№ 15.4.2 Исследование и оптимизация эффективности инъекции электронов и позитронов инжекционного комплекса ВЭПП-5

Введение

Инжекционный Комплекс ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН предназначен для получения, накопления и транспортировки высокоинтенсивных пучков электронов и позитронов в действующие в Институте электрон-позитронные коллайдеры ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Он состоит из источника электронов, электронного линейного ускорителя, узла конверсии, включающего в себя высокоэффективную магнитную систему сбора позитронов, позитронный линак, накопитель-охладитель и каналы транспортировки частиц до потребителей – коллайдеров ИЯФ СО РАН

Комплекс позволяет получать и накапливать пучки с энергией до 510 МэВ с интенсивностями до 10^{11} частиц в пучке. Инжекционный Комплекс обладает уникальными свойствами и не имеет аналогов в России.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Накопитель-охладитель Инжекционного комплекса ВЭПП-5 представляет собой ускорительное кольцо периметром 27.4 метра и способен накапливать пучки электронов и позитронов высокой интенсивности на энергиях до 510 МэВ. От результатов настройки этого кольца во многом зависит эффективность работы всего Инжекционного комплекса.

Предварительная настройка оптических параметров накопителя-охладителя была выполнена на первых этапах проекта и производилась с помощью компьютерной программы «sixdsimulation», разработанной в ИЯФ СО РАН, которая позволила надежно получить оптимум структурных функций (бета-функций).

Были созданы, испытаны и запущены в работу транспортные каналы для транспортировки накопленных в накопителе-охладителе пучков электронов и позитронов непосредственно для инъекции в магнитные структуры коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Согласно проекту, предусматривалось использование импульсных магнитных элементов, для питания которых силами ИЯФ СО РАН была разработана и создана серия импульсных источников питания ГИД-25. Все необходимые магнитные элементы и их источники установлены на

Инжекционном комплексе и используются для проводки пучков на ВЭПП-4М и ВЭПП-2000.

Для работы с комплексами ВЭПП-3/ВЭПП-4 и ВЭПП-2000 требуется выпускать накопленный пучок каждые 10 – 30 с, за это время нужно перенастроить комплекс на другой вид частиц, накопить пучок и выполнить подготовку к выпуску. Для увеличения производительности комплекса необходимо сделать минимальными затраты времени на смену режимов и накладные расходы системы управления. Для этого в генераторе запускающих импульсов комплекса была реализована возможность работы по счетчику с событийно ориентированным управлением и была программно автоматизирована смена режимов установки (рис. 1). Так же был создан программный автомат, реализующий цикл инъекции-экстракции. Автомат позволяет выполнить по отдельности любой из этапов цикла (подготовка к накоплению нужного вида частиц, накопление, подготовка к экстракции и экстракция) запустить единичный или многократный проход всей последовательности этапов.

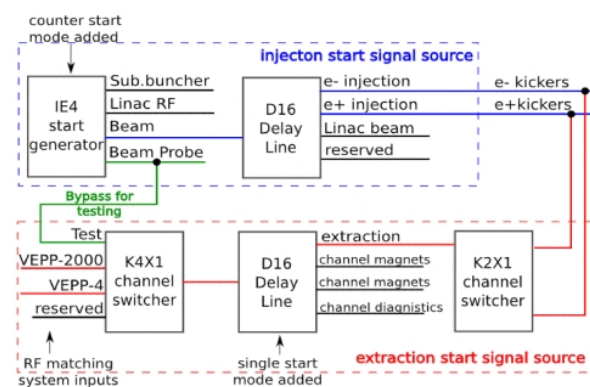


Рисунок 1. Упрощенная схема генератора запускающих импульсов Инжекционного комплекса.

2. Проектирование и создание схем и программно-аппаратных решений быстрого перехода между режимами работы Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 (электроны-позитроны, ВЭПП-3,4 – ВЭПП-2000), а также взаимодействия систем управления этих физических установок

Крейсерский режим работы Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 с ускорительными комплексами ВЭПП-3/ВЭПП-4 и ВЭПП-2000 требует выпускать накопленный пучок каждые 10 – 30 с, за это время нужно перенастроить комплекс на другой вид частиц, накопить пучок, выполнить подготовку к выпуску и перепустить

накопленные частицы по каналам транспортировки до потребителей. Следовательно, для увеличения зарядовой производительности комплекса необходимо сделать минимальными затраты времени на смену режимов и накладные расходы в системе управления. Для этого в генераторе запускающих импульсов комплекса в прошлом сезоне была реализована возможность работы по счетчику с событийно ориентированным управлением и была программно автоматизирована смена режимов установки. Также был отлажен программный автомат, созданный на предыдущих этапах выполнения проекта и реализующий цикл инжекции-экстракции.

Совместная эффективная работа Инжекционного комплекса ВЭПП-5 с установками ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 – потребителями электронных и позитронных пучков – требует, как программного (обмен данными), так и аппаратного (синхронизация) взаимодействия систем автоматизации всех этих физических установок. Для этих целей был разработан ряд мероприятий: организация безопасных транспортных программных каналов для связи систем автоматизации, наладка и отслеживание обмена данными, а также подготовлена необходимая инфраструктура (маршрутизаторы, коммутаторы и межсетевые экраны).

Примерная схема сетевой инфраструктуры ИК ВЭПП-5 представлена на рис. 2.

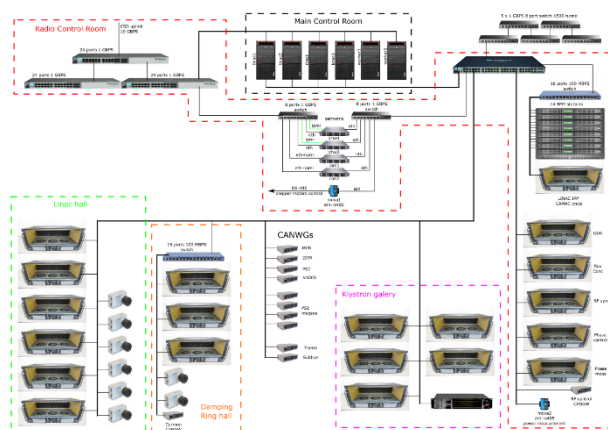


Рисунок 2. Схема вычислительной сети Инжекционного Комплекса ВЭПП-5.

3. Создание компьютерной модели Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 включая систему линейных ускорителей и системы разделения электронов и позитронов, накопитель-охладитель, а также каналы транспортировки частиц К-500

Создание компьютерной модели реального ускорительного комплекса весьма трудно-

ёмкая, но необходимая часть общего цикла работ. Основное назначение такой модели – расчёт отклонений пучка от проектных параметров и определение способов коррекции этих отклонений. В настоящий момент в распоряжении команды ИК ВЭПП-5 имеются все необходимые данные для завершения построения такой модели, а именно: структура линейного ускорителя (рис. 3), структура и электронно-оптические функции накопителя-охладителя (рис. 4) и каналов транспортировки частиц (рис. 5).

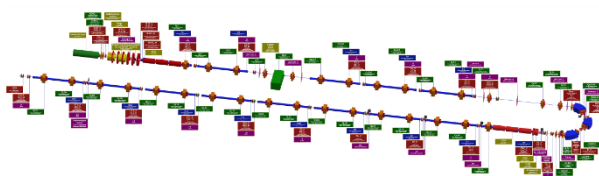


Рисунок 3. Линак ИК ВЭПП-5.

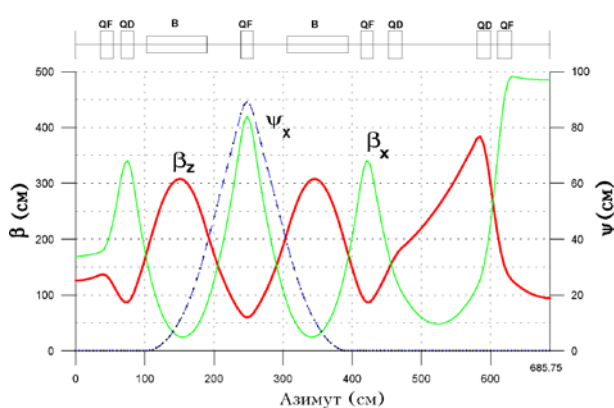


Рисунок 4. Оптические функции квадранта накопителя-охладителя.

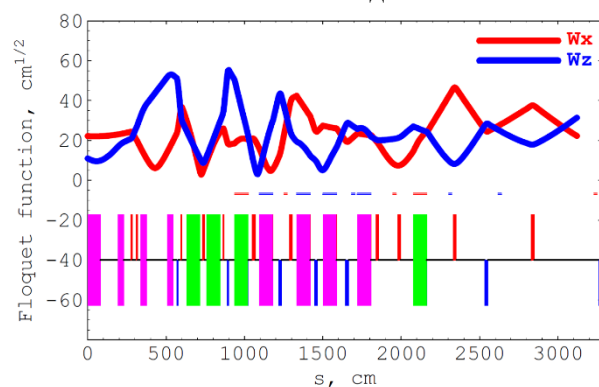


Рисунок 5. Оптические функции в канале К-500 на участке спуска в тоннель.

4. Расчёт и проектирование новой системы ВЧ 10 МГц для накопителя охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5

Основная задача Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 – получение и накопление высокоинтенсивных сгустков электронов и позитронов для их использования в коллайдерах ИЯФ СО РАН. Основные потери при инжекции

частиц из Линака в накопитель-охладитель происходят во время захвата в сепаратрисы ВЧ накопителя-охладителя. Это связано с длительностью и структурой пучка частиц, ускоряемого в линаке. Из-за большой его длительности с одной стороны и малой величиной сепаратрисы ВЧ НО с другой стороны в процессе инжекции теряется до 70% ускоренных частиц.

С целью увеличения темпа накопления частиц в накопителе-охладителе ИК ВЭПП-5 был предложен проект новой ВЧ системы на частоте обращения накопителя-охладителя – 10,9 МГц. Проект представлен на рис. 6 и 7. Основные параметры перечислены в табл. 1.

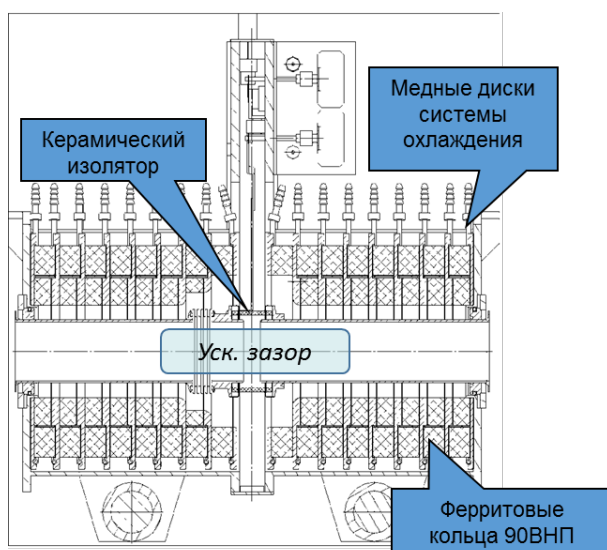


Рисунок 6. Схема резонатора новой ВЧ-системы для НО ИК ВЭПП-5.

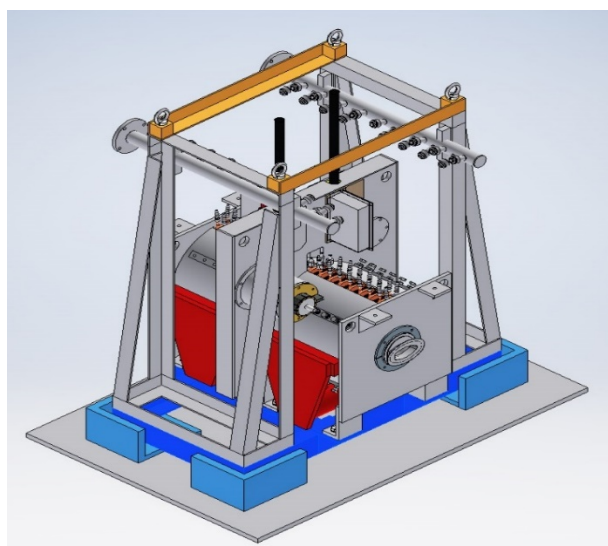


Рисунок 7. Вид резонатора в сборе.

В настоящее время и резонатор, и генератор находятся на завершающем этапе сборки. Следующие этапы – тестирование и установка на кольцо НО ВЭПП-5.

Таблица 1. Основные параметры новой ВЧ системы для НО ИК ВЭПП-5.

Параметр	Значение
Напряжение	10 кВ
Частота	10,9 МГц
Мощность генератора	7,5 кВт
Мощность потерь	5 кВт
Добротность	50

5. Настройка электронно-оптической схемы накопителя охладителя и каналов транспортировки электронов и позитронов в ВЭПП-3 (комплекс ВЭПП-3 – ВЭПП-4) и в БЭП (комплекс ВЭПП-2000). Проводка позитронных и электронных сгустков до потребителей. Измерение и оптимизация производительности Инжекционного комплекса ВЭПП-5 в целом

При настройке каналов транспортировки использовались модельные схемы прохождения пучков по каналам (см. гл. 2) Результаты проводки пучков на ускорительные комплексы ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 представлены на рисунках 8 – 11.



Рисунок 8. Прохождение электронов на ВЭПП-4М.



Рисунок 9. Прохождение позитронов на ВЭПП-4М.



Рисунок 10. Прохождение электронов на ВЭПП-2000.



Рисунок 11. Прохождение позитронов на ВЭПП-2000.

Достигнутые параметры ИК ВЭПП-5 по темпам накопления частиц в 2016 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры накопления частиц в НО ИК ВЭПП-5.

Энергия	395 МэВ
Скорость накопления e^- при частоте повторения 12.5 Гц:	$4.0 \cdot 10^{10}$ /с (70 мА/с)
Скорость накопления e^+ при частоте повторения 12.5 Гц:	$4.0 \cdot 10^9$ /с (7 мА/с)
Максимальный ток e^-	100 мА, $4.2 \cdot 10^{10}$ частиц
Максимальный ток e^+	70 мА, $2.9 \cdot 10^{10}$ частиц

Пучки частиц обоих сортов успешно инжектированы в соответствующие установки ускорительных комплексов ВЭПП-4М и ВЭПП-2000.

6. Разработка электроники для системы электростатических датчиков положения пучка в циклических ускорителях на основе применения метода синхронного детектирования: а) первая очередь -- для работы с существующей ВЧ системой НО ИК ВЭПП-5 на 700 МГц, б) вторая очередь -- модернизация стенда для калибровки и калибровка датчиков положения пучка НО ИК с применением разработанного подхода

Применение данного подхода в электростатических датчиках положения пучка в циклических ускорителях (пикапах) позволяет одновременно решить несколько проблем: более не требуется точная и тонкая настройка синхронизации электроники с моментом пролёта пучка, данный подход позволяет избавиться от зависимости показаний от распределения интенсивности пучка по сепаратрисам, т.е. определяет полную интенсивность пучка в кольце. Типичное распределение пучка вдоль продольного направления представлено на рис. 12.

Таким образом, данное устройство позволит более точно и оперативно осуществлять настройку и контроль параметров пучков в накопителе-охладителе, что является одним из определяющих факторов эффективности работы всего ИК ВЭПП-5 в целом.

В настоящий момент изготовлен и установлен первый экземпляр электронного блока на пикапе №11 накопителя-охладителя ИК

ВЭПП-5 (рис. 13). Запущено производство полного комплекта оборудования на современной элементной и технологической базе. Всего требуется произвести 18 комплектов электроники, включая запасные и резервные экземпляры.

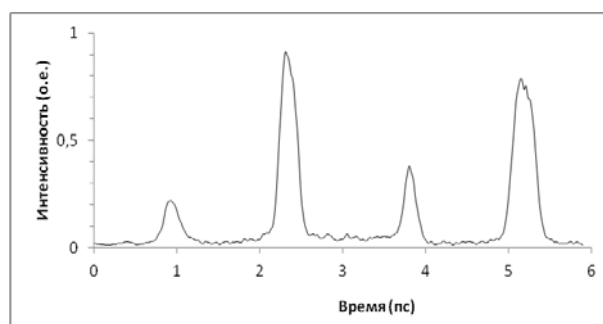


Рисунок 12. Распределение частиц по сепаратрисам ВЧ НО ВЭПП-5.



Рисунок 13. Пикап №11 на кольце накопителя-охладителя (вверху) и его пикап-станция (внизу).

7. Проектирование и создание прототипа системы однопролетной диагностики для измерения параметров пучка в каналах К-500 ИК ВЭПП-5 на основе люминофорных датчиков с цифровой обработкой изображения

Данный вид диагностики относится к разрушающим пучок системам и находит преимущественное применение в системах однопролетной транспортировки пучков, например, в каналах транспортировки пучков заряженных частиц. Для успешной работы системы необходимо управление положением люминофора

(введено/выведено), управление интенсивностью подсветки люминофора, а также управление коммутацией видеосигнала с различных датчиков, установленных вдоль каналов транспортировки. Предварительные исследования показали, что интенсивности и длительности сигнала свечения люминофора после попадания на него пучка частиц достаточно для применения в данной системе обычных телекамер на основе ПЗС-матрицы без дополнительной синхронизации. Это существенно упрощает создание и эксплуатацию данной системы измерения параметров пучка.

В настоящий момент изготовлен и испытан не только первый образец (прототип) данной системы, но и изготовлены и установлены все комплекты оборудования для каналов К-500. Подготовлено и протестировано соответствующее программное обеспечение, идёт тестовая эксплуатация всей системы люминофорных датчиков в канале К-500. На рис. 14 представлена программа управления датчиками, а на рис. 15 – изображение пучка в канале К-500.

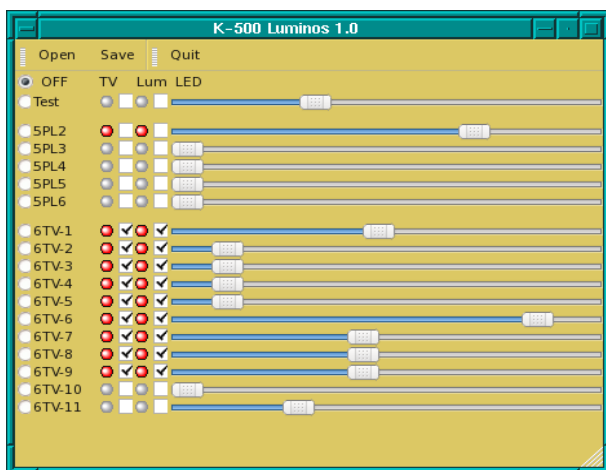


Рисунок 14. Программа управления системой люминофорных датчиков в канале К-500.



Рисунок 15. Изображение пучка электронов на датчике 5PL3 (К-500 в сторону ВЭПП-4М).

8. Исследование возможностей получения короткого сгустка в НО ИК ВЭПП-5 для инжекции в стенд кильватерного ускорения

Исследования возможностей получения коротких сгустков в накопителе-охладителе ИК ВЭПП-5 проводились при помощи т.н. фи-диссектора – прибора для измерения интенсивности сгустка вдоль продольной координаты стробоскопическим методом. В настоящий момент подготовлено и протестировано оборудование и программное обеспечение, предоставляющее оператору ИК ВЭПП-5 оперативные измерения распределения частиц данным методом. Результат работы этой подсистемы представлен на рис. 16.

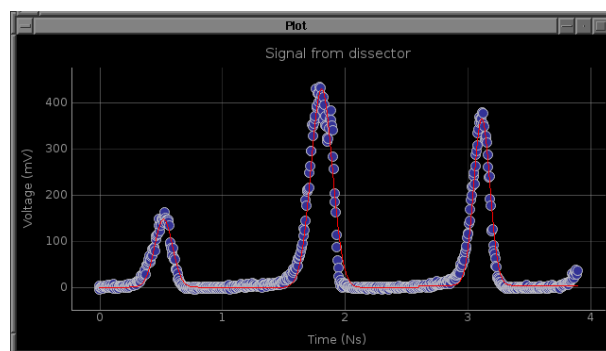


Рисунок 16. Распределение пучка электронов в кольце НО по сепаратрисам.

Проведён ряд предварительных измерений зависимостей длительности сгустков в кольце НО в зависимости от различных параметров: напряжения на резонаторе и тока пучка в накопителе-охладителе (см. рис. 17).

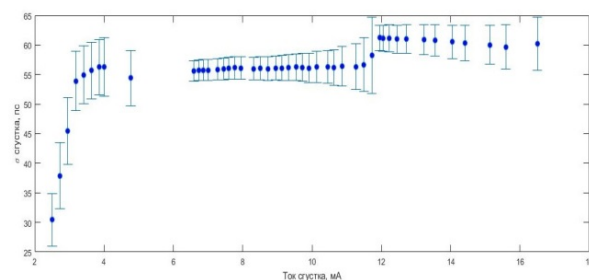


Рисунок 17. Зависимость длины сгустка от тока пучка.

Особенностью работы данного прибора является оперативная возможность детектирования наличия т.н. фазовых (т.е. продольных) колебаний пучка (см. рис. 18).

Данные результаты являются предварительными, поскольку проводились в период ограниченных возможностей генератора питания ВЧ-системы накопителя охладителя из-за её неисправности. В настоящий момент таких

ограничений нет и исследования по данному направлению будут продолжены.

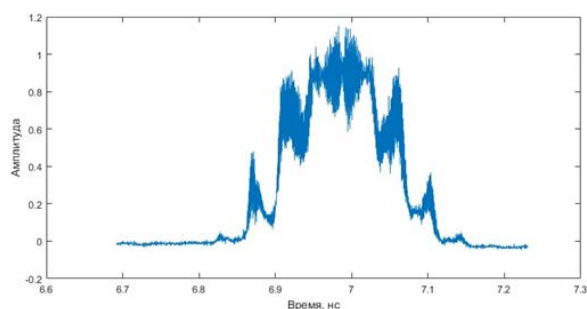


Рисунок 18. «Размытые» профили – сигнал присутствия фазовых колебаний пучка в кольце накопителя-охладителя.

9. Установка и настройка модернизированного программно-аппаратного комплекса системы управления ИК ВЭПП-5

В настоящее время на Инжекционном Комплексе ВЭПП-5 реализуется долговременная программа модернизации IT-инфраструктуры, связанной с системой управления. Коцепция модернизации предполагает повышение надёжности работы всей системы путём использования как современных аппаратных решений (сервера, системы хранения и обработки данных, источники бесперебойного питания, коммутаторы и т.д.), так и современных подходов к проектированию таких систем (дублирование и резервирование функций, высокая степень виртуализации, автоматический контроль за состоянием всей инфраструктуры ИК ВЭПП-5, сохранение/восстановление режимов работы инжекционного комплекса). Общая схема системы управления представлена на рис. 19.

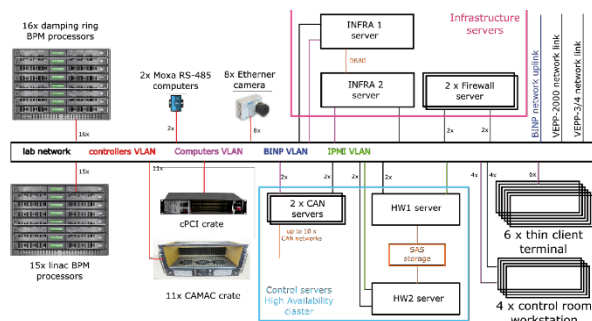


Рисунок 19. Концепт инфраструктуры системы управления ИК ВЭПП-5.

В настоящий момент реализуется т.н. первая очередь системы управления. Установлена стойка с резервными источниками питания, содан и тестируется основной уровень

коммутаторов системы управления, реализована тестовая конфигурация системы виртуализации, которая также проходит тестирование на действующем Инжекционном Комплексе.

Работы в данном направлении будут продолжены.

10. Разработка программ модернизации системы питания ВЧ-структур Линейного Ускорителя ИК ВЭПП-5

Для питания таких систем в настоящее время используются клистроны проекта 5045 производства лаборатории SLAC (США). На рис. 20 показан вид клистронной галереи ИК ВЭПП-5.



Рисунок 20. Клистронная галерея ИК ВЭПП-5.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведётся разработка программ по созданию систем питания ВЧ-структур как для линейного ускорителя ИК ВЭПП-5 в качестве оперативного резерва, так и для использования данной технологии в других будущих проектах ИЯФ СО РАН. Ведётся разработка полной технологии создания собственного клистрона, аналогичного по параметрам проекту 5045. В настоящий момент разработан комплект конструкторской документации для передачи клистрона в производство. Также создан стенд для испытаний отдельных компонентов будущих систем питания, проводятся испытания соленоидов фокусировки РАН (см. рис. 21). Работы в данном направлении будут продолжены.

11. Создание проекта увеличения акцептанса позитронного линейного ускорителя

Достигнутые в 1016 году параметры производства частиц (особенно позитронов) в настоящий момент являются рекордными и в

некоторой степени превосходят потребности действующих в ИЯФ СО РАН коллайдеров. Тем не менее, коллективом ИК ВЭПП-5 и ИЯФ СО РАН ведутся работы по повышению темпов накопления частиц. Одним из таких направлений работ может являться модернизация системы фокусировки и транспортировки частиц в позитронной части линейного ускорителя (после системы конверсии). Это может быть достигнуто за счет увеличения числа квадрупольных фокусирующих линз, а также применения дополнительных соленоидов для увеличения коэффициента захвата позитронов после мишени конверсионного узла.

На рис. 22. Показано возможное место расположения таких элементов.



Рисунок 21. Стенд для испытаний отдельных узлов и элементов будущих систем питания (слева). Подготовка соленоида клистрона на измерительном стенде для измерения профиля магнитного поля (справа).

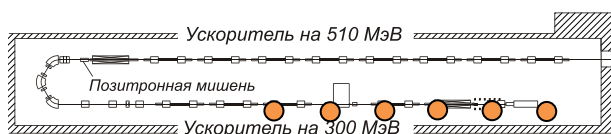


Рисунок 22. Возможное местоположение дополнительных элементов фокусирующей системы позитронного линака.

Данный поход, очевидно, потребует серьёзных усилий по согласованию всех параметров комплекса с существующими решениями, в том числе, это потребует установки дополнительных мощных источников питания с учётом вопросов охлаждения и термостабилизации.

В настоящий момент проект в стадии концептуальной проработки. Тем не менее, ряд магнитных элементов (см. рис. 23) уже сейчас

готов для установки на Инжекционный Комплекс ВЭПП-5.



Рисунок 23. Квадрупольные линзы на хранении.

Заключение

В настоящий момент идёт подготовка к полномасштабным исследованиям зависимости длительности сгустка в накопителе-охладителе и проводятся стендовые испытания отдельных узлов и элементов будущей модернизированной системы ВЧ-структур линейных ускорителей ИЯФ СО РАН, включая новую электронику системы управления и контроля.

№ 15.4.3 Исследование новых методов ускорения заряженных частиц

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию плазменных методов ускорения заряженных частиц в плазме. Полученные в 2016 году и представленные в отчете результаты исследований закладывают основу для прорывного развития экспериментального лазер-плазменного ускорения на основе мощных лазеров, разрабатываемых в институтах Российской Академии наук, а также обеспечивают фундамент для дальнейших теоретических и численных исследований взаимодействия длинных пучков заряженных частиц в плазме.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В ходе выполнения предыдущих этапов проекта было достигнуто существенное продвижение по трем возможным направлениям развития плазменных методов ускорения с помощью: 1. протонного пучка, 2. короткого лазерного импульса, 3. лептонного пучка.

Было выполнено моделирование захвата электронов в слабонелинейную кильватерную волну при их сторонней инжекции. Для избежания потерь электронов предложена наклонная инжекция (Рис. 1.1), в которой электроны попадают к моменту захвата в область постоянной плотности плазмы. Численным моделированием были найдены оптимальные параметры наклонной инжекции: задержка электронного сгустка $\xi_e = 11.5$ см, угол инжекции $\alpha_i = 2.8$ мрад, точка фокусировки $z_f = 140$ см. При этом область хорошего захвата оказывается большой по сравнению с размером пучка и позволяет отклоняться от этих параметров.

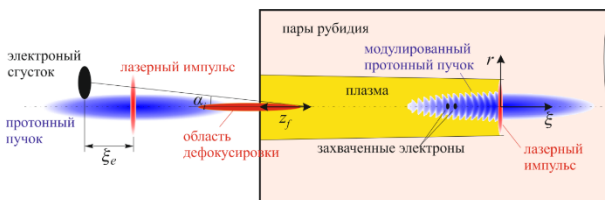


Рисунок 1.1. Схема наклонной инжекции.

В исследованиях прохождения мощного лазерного импульса по узкому металлическому капилляру наблюдалось существенное падение коэффициента пропускания волновода за харак-

терное количество импульсов от нескольких сотен до нескольких тысяч, зависящее от их энергии на входе за счет эффекта «зарастания каналов». Для его объяснения была предложена модель, описывающая изменение радиуса капилляра, связанное с перераспределением внутри него вещества, мгновенно испаренного проходящим излучением лазерного импульса.

Выделено два случая – закрытого с торцов капилляра, у которого остывание происходит медленно, давление выравнивается вдоль капилляра, а осевшее вещество пропорционально сечению, и открытого, где подобных процессов не происходит. Предыдущая модель работала с предположением, что капилляр остывает одновременно во всех сечениях, продольный профиль давления не успевает выровняться, и канал не перекрывается даже при длительном воздействии, хотя интенсивность излучения падает (Рис. 1.2а). На самом деле узкие области должны остывать быстрее, вещество из широких областей свободно проникать в них и осаждаться на стенках. В новой модели работает закон усреднения, пропорциональный только локальному энерговыделению и с течением времени канал полностью перекрывается (Рис. 1.2б). Подобная картина качественно согласуется с полученными экспериментальными данными.

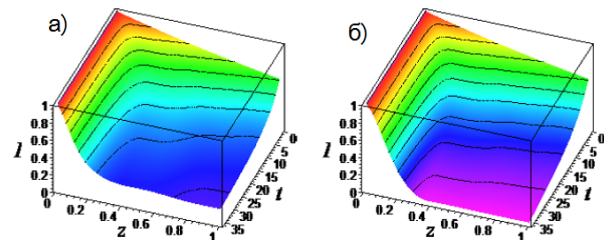


Рисунок 1.2. Качественная зависимость проходящей по капилляру мощности излучения I от времени t и продольной координаты z для двух способов усреднения.

Для оптимизации электронно-оптической системы для экстремальной фокусировки пучка с учетом экспериментально полученных параметров пучка ранее в ИЯФ СО РАН была разработана конструкция установки плазменного ускорения (Рис. 1.3), состоящая из фокусирующей системы I для поперечного сжатия пучка электронов и плазменной секции II. В приведенных данных в табл. 1 приведены полученные данные и расчет среднеквадратичного поперечного отклонения пучка в плазменном канале с уточненными параметрами (только отличающиеся значения). Получены необходимые значения жесткости линз.

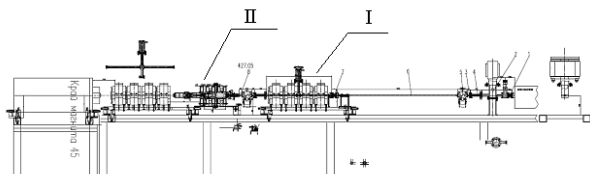


Рисунок 1.3. Схема конструкции установки по плазменному ускорению в ИЯФ СО РАН: I – фокусирующая система из четырех квадрупольных линз.

Таблица 1. Параметры пучка перед и после кильватерного ускорения.

Параметры	Перед установкой	Выходные значения
Горизонтальная бета-функция	12.4529 м	0.00996387 м
Вертикальная бета-функция	19.8101 м	0.0409695 м
Горизонтальная альфа-функция	-1.67534	0
Вертикальная альфа-функция	-8.31531	0
Гор. среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.535 мм	0.015 мм
Вертик. среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.3147 мм	0.014 мм
Дисперсионная функция	0.002516 м	-0.00012859 м

2. Разработка оптимальной схемы вакуумированного стенда для ускорения электронов в газовой струе с системой регистрации параметров ускоренных электронов

Численный анализ захвата и ускорения электронов показал следующее:

- Для эффективного захвата требуется сфокусировать лазерный импульс до диаметра ~ 10 мкм. Длина Рэлея и эффективная длина ускорения при этом будут около 0.5 мм.
- Оптимальная плотность плазмы $3 \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
- При энергии лазерного импульса 0.3 Дж максимальная энергия электронов не превышает

100 МэВ. При энергии 0.1 Дж следует рассчитывать на энергию ~ 65 МэВ, в лучшем случае.

- Максимальная энергия комптоновских гамма-квантов может достичь 240 кэВ и 100 кэВ, соответственно (Рис. 2.1a), и основная часть излучения будет в угле ~ $1/\gamma$, где релятивистский фактор электронов $\gamma \sim 150 \div 200$, как показано на Рис. 2.1b.
- Для минимизации энергетического разброса электронов необходима сверхзвуковая газовая струя с плоским профилем плотности.

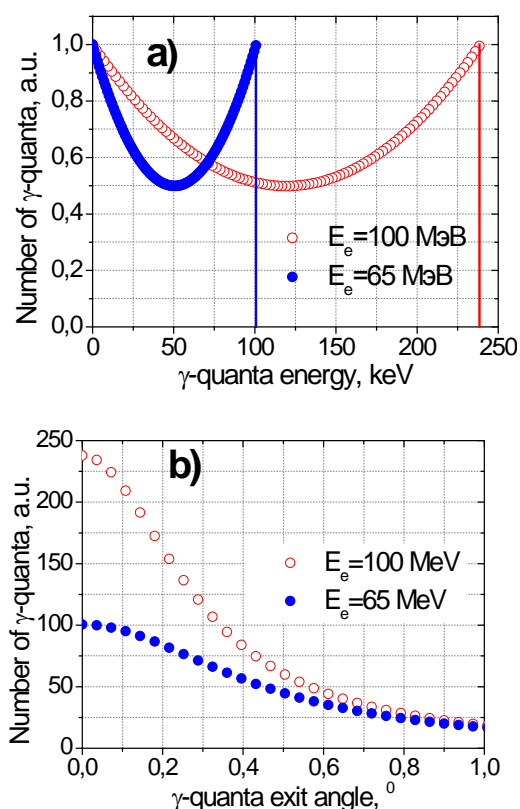


Рисунок 2.1. Энергетическое (a) и угловое (b) распределения комптоновских гамма-квантов. Оценки сделаны для прямого рассеяния 810 нм фотонов на моноэнергетических электронах.

3. Создание элементов вакуумированного стенда для ускорения электронов в газовой струе

Для изучения лазерных методов ускорения частиц был разработан специализированный экспериментальный стенд [1,2]. Основные элементы стенда – сопло Лавала с импульсным клапаном, компрессор лазерного импульса с параболическими зеркалами, диагностики электронного пучка – будут размещаться в трех вакуумных объемах: камере компрессора, камере со сверхзвуковой газовой струей и фокусирующей

щими зеркалами, диагностической камере с поглотителем пучка. Схема последних двух камер показана на Рис. 3.1. В базовом сценарии эксперимента один и тот же суб-петаваттный фемто-секундный лазерный импульс с высоким контрастом будет обеспечивать и ионизацию газа, и формирование плазменного канала, и возбуждение кильватерной волны, и захват плазменных электронов в эту волну. Этот сценарий и постановка эксперимента типичны для экспериментов по лазерному кильватерному ускорению.

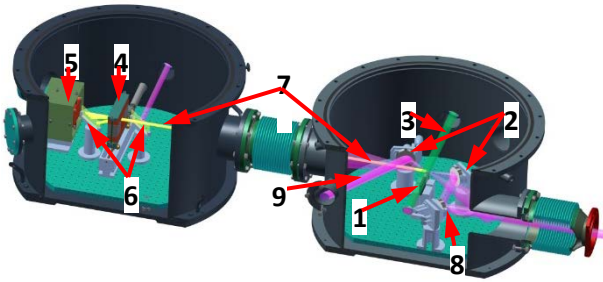


Рисунок 3.1. Две экспериментальные камеры (без камеры компрессора): 1 – сверхзвуковая газовая струя, 2 – фокусирующие зеркала, 3 – луч для диагностики плотности струи, 4 – магнит электронного спектрометра, 5 – цилиндр Фарадея, 6 – люминофорные экраны, 7 – электронный пучок, 8 – луч ускоряющего лазерного импульса, 9 – луч рассеиваемого лазерного импульса.

4. Разработка и создание цилиндра Фарадея для измерения полного заряда пучка на уровне единиц пикокуллона и энергией в районе 100 МэВ

В качестве основной диагностики ускоренных электронов были выбраны цилиндр Фарадея и магнитный спектрометр. Цилиндр Фарадея (Рис. 4.1) рассчитан на полную остановку 100 МэВ электронов с минимальным обратным рассеянием. Цилиндр Фарадея представляет собой кубообразный конденсатор FC со сторонами около 20 см в каждом направлении. Одна из пластин конденсатора сделана из вольфрама толщиной 6 см с алюминиевым покрытием толщиной 1 см. Емкость конденсатора равна 14 пФ. Цилиндр Фарадея позволяет измерять заряд ультракоротких электронных сгустков (длительностью менее 1 псек) с высокой точностью (разрешение лучше 1 пКл) без дополнительной сложной электроники и без необходимости специальных калибровочных процедур. Цилиндр Фарадея изготовлен и успешно проверен на 120 МэВ электронном пучке инжекционного комплекса ВЭПП-5 (Рис. 4.2).



Рисунок 4.1. Цилиндр Фарадея в экспериментальном зале инжекционного комплекса ВЭПП-5 во время теста под пучком.

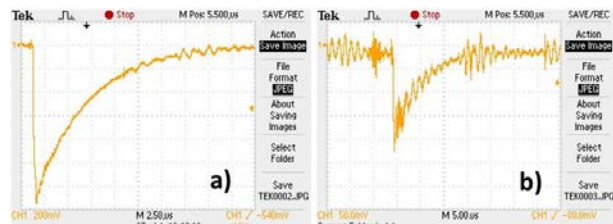


Рисунок 4.2. Сигналы с цилиндра Фарадея, измеренные на пучке линейного ускорителя ВЭПП-5: заряд электронного сгустка 72.3 пКл (a) и 14 пКл (b).

5. Разработка и создание элементов системы выпуска сверхзвуковой газовой струи

Численный анализ истечения газа показал, что можно использовать простое сопло Лаваля конической формы с диаметром в узкой части 0.3 ± 0.4 мм, выходным диаметром 1.5 мм и углом раствора 14° . В этом случае газовая струя с плотностью 10^{19}см^{-3} и числом Маха 4 получается при входном давлении газа до 10 атм. Будет использоваться быстрый импульсный клапан Festo, который позволяет работать с частотой до 10 импульсов в секунду. Было изготовлено и протестировано несколько вариантов сопла (Рис. 5.1), и теперь газовая система с импульсным клапаном готова к использованию. Измеренные параметры струи близки к расчетным.

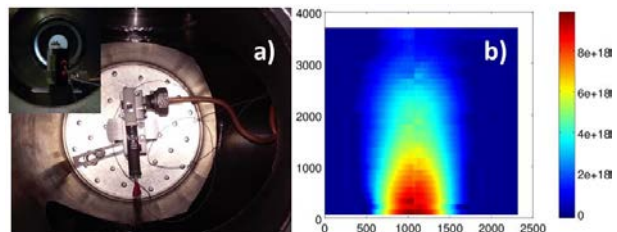


Рисунок 5.1. Сопло Лаваля с импульсным клапаном внутри испытательного стенда (a) и измеренный профиль плотности струи (b).

6. Разработка и создание элементов компактной системы измерения энергии пучка с энергией в районе 100 МэВ.

Электронный спектрометр основан на магнитном анализаторе с отклоняющим магнитным полем 0.75 Т. Анализатор выполнен на постоянных магнитах (Рис. 6.1). Отклоненный пучок регистрируется люминофорным экраном Rепех и фиксируется специальной CCD камерой. В настоящее время оба устройства изготовлены и тестируются на электронном пучке высокой энергии в ИЯФ СО РАН.

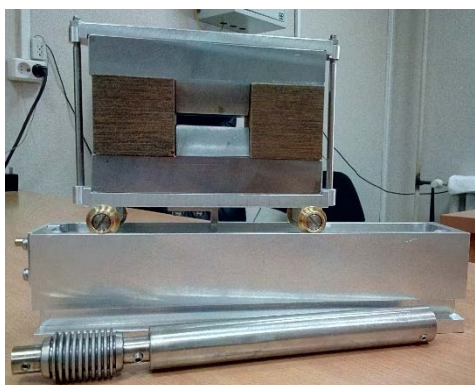


Рисунок 6.1. Прототип электронного спектрометра. Постоянные магниты временно заменены диэлектрическими вставками.

7. Исследование способов генерации контролируемого кильватерного шума для численного моделирования неустойчивостей релятивистских заряженных пучков в плотной плазме

Если в какой-либо среде заряженная частица движется со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде, то возникает Черенковское излучение. При численном моделировании PIC (Particle-in-Cell) кодами фазовая скорость электромагнитных волн обычно считается некорректно (получается меньше, чем должна быть). Поэтому, если моделировать PIC-кодами движение релятивистских электронов, то получается, что в численной схеме они движутся быстрее фазовой скорости света. Тогда в соответствии с уравнениями Максвелла, на основе которых и написан численный код, будет возникать так называемая численная Черенковская неустойчивость. То есть, в области моделирования появляется электромагнитное излучение, которого быть не должно, но оно вносит серьезные изменения в эволюцию всех моделируемых процессов, что видно на рисунке 7.1.

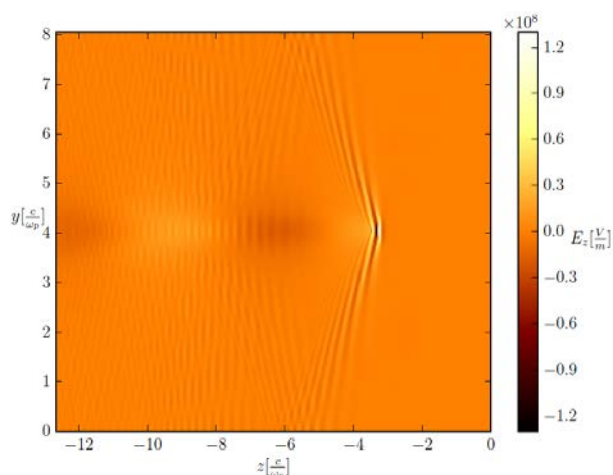


Рисунок 7.1. Результаты численного моделирования движения точечной релятивистской заряженной частицы в плазме. Отчетливо видна «ударная волна» численного черенковского излучения. Моделирование проведено в сотрудничестве с Университетом Людвиг-Максимилиана (Мюнхен).

Чтобы бороться с появлением этой неустойчивости, не слишком усложняя при этом численную модель, возникла идея моделировать не точечные заряженные макрочастицы, а с определенной продольной плотностью заряда. Простейший вариант – тонкий протяженный заряженный стержень. Известно, что амплитуда черенковского излучения пропорциональна амплитуде соответствующей гармоники, которую можно рассчитать, сделав Фурье-преобразование от функции плотности заряда. На рисунке 7.2 представлены амплитуды Фурье-образов, посчитанных для некоторых конфигураций плотности заряда.

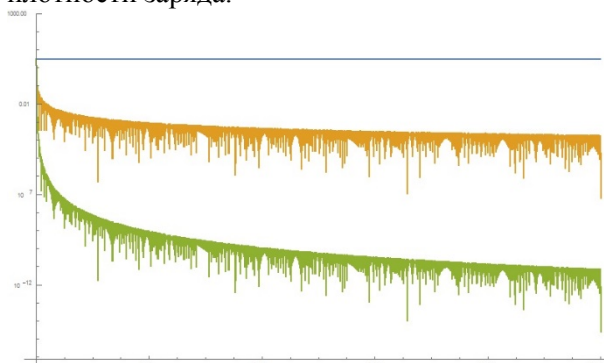


Рисунок 7.2. Зависимость амплитуды Фурье-образа от величины волнового числа k в логарифмическом масштабе. Синяя линия соответствует точечному заряду, желтая – равномерно заряженному стержню, зеленая – стержню с косинусоидальным распределением заряда (плавное нарастание функции с нулевого значения в начале стержня и плавное уменьшение в ноль на конце). Для стержней функции являются ос-

циллирующими, поэтому из-за численных не-точностей компьютерного счета при отрисовке графиков на линиях имеются «всплески».

Для плазменных волн характерно значение k порядка единицы, а для черенковского излучения – большие значения. Как видно из графиков, в области малых k амплитуды примерно одинаковы для всех трех функций плотности заряда, то есть, на моделирование плазменных кильватерных шумов замена точечного заряда на стержень не повлияет. В области же больших k ситуация резко меняется: косинусоидальный профиль обеспечивает гораздо меньшую амплитуду гармоники, а, следовательно, и амплитуду численного черенковского излучения (рисунок 7.3).

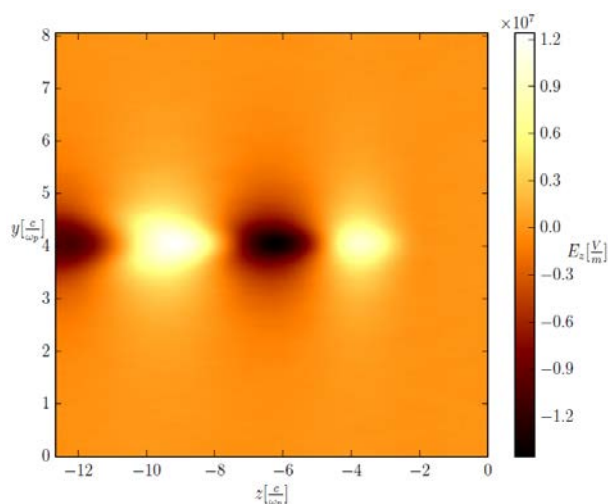


Рисунок 7.3. Результаты численного моделирования движения релятивистского заряженного стержня с косинусоидальным распределением плотности заряда. По сравнению со случаем точечной частицы численное черенковское излучение пренебрежимо мало. Моделирование проведено в сотрудничестве с Университетом Людвиг-Максимилиана (Мюнхен).

Именно для такого профиля получены аналитические формулы, описывающие амплитуду шумов. Созданная теоретическая модель проверена численным моделированием, которое провели вычислители из Института Людвиг-Максимилиана (Мюнхен). Однако в теории потребовалось сделать корректировку: в численном моделировании используются периодические граничные условия. Эти условия, грубо говоря, обеспечивают бесконечность моделируемого пространства таким образом, будто все пространство состоит из одинаковых областей, каждая из которых в точности совпадает с областью численного расчета. В этом слу-

чае нельзя говорить о равномерном распределении генерируемых стержней во всем пространстве, поскольку существует корреляция между стержнями, которые находятся в одних и тех же точках каждого «окна» (ведь все пространство получается состоящим из таких «окон»). Учет этого эффекта позволил получить совпадающие результаты, что изображено на рисунке 7.4.

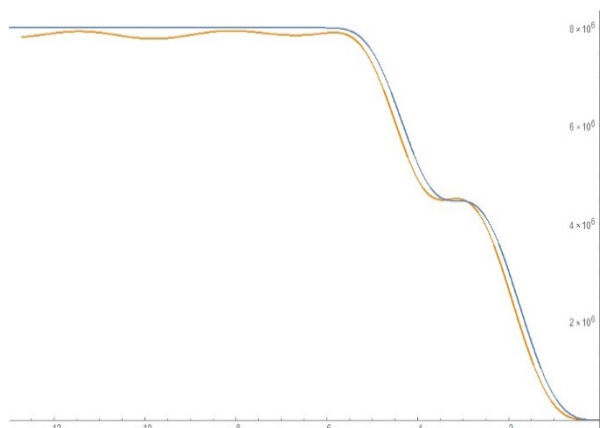


Рисунок 7.4. График зависимости амплитуды шумового кильватерного поля от продольной координаты. Стержни длиной 3.14 генерируются в промежутке $[-3.14, 0]$ и оставляют позади себя представленное на графике поле. Синяя линия соответствует теоретической формуле, а желтая – результаты численного моделирования, проведенного вычислителями из Университета Людвиг-Максимилиана (Мюнхен).

Заключение

Этап 2016 года не предполагал непосредственного получения научных результатов, а имел целью заложить инфраструктурные и теоретические основы для будущей работы. Вместе с тем, в 2016 году были доведены до публикаций ранее выполненные работы [3,4].

Работы по лазерным методам ускорения (главы 2-6) велись в сотрудничестве с Институтом лазерной физики СО РАН (ИЛФ), причем вклад ИЛФ финансировался в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения», проект 3.8. «Генерация когерентного излучения фемтосекундной длительности в рентгеновском и гамма диапазонах при комптоновском рассеянии на ультрарелятивистских электронах».

Теоретические работы (глава 7) велись в сотрудничестве с Университетом Людвиг-Максимилиана (Мюнхен, Германия).

Список использованных источников

- [1]. V.I. Trunov, K.V. Lotov, K.V. Gubin, E.V. Pestryakov, S.N. Bagayev, P.V. Logachev, Laser-driven plasma wakefield electron acceleration and coherent femtosecond pulse generation in X-ray and gamma ranges. Technical Digests, VII International Symposium “Modern Problems of Laser Physics” (MPLP-2016), p.97-98.
- [2]. K.V.Lotov, V.I.Trunov, K.V.Gubin, E.V.Pestryakov, R.I.Spitsyn, P.V.Tuev, S.N.Bagayev, P.V. Logachev, Guiding Femtosecond Laser Pulses by Copper Capillaries for Laser-Driven Plasma Wakefield Acceleration. Technical Digests, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT), Minsk, Belarus, 2016.
- [3]. P.V.Tuev, K.V.Lotov, Mode structure of a short laser pulse propagating through a metal capillary. 43rd EPS Conference on Plasma Physics (Leuven, Belgium, 2016), Europhysics Conference Abstracts, Vol. 40A (European Physical Society, 2016), p. P5.088. (ISBN: 2-914771-99-1)
- [4]. K.V. Gubin, K.V. Lotov, V.I. Trunov, and E.V. Pestryakov, Modification of narrow ablating capillaries under the influence of multiple femtosecond laser pulses. J. Appl. Phys. 120, 113103 (2016). (<http://dx.doi.org/10.1063/1.4962457>)

№ 15.5.1 Разработка протонных и ионных ускорителей для научных, технологических, медико-биологических исследований и терапии рака

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов создания и применения протонных и ионных пучков для прикладных целей, а также результаты экспериментальных исследований 2016 года на установке УМС ЦКП «Геохронологии кайнозоя». Полученные и представленные в отчете результаты исследований продемонстрировали значительный прогресс в разработке методик использования ускорительной масс-спектрометрии при исследовании биологических объектов.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В рамках развития проекта ионного синхротрона с электронным охлаждением для терапии рака, на предыдущих этапах работы по проекту исследовались особенности соответствия выпускаемого пучка и современных сертифицированных методов облучения. В проектируемом синхротроне удалось совместить несколько схем выпуска, обеспечивающих, как непрерывный выпущенный пучок для строчного сканирования, так и импульсный пучок для поточечного сканирования. Электронное охлаждение дает возможность реализовать несколько специфических схем выпуска, таких как выпуск на комбинации и порционный выпуск. Следует отметить, что параметры пучков, выпускаемых с применением стандартных схем, при наличии электронного охлаждения, значительно улучшаются: увеличивается стабильность выпущенного тока, растет качество терапевтического пучка.

В 2015 году было завершено продолжительное исследование прототипа дипольного магнита быстроциклирующего бустерного синхротрона. Особенностью бустерного диполя является наличие знакопеременной (FDF) структуры градиента магнитного поля. На заключительной стадии была определена оптимальная форма торцевой фаски.

Был также изготовлен прототип впускного электростатического септума бустерного синхротрона. Отличительной особенностью

септума является то, что он также является электростатическим поворотом. При этом отпадает необходимость в магнитном септуме, экономится место и достигается компактность установки.

В рамках работ по созданию многозарядного ионного источника для ускорительного масс-спектрометра в 2014 году изготовлено два комплекта нового распылительных источников отрицательных ионов на энергию 50 кэВ и током 50 мкА, с возможностью одновременной загрузки 275 мишеней. В 2015 году, по программе биомедицинских исследований, был проведен УМС-анализ более 1000 образцов. Это стало возможным, благодаря модернизации УМС ИЯФ, позволившей увеличить скорость набора статистики по ионам радиоуглерода до 50 штук в секунду, для образцов, с незначительным превышением ^{14}C меток над естественным содержанием в живых системах. При этом, время набора статистики составляло 4 часа для барабана с 23 образцами, измерение одного оборота барабана – около 20 минут.

2. Разработка компактного протонного синхротрона для терапии рака

На рынке высокотехнологичного медицинского оборудования, существует значительный спрос на компактный протонный ускоритель для протонной терапии рака. Существующие конструкции сложны и имеют большую стоимость, что ограничивает доступность такого лечения для широких слоев населения. В связи с этим и были начаты работы по разработке компактного протонного синхротрона для терапии рака.

Результатом работы является создание самосогласованного концептуального проекта синхротрона с максимальной энергией 330 МэВ.

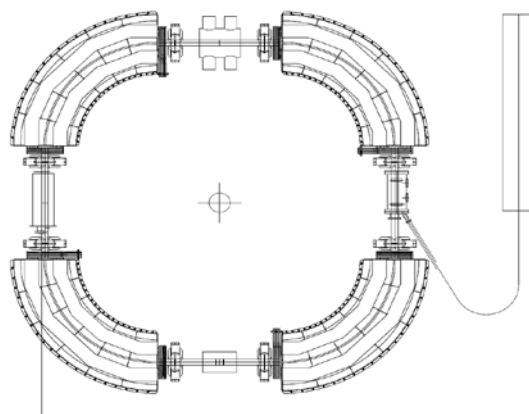


Рисунок 2.1. Общий вид протонного синхротрона вместе с инжектором.

В качестве инжектора в реполагается использовать ВЧ линейный ускоритель с жергией 2 МэВ. Магнитная система синхротрона, с периметром 15 м, состоит из 4 дипольных, и 8 квадрупольных магнитов. В свободных промежутках расположены элементы впуска/выпуска, ВЧ резонатор, и др. оборудование. Инжекция многооборотная, для этого создается локальное искажение равновесной орбиты вблизи впускного септума, с последующим плавным заполнением акцептанса ускорителя. Выпуск медленный, резонансный в течении 1-10 с.

3. Исследование прототипа инжекционного электростатического септума

В 2016 г. были проведены частичные испытания изготовленного прототипа впускного электростатического септума бустерного синхротрона. Отличительной особенностью септума является то, что он, также является электростатическим поворотом.

Септум представляет из себя искривленный, в соответствии с орбитой поворачиваемого пучка, электростатический поворот. Заземленный электрод одним краем равномерно утоньшается и формирует тонкий нож септума. Минимальная толщина ножа 0.1 мм.

Первым шагом были проверены геометрические размеры и точности изготовления, наличие ошибок изготовления, повторяемость при сборке-разборке и др. Далее септум был установлен на стенде, откачан, и обдуть на наличие течей. Затем были проведены высоковольтные электрические испытания септума. Проектная высоковольтная прочность была продемонстрирована.

Дальнейшие испытания септума возможны только при наличии пучка.

4. Эксперименты с образцами из биологических материалов на УМС

В 2016 году был проведен УМС-анализ более 200 образцов из биологических материалов. При этом отрабатывалась возможность детектирования методом УМС крайне незначительной концентрации вещества, «невидимой» другими методами. Для примера приведем актуальную проблему – загрязнение аэрозолем (частицами малого размера) воздуха в мегаполисах. Как известно частицы малого размера свободно проникают в легкие и частично в другие органы. Для исследования была взята группа мышей, вдыхавшая в течении 1-5 получасовых сеанса меченную ^{14}C аэрозоль размером 200 нм, при концентрации всего $10^3/\text{см}^3$. В Таблице 1.

приводится измеренная концентрация аэрозоли в органах мышей. Следует отметить, что ошибка измерения определяется разбросом индивидуальных особенностей отдельных особей, а не точностью УМС-анализа.

Таблица 1. Добавка концентрации ^{14}C за счет аэрозоля в единицах естественной концентрации радиоуглерода в различных органах мышцах.

	Печень	Сердце	Легкие	Почки	Мозг
Однократное воздействие			0.234 ± 0.05		
5-кратное воздействие	0.122 ± 0.03	0.023 ± 0.03	1.12± 0.2	0.049 ± 0.04	0.034 ± 0.02
	0.068 ± 0.03	0.006 ± 0.01	0.96± 0.2	0.052 ± 0.04	0.011 ± 0.01
	0.032 ± 0.03	0.006 ± 0.01	0.51± 0.2	0.02± 0.02	0.009 ± 0.01
	0.054 ± 0.04		0.76± 0.3	0.02± 0.01	

Из приведенной таблицы видно четкое детектирование воздействия низких концентраций аэрозоля на мышей. Наибольшее воздействие на легкие, на втором месте – печень.

Полученные результаты, не только представляют большой интерес для биологов, но позволяют совершенствовать методику УМС для широкого класса исследований.

Заключение

Концептуальный проект компактного протонного синхротрона вскрыл наличие значительных технических проблем, которые необходимо решить в процессе создания технического проекта. Получены положительные результаты стендовых испытаний септума без пучка.

Значительные результаты достигнуты при проведении экспериментов по исследованию образцов из биологических материалов на УМС. Продолжение и расширение тематик таких экспериментов запланировано на 2017-2021 годы.

Список использованных источников

- [1] Rastigeev, S.A., Goncharov, A.D., Klyuev, V.F., Konstantinov, E.S., Kutnyakova, L.A., Parkhomchuk, V.V., Petrozhitskii, A.V.,

- Frolov, A.R. Accelerator mass spectrometer with ion selection in high-voltage terminal. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. Vol. 13, Issue 7, 2016, p. 923-926.
- [2] Parkhomchuk, E.V., Gulevich, D.G., Taratayko, A.I., Baklanov, A.M., Selivanova, A.V., Trubitsyna, T.A., Voronova, I.V., Kalinkin, P.N., Okunev, A.G., Rastigeev, S.A., Reznikov, V.A., Semeykina, V.S., Sashkina, K.A., Parkhomchuk, V.V. Ultrasensitive detection of inhaled organic aerosol particles by accelerator mass spectrometry. *Chemosphere*. Vol. 159, 2016, p. 80-88.
- [3] S.A. Rastigeev, A.R. Frolov, A.D. Goncharov, V. F. Klyuev, E.S. Konstantinov, L. A. Kutnykova, V. V. Parkhomchuk, N. A. Petrishchev, A. V. Petrozhitskii. Radiocarbon analysis of different samples at BINP AMS. *Proc. of RuPac 2016, St. Petersburg, Russia*.

№ 15.5.2 Развитие методов электронного охлаждения в установках мегавольтного диапазона

Введение

Принцип действия установки электронного охлаждения основан на передаче тепловой энергии от пучка горячих тяжелых заряженных частиц – пучку холодных электронов, двигающихся совместно на выделенном участке накопительного кольца. Охлаждение приводит к сильному уменьшению, как поперечных размеров ионного пучка, так и разброса импульсов. Предельно достижимые температуры ионных пучков после охлаждения могут достигать долей градуса Кельвина в сопутствующей системе координат. Достижимые времена охлаждения, могут составлять десятки секунд, что позволяет проводить эксперименты на внутренней мишени без потери качества пучка. Идея электронного охлаждения была предложена в ИЯФ СО РАН в 1966 г и впервые успешно проверена на установках НАП-М и МОСОЛ. Впоследствии ИЯФ СО РАН участвовал в реализации электронного охлаждения в установках SIS-18 (Германия), CSR (Институт современной физики, Китай), CERN (Швейцария) и COSY (Германия).

Открытие экспериментами BABAR и CLEO, в 2003 году, мезонных резонансов вызвало огромный интерес к спектроскопии состояний с открытым очарованием. Этот интерес обусловлен тем, что массы и ширины найденных резонансов значительно меньше теоретически предсказанных. В последующие годы появилось несколько теорий, объясняющих необычные свойства этих состояний. К сожалению, в настоящий момент, невозможно проверить истинность этих теорий на основе существующих экспериментальных данных. Одним из ключевых параметров, для такой проверки, являются наблюдаемые ширины этих резонансов. Все установки, изучающие эти резонансы (BELLE, BABAR, CLEO-C), работают на e^+e^- коллайдерах, и, соответственно, не могут наблюдать их прямое рождение. Планируемый эксперимент PANDA на накопителе HESR, позволит наблюдать прямое рождение этих резонансов в антипротон-протонных аннигиляциях. В таком случае разрешение по инвариантной массе, рождающейся пары мезонов, будет ограничено только энергетическим разбросом пучка накопителя HESR, который должен быть меньше, чем 10^{-4} . Это делает необходимым использование электронного охлаждения вплоть

до максимальных значений импульса антипротонного пучка. Для получения высокого качества антипротонных пучков на высокой энергии в накопителях COSY и HESR планируется использование метода электронного охлаждения. Это позволит провести прецизионные эксперименты по определению масс короткоживущих и нестабильных ядер, а также провести поиск новых частиц, связанных с сильными взаимодействиями. Для реализации этой программы необходим электронный охладитель на энергию 4.5–8 МэВ.

Российский проект НИКА (ОИЯИ, г. Дубна [1, TDR]) посвящен изучению плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ионов со средней светимостью в диапазоне $10^{26} \div 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Это позволит провести уникальные эксперименты в физике адронной материи при экстремальных параметрах и, возможно, получить новое агрегатное состояние вещества – кварк-глюонную плазму (КГП) в состоянии "смешанной фазы" – переходном состоянии от КГП к адронной материи. Для получения ионных пучков, которые позволят осуществить данную научную программу необходимо электронное охлаждение, обеспечивающие малый размер пучков и высокую плотность энергии. В режиме доминирования эффектов пространственного заряда (малая энергия и большая линейная плотность ионного пучка) возможен темп роста фазового объема, который может быть остановлен только с помощью электронного охлаждения.

Решению обозначенных задач были посвящены этапы настоящего проекта. В результате выполнения работ по теме проекта в 2013 – 2014 годах были подготовлены главы в сводный промежуточный отчет ИЯФ СО РАН по государственному заданию, в 2015 году был подготовлен промежуточный отчет с инв. № ФАНО2015-0018.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В рамках реализации проекта на предыдущих этапах выполнения работ был разработан технический проект стенда для испытаний высоковольтного модуля электронного охлаждения на 4–8 МэВ. Следует отметить, что создание высоковольтных систем электронного охлаждения (с энергией в несколько МэВ) связано с большими техническими трудностями, поэтому в мире пока применялась только одна такая система: охладитель антипротонов с энергией электронного пучка 4.3 МэВ на комплексе Теватрон FNAL (США).

Для создания сильного сопровождающего магнитного поля в электростатическом ускорителе прямого действия на 4-8 МэВ планируется использование системы из 4 соленоидов и двух магнитных полюсов. При проектировании магнитного элемента были учтены различные требования на зазор, электростатическую мощность и потребляемую энергию, что в результате позволило сконструировать наиболее оптимальную систему.

Одно из предложений для передачи энергии под высокий потенциал для установок электронного охлаждения мегавольтного диапазона основывается на использовании сжатого газа в качестве переносчика энергии. В рамках данного проекта прототип турбины был разработан, изготовлен и испытан.

Совместно с международным центром ОИЯИ, г. Дубна начата разработка проекта установки электронного охлаждения для ускорительного комплекса НИКА [5], предназначенного для экспериментов с пучками ионов в области высоких энергий (4 ГэВ/н) связанных с поиском и изучением новых форм барионной материи, понимание причин связанности кварков в нуклонах, поиск причин нарушения симметрии и других фундаментальных проблем физики элементарных частиц. Следует отметить, что данная система электронного охлаждения будет первой в мире, в которой будет производиться одновременное охлаждение встречных пучков в коллайдере.

2. Исследование процессов электронного охлаждения на высокой энергии

В сотрудничестве с лабораторией COSY (Германия) проведены исследования охлаждения на высокой энергии на установке, созданной при участии ИЯФ СО РАН [1]. Продолжено изучение охлаждения в продольном (рис. 2.1) и в поперечном направлениях (рис. 2.2). Видно, быстрое охлаждение и образование "холодного" ядра протонов с малым продольным разбросом. Исследовалась возможность использования электронного охлаждения для подавления эффектов ионизационных потерь, связанных с действием внутренней мишени. Охлаждение бунчированных пучков может быть важной частью экспериментов с внутренней мишенью, взаимодействием встречных ионных пучков, накоплением и ВЧ преобразованием сгустков частиц. Короткая длина сгустков ионов увеличивает светимость столкновений коллайдеров, дает старт времяпролетных экспериментов на детекторах и позволяет добиться коротких импульсов при выпуске частиц. Поэтому была

проведена исследовательская работа по совместному действию внутренней мишени и ВЧ полей различной конфигурации (барьерное ВЧ и первая гармоника основного ВЧ). Найдены режимы, когда действие ВЧ полей и электронное охлаждение успешно дополняют друг друга. При использовании электронного охлаждения, параметры пучков не деградировали и существенно превосходили значения, получаемые при использовании только ВЧ (рис. 2.3).

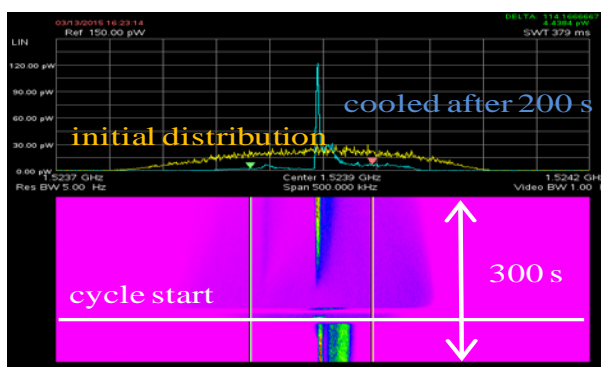


Рисунок 2.1. Работа электронного охлаждения вместе с циклом работы синхротрона. На рисунке приведен сигнал с широкополосного пикап-электрода регистрирующего разброс частот обращения протонов в синхротроне. Полная ширина экрана спектра-анализатора (500 кГц) соответствует разбросу продольного импульса частиц $\Delta p/p=5 \cdot 10^{-3}$, длительность цикла 300 сек, энергия электронного пучка 908 кеВ, энергия протонного пучка 1660 МэВ.

На основе полученных экспериментальных данных при работе установки на энергии 909 кэВ был сделан следующий шаг в энергии охлаждаемого электронного пучка до 1250 кэВ. На данном уровне было получено продольное охлаждение (рис. 2.4) и замечены признаки начала поперечного охлаждения.

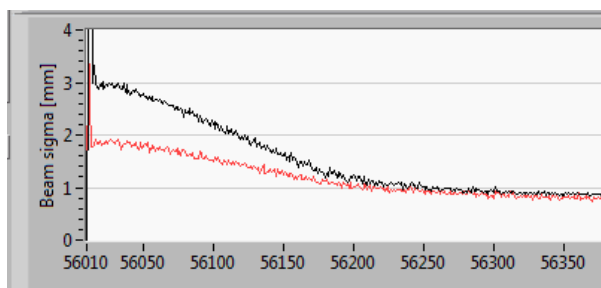


Рисунок 2.2. Изменение поперечного размера пучка в процессе электронного охлаждения. По оси абсцисс отложено время в секундах относительно условного начала цикла нескольких экспериментов, по оси ординат – вертикальный и горизонтальный размер протонного пучка в мм.

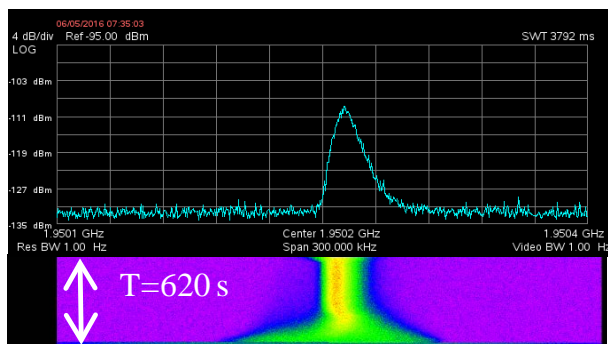


Рисунок 2.3. Продольное охлаждение протонов на энергии электронного пучка 1256 кВ.

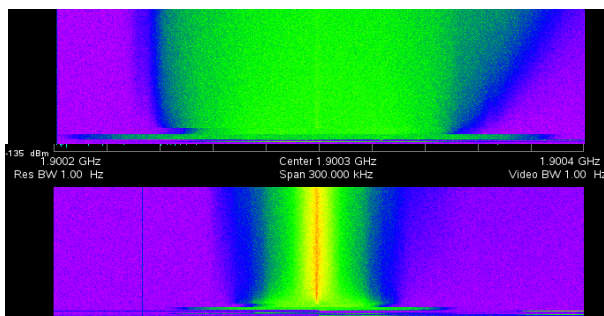


Рисунок 2.4. Продольная динамика пучка, сверху – ВЧ и внутренняя мишень, снизу – ВЧ, электронное охлаждение и внутренняя мишень.

3. Техническое проектирование элементов стенда для установки электронного охлаждения на 4-8 МэВ

Реализация электростатического ускорителя на 4-8 МэВ для установки электронного охлаждения в виде однородной ускорительной конструкции связано с большим количеством технических сложностей. Более рациональным выглядит идея использовать модульную систему построения электростатического ускорителя. Каждая секция оборудована источником энергии в виде секции каскадного трансформатора или пневмотурбины. Предложенный подход позволяет разработать принципиально новую модульную концепцию построения установок электронного охлаждения на высокую энергию. Каждая новая установка собирается из готовых унифицированных модулей на любую заданную энергию. Каждый модуль состоит из пневмогенератора, двух катушек для создания магнитного поля в ускорительной трубке и блока управляющей электроники. Вся конструкция помещена в металлический каркас, изолирующий содержание секции от объема высоковольтного бака. Электронная схема управления высоковольтной секции основана на использовании сигнального процессора. Данный подход позволяет совместить в одном устрой-

стве решение всех задач управления: синхронизацию процессов, измерение опорных сигналов секции, управление ШИМ сигналами для источников питания высокого напряжения и соленоидов, организацию обратных связей, взаимодействие с внешними системами управления и др.

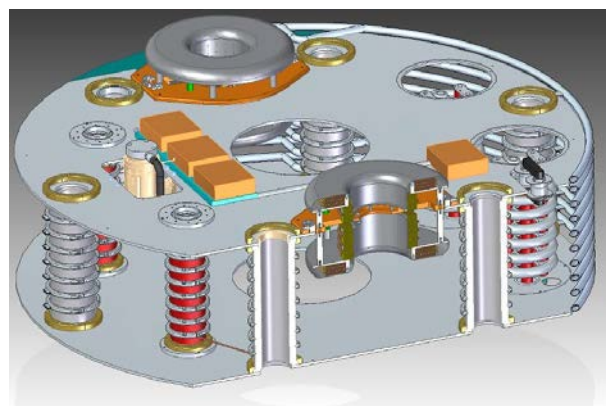


Рисунок 3.1. Проект стенда для проверки основных элементов установки электронного охлаждения на 4-8 МэВ.

Для отработки критических элементов конструкции разработан технический проект стенда для испытаний высоковольтного модуля электронного охлаждения на 4-8 МэВ (рис. 3.1). Наиболее существенными элементами в нем, являются прототипы магнитного соленоида ускоряющей колонны, высоковольтный модуль и способ передачи энергии под высокий потенциал. Магнитное поле создается с помощью модуля, состоящего из 4-соленоидов и железного полюса магнита, формирующего однородное магнитное поле в зазоре между секциями. Для генерации высокого напряжения выбран метод с использованием каскадного умножителя хорошо себя зарекомендовавшего в промышленных блоках разработанных и испытанных в ИЯФ СО РАН.

4. Развитие новых подходов к реализации электронного охлаждения на высокой энергии

Совместно с международным центром ОИЯИ, г. Дубна начата разработка проекта установки электронного охлаждения [3] для ускорительного комплекса НИКА предназначенного для экспериментов с пучками ионов в области высоких энергий (4 ГэВ/н). Данная система электронного охлаждения будет первой в мире, в которой будет производиться одновременное охлаждение встречных пучков в коллайдере. На рис. 4.1 показана система электронного охлаждения коллайдера НИКА, состоящая из

двух независимых охладителей. Как и в охладителе для COSY ускоряющая и замедляющая трубки каждого охладителя расположены в одном баке с элегазом (SF_6) под давлением до 8 атм. Электронный пучок рождается в пушке, расположенной в баке, ускоряется в электростатической трубке и по транспортному каналу направляется в секцию охлаждения, где взаимодействует с ионами. После секции охлаждения, по другому транспортному каналу он снова приходит в электростатический ускоритель, тормозится в замедляющей трубке и поглощается в коллекторе. Для максимально эффективного использования участка, выделенного под систему электронного охлаждения, секции охлаждения обоих охладителей расположены одна над другой и имеют одинаковую длину. Электронные пучки в них, как и ионные будут двигаться в противоположные стороны.

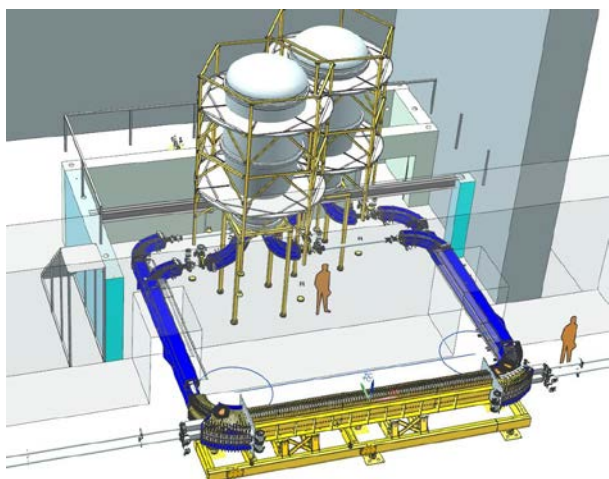


Рисунок 4.1. Внешний вид охладителей и их расположение относительно двухпучкового канала НИКА.

Одним из ключевых пунктов для реализации электронного охлаждения на высокую энергию является конструкция электронной пушки и коллектора. Наличие остаточного газа в секции охлаждения и транспортных каналах ведет к тому, что его атомы после ионизации способны ускоряться в ускорительной и замедляющей трубках. Это приводит к бомбардировке вакуумных поверхностей высоковольтного терминала заряженными частицами, что может вызывать вторичную эмиссию электронов. Данный эффект может приводить к деградации свойств катода электронной пушки, увеличению вторичной эмиссии из коллектора и риску возникновения вакуумных пробоев, связанных с замыканием паразитной электрон – ионной положительной обратной связи. Одним из способов уменьшить этот эффект является использо-

вание локального магнитного поворота в области пушки и/или коллектора. На схеме, показанной на рис. 4.2 коллектор устанавливается непосредственно над пушкой. В таком случае магнитный поток из пушки замыкается с потоком коллектора, но она требует достаточной высоты высоковольтного терминала (более 1 м). Во второй схеме размещения коллектора он устанавливается рядом с пушкой. При этом нет жесткого требования для радиуса поворота и его можно сделать меньше. На рисунке 4.2 изображен коллектор с радиусом поворота 20 см. Для электронов с энергией 20 кэВ поворотное магнитное поле равно 24 Гс. Поперечное смещение отраженного пучка примерно равно 6 см при продольном поле 500 Гс. Данная схема ниже схемы с коллектором, расположенным на пушке, но пропадает преимущество замыкания магнитных потоков.

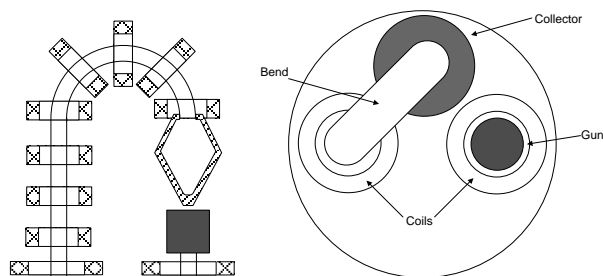


Рисунок 4.2. Схема коллектора с поворотом. Коллектор установлен непосредственно над пушкой (слева) и коллектор и пушка разведены (рис. справа).

Экспериментальные результаты, полученные на установке электронного охлаждения COSY [5], показывают перспективность использование оптической схемы в которой происходит разведение траекторий первичного и вторичного пучков. В данной установке это решалось за счет использования фильтра Вина (электростатического поля). Но присутствие электрического поля способно вести к другой проблеме связанной, главным образом, с развитием Пеннинговского разряда. Поэтому работы по развитию методов подавления попадания вторичных частиц, рожденных в вакуумном объеме высоковольтного терминала, должны быть продолжены.

5. Исследование метода передачи энергии для установок электронного охлаждения к электронным модулям, расположенным под высоким потенциалом

Максимальная энергия электронов, в большинстве электронных охладителей, состав-

ляет величину от нескольких десятков до нескольких сотен кэВ. Создание высоковольтных систем электронного охлаждения (с энергией в несколько МэВ) связано с большими техническими трудностями, поэтому в мире пока применялась только одна такая система: охладитель антипротонов с энергией электронного пучка 4.3 МэВ на комплексе Теватрон FNAL (США). Данный охладитель использовал концепцию “незамагнитченной” (отсутствие сильного продольного поля) оптики пучка. Эксперименты с внутренней мишенью и встречными пучками требуют максимальных значений декремента охлаждения, что обуславливает необходимость новых подходов к данной проблеме. Одной из наиболее существенных проблем, стоящих при проектировании такой установки, является создание электростатического ускорителя на 4-8 МэВ. Его особенностью является наличие сильного продольного магнитного поля вдоль ускорительной трубки. Для его создания необходимо передавать большую мощность (порядка 30 – 40 кВт) вдоль ускорительной колонны к секциям, расположенным под разным потенциалом. В установке Теватрон использовался механический вал из диэлектрического материала, что приводило к ряду технических проблем [6].

Традиционным подходом для передачи энергии является создание каскадного трансформатора на основе элементов с общим магнитопроводом. В этом случае осуществляется хорошая связь между соседними трансформаторами и низкая индуктивность рассеяния. В случае большого числа секций вторичные обмотки могут быть возбуждены либо параллельно, либо последовательно. В первом случае необходимо наличие переменных магнитных полей практически во всей внутренней области высоковольтного бака. Это может приводить как к пульсациям энергии электронного пучка, так и к необходимости экранировать область ускорительных трубок от высокочастотной составляющей магнитного поля. В случае каскадного возбуждения трансформаторов можно добиться, чтобы все переменные магнитные поля были сосредоточены в относительно небольшой области. Высокая магнитная проницаемость магнитопровода не дает гарантии, что все рассеянные магнитные поля останутся внутри него. Это приводит к необходимости установки в каждую секцию большого количества дополнительных компенсирующих конденсаторов. Для уменьшения индуктивности рассеяния был предложен способ одновитковых обмоток связи, по принципу трансформатора с объёмным витком. Чертеж прототипа каскадного трансформатора на показано на рисунке 5.1. Экспериментальное

исследование данной конструкции дало уменьшение индуктивности рассеяния, по сравнению с прежней конструкцией в 2-3 раза. Этого пока не достаточно для реализации полностью бескондесаторной конструкции для передачи полной мощностью в случае наличия большого числа секций, но может быть использовано в проектах, рассчитанных на передачу меньших значений мощности в установках на меньшее значение полного напряжения (или меньшего количества секций).

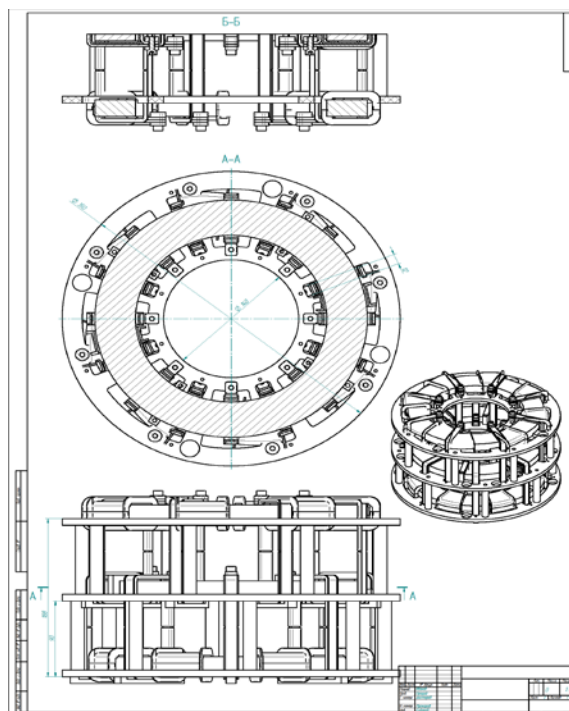


Рисунок 5.1. Прототип каскадного трансформатора.

Заключение

Полученный в ходе работы научный и научно-технический задел имеет высокую значимость как для продолжения фундаментальных научных исследований, так и для практического использования полученных результатов.

Список использованных источников

- [1] Технический проект ускорительного комплекса НИКА. Под общей редакцией И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова. Дубна. 2015, т.1-т.4.
- [2] V. Kamerzhiev, U. Bechstedt, F.M. Esser, et al // 2MeV Electron Cooler for COSY and HESR – First Results // Proceedings of IPAC 2014 (5th International Particle Accelerator Conference), Dresden, Germany, June 15-20 2014, MOPRI070, p. 765-767, ISBN 978-3-95450-132-8.

- [3] E.V. Ahmanova, A.G., Kobets, I.N. Meshkov et al. Electron cooler for the NICA collider. Proceedings of COOL 2013 Murren, Switzerland, June 10-14 2013, WEPP008, p. 113-115, ISBN 978-3-95450-140-3.
- [4] Н.И. Алиновский, А.Д. Гончаров, В.Ф. Ключев, С.Г. Константинов, Е.С. Константинов, А.М. Крючков, В.В. Пархомчук, М.В. Петриченко, С.А. Растигеев, В.Б. Рева, Ускорительный масс-спектрометр СО РАН, ЖТФ, 2009, том 79, выпуск 9, стр. 107-111.
- [5] М.И. Брызгунов, А.В. Иванов, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, В.Б. Рева, Повышение эффективности электронного коллектора для систем электронного охлаждения при помощи фильтра Вина, Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 6, с. 139-146.
- [6] G. Kazakevich, A. Burov, C. Boffo, et al. Recycler Electron Cooling project: Mechanical vibrations in the Pelletron and their effect on the beam. Preprint FERMILAB-TM-2319-AD, 2005, <http://lss.fnal.gov/archive/test-tm/2000/fermilab-tm-2319-ad.pdf>.

№ 15.5.3 Электронные пучки большой мощности для фундаментальных и технологических применений

Введение

Начиная с 1971 года ИЯФ СО РАН разрабатывает и производит ускорители электронов типа ЭЛВ и ИЛУ мощностью до 100 киловатт для применения их в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Промышленные ускорители электронов используются для модификации свойств различных материалов. Вместе с тем, ускорители могут быть использованы для генерации потоков гамма-излучения.

К настоящему времени Институт поставил более 150 ускорителей. Рынком сбыта, кроме России и стран СНГ, являются Китай, Южная Корея, Индия, Япония, Польша, Чехия, Америка. Китай начал выпускать собственные ускорители аналогичного класса и становится конкурентом на собственном внутреннем рынке. В этих странах также ведутся исследовательские работы по развитию электронно-лучевых технологий и ускорителей электронов.

В лабораториях ИЯФ СО РАН, производящих ускорители ЭЛВ и ИЛУ, ведутся работы по совершенствованию ускорителей, расширению диапазонов параметров по энергии, мощности и выпуска пучка для развития радиационных технологий.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Разработан, изготовлен и испытан ускоритель ЭЛВ с энергией 0,6 МэВ и током 25 мА предназначенный для радиационного модифицирования резинотехнических изделий. Особенности этого ускорителя является повышенная равномерность дозы облучения и то, что он разработан в локальной защите. Равномерность дозы $\pm 5\%$ достигнуто за счет изменения формы тока продольного сканирующего магнита.

Был изготовлен промышленный ускоритель электронов ЭЛВ 4 с энергией электронов 1 МэВ и током пучка 100 мА, предназначенный для скоростной рентгеновской томографии. В результате исследовательских работ уменьшены пульсации энергии до $\pm 5\%$ пульсаций тока до $\pm 2\%$, что позволяет использовать ускорители ЭЛВ для быстрой томографии.

Для повышения прочности ускорительных трубок ускорителей серии ЭЛВ был проведен ряд исследований. Была предложена и исследована схема подавления обменных процессов обратным потенциалом на широком электроде. В результате применения этой схемы повысилась прочность ускорительных трубок, а время вывода ускорителей на максимальные параметры по току и энергии сократилось до 10 раз. Выросла стабильность тока и энергии.

Была спроектирована и изготовлена лабораторная установка для получения нанопорошков с применением мощного электронного пучка, выпущенного в атмосферу. Изготовлены системы контроля и управления процессом, в частности система подачи инертного газа в испарительную камеру с регулируемым расходом и частичным замыканием потока с целью экономии газа, система управления и контроля работы установки.

Была разработана и изготовлена новая система управления ускорителями серии ИЛУ на основе модулей CompactRio производства фирмы National Instruments. Эта система имеет 110 каналов ввода/вывода, в настоящее время задействованы 58 каналов.

Была разработана и изготовлен макет новой системы сканирования и выпуска электронного пучка для ускорителей серии ИЛУ, проведены измерения распределения напряженности магнитного поля в макетной магнитной системе.

2. Выбор режимов работы ускорителя ЭЛВ для быстрой томографии

Ускорители ЭЛВ могут быть использованы для генерации потоков гамма-излучения в томографических установках. Для этих целей Institute of Safety Research, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Германия приобрел в ИЯФ ускоритель электронов ЭЛВ-4. На данный момент произведен наклон ускорительной трубки на 36° от вертикали (см. Рис. 1), выпущен пучок электронов с током пучка 20 мА и энергией 1 МэВ, пульсации энергии составили $\pm 0,6\%$, пульсации тока 0% .

Диаметр пучка, при фокусном расстоянии 2 м и токе пучка 0,5 мА, составил 3,5 мм.

Выбранный режим ускорителя удовлетворяют томографическим требованиям, что позволяет использовать ускорители ЭЛВ в промышленной томографии.



Рисунок 1. Собраный ускоритель ЭЛВ-4 с наклоненной ускорительной трубкой.

3. Разработка и изготовление высоковольтного источника питания на основе ЭЛВ, для тандемного ускорителя ионов с целью уменьшения его размера по высоте

Для питания тандемного ускорителя выпрямленным напряжением $U_0 = 1.2$ МВ применяется выпрямитель на основе ускорителя ЭЛВ-2. Однако высота этой установки ($h = 3.85$ м) была признана слишком большой. Для уменьшения высоты выпрямителя было предложено выпрямитель ЭЛВ перевернуть вниз головой и электроды тандема подсоединять непосредственно к секциям выпрямительной колонны ЭЛВ. В этом случае количество секций выпрямительной колонны ЭЛВ определяется высотой проходного изолятора тандема БНЗТ и составляет 17 секций вместо 37 в существующем варианте. Так как максимальное рабочее напряжение на стандартной выпрямительной секции ЭЛВ, изготовленной по схеме с удвоением напряжения на катушке, составляет 40 кВ, то на колонне из 17 секций можно получить полное напряжение только $U_0 = 0.68$ МВ. Поэтому для нового выпрямителя была разработана выпрямительная секция по схеме с учетверением напряжения на катушке ($U_{\text{сек}} = 80$ кВ). Для проверки конструктивных узлов перевернутого ускорителя в ИЯФ СО РАН был разработан и успешно испытан выпрямитель высотой $h_{\text{п}} = 1.9$ м и при напряжении $U_0 = 0.7$ МВ.

Для проверки выпрямителя, собранного с секциями по схеме с учетверением, под нагрузкой с током пучка он был собран как стандартный вертикальный ускоритель ЭЛВ с

проходным изолятором тандема БНЗТ и ускорительной трубкой посередине колонны (см. Рис. 2). Максимальное полученное напряжение $U_0 = 1.2$ МВ при токе пучка $I_0 = 20$ мА.



Рисунок 2. Выпрямитель с секциями, собранными по схеме с учетверением напряжения.

4. Совершенствование системы силового питания ускорителей ЭЛВ

В стандартных ускорителях серии ЭЛВ вторичные катушки выпрямительных секции имеют 3000 витков. Частота питания первичной обмотки составляет около 400 Гц от машинного преобразователя частоты или от инвертора на IGBT транзисторах.

Была спроектирована и изготовлена колонна выпрямительных секций, имеющая катушки с 2000 витками для ускорителя ЭЛВ-4.

Проведены долговременные испытания на параметрах: энергия электронов 1,5 МэВ, ток 67 мА (100 кВт) с питанием первичной обмотки от инвертора на частотах 760 и 820 Гц.

5. Модернизация и испытание ускорителя 0,5 МэВ, ток 100 мА для радиационной модификации резинотехнических изделий

По условиям предложенным шинным заводом “Zheng Shi Tai Lai” (г. Чинчжоу, пров. Шаньдун), ускорительная установка в местной защите должна была вписаться в действующую

экструзионную линию, производящую кордовую основу для изготовления автомобильных покрышек. Площадка для монтажа установки имела размеры 6,5 x 6,5 м и 6,0 м в высоту.

Проект был разработан ИЯФ СО РАН. Элементы местной защиты изготовлены в Китае (г. Тайюань). Общий вес установки (местная защита, ускоритель и вспомогательное оборудование) около 60 т.

Сборка защиты и установка сосуда ускорителя (см. Рис. 3) проведены в течение 10 дней. Обвязка, наладка, испытания и сдача-приемка – около 1 месяца. Энергия электронов 0,5 МэВ, ток 100 мА.

Оговаривалось время остановки работы экструзионной линии – не более 3 дней. В действительности, за все время монтажа линия была остановлена на 4 часа во время установки вспомогательной кран-балки.



Рисунок 3. Ускорительная установка в местной защите на шинном заводе “Zheng Shi Tai Lai”, Китай (г. Чинчжоу, пров. Шаньдун).

6. Совершенствование системы подачи инертных газов

Для проведения экспериментов по обработке материалов высокоэнергетичным пучком электронов в среде инертных газов было спроектировано и изготовлено устройство (рис. 4) защиты технологического окна герметичного объема от попадания внутрь объема кислорода и других газов из атмосферы.

В газовом затворе организованы потоки газов, создающие небольшое избыточное давление в герметичной камере (50-100 Па). Это предотвращает попадание газов из атмосферы через отверстие, предназначенное для прохождения пучка электронов.

7. Проведение экспериментальных работ по получению нанопорошков

В отчетном году было проведено испытание системы непрерывного вращения емкости

с исходным сырьем на полупромышленной установке по получению нанопорошков оксидов металлов. Также проводились испытания нового газопылевого тракта.

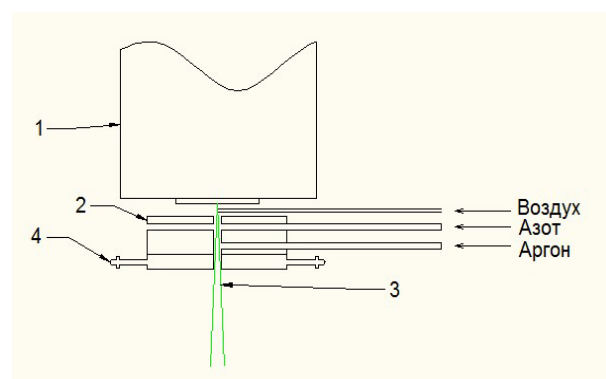


Рисунок 4. Схема газового затвора.

С марта по июль 2016 года проведены работы на полномасштабной установке на базе ЭЛВ-6 по получению наноразмерных порошков оксида алюминия из промышленного оксида алюминия, представлявшего собой крупку Al_2O_3 с чистотой 98,7 % по содержанию основного вещества. Получение порошков проводилось в процессе испарения твердого исходного материала с последующей конденсацией высокотемпературных паров в виде наночастиц, которые оседали на элементах установки. Процесс осуществлялся при различной мощности, максимальная мощность в пучке электронов достигала 70 кВт.

8. Проведение экспериментальных работ по наплавке порошковых материалов на металлы с целью формирования коррозионно стойких покрытий

В результате наплавки электронным пучком, выпущенным в атмосферу, порошков хрома, никеля, молибдена, титана, меди на основах из стали 10 и стали 12ХН3А были сформированы коррозионностойкие слои сплавов, идентичных нержавеющей сталям марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и 06Х23Н28М3Д3Т.

На титановые основы из сплавов ВТ1-0 и ВТ14 была наплавлена смесь порошков тантала, ниобия, титана и флюса или тантала, циркония, титана и флюса с целью формирования поверхностного слоя, состоящего из сплавов систем Ti-Ta-Nb или Ti-Ta-Zr. Показано, что данные покрытия обладают коррозионной стойкостью в сильных кислотах, таких, как азотная и серная при температурах кипения, в десятки раз превышающей стойкость титановой основы, на

которой они сформированы. Стойкость этих покрытий также в десятки раз превышает стойкость нержавеющей стали широкого применения, таких, как 12Х18Н10Т.

9. Изучение свойств нанопорошков и их применений

Получены образцы порошков оксида алюминия. Проведены предварительные исследования произведенных материалов. Они показали, что оксид алюминия по кристаллической структуре представляет собой корунд (альфа- Al_2O_3). Измерена удельная поверхность полученного нанопорошка, она составила $50 \text{ м}^2/\text{г}$. Проводятся дальнейшие исследования полученных материалов. Модернизированная установка показала свою работоспособность. В ближайшее время планируется продолжение работ на ней с использованием других исходных материалов.

10. Изготовление новой системы управления ускорителем ИЛУ-6

Разработана и изготовлена новая система управления ускорителем ИЛУ-6 на основе модулей CompactRio производства National Instruments. Эта система имеет 110 каналов ввода/вывода. Для управления ускорителем пока задействованы 58 каналов ввода/вывода. На рис. 5 показана изготовленная в 2015г. новая система управления подготовленная для наладки и проведения испытаний.

В 2016г. новая система управления была установлена в пультовой ускорителя ИЛУ-6 в здании №15 ИЯФ СО РАН.

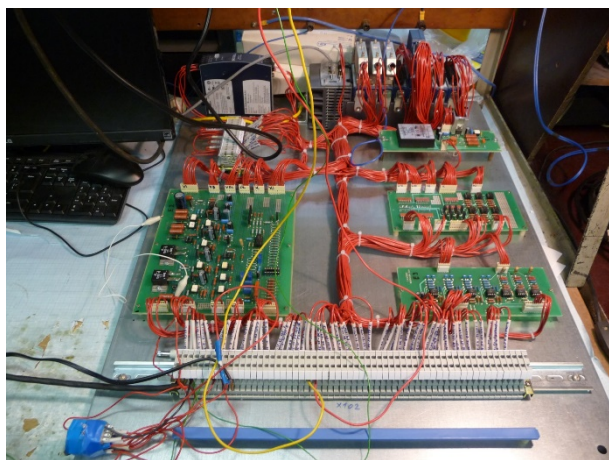


Рисунок 5. Новая система управления ускорителем ИЛУ-6 подготовленная для наладки и проведения испытаний.

11. Разработка и отладка программы управления ускорителем ИЛУ-6 для новой системы управления

Были проверены 2 варианта прототипа программы управления перед подключением к ускорителю ИЛУ-6.

12. Наладка и испытания системы управления на ускорителе ИЛУ-6

В 2016г. был начат процесс наладки и испытания новой системы управления ускорителем ИЛУ-6.

13. Доработка и корректировка системы управления ускорителей ИЛУ

В процессе наладки до подключения к ускорителю были произведены незначительные изменения в системе управления ускорителем ИЛУ.

14. Разработка проекта новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ

В 2015 году был разработан проект новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителей ИЛУ. Главным требованием к новой системе выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10 является неравномерность выходного дозного поля не хуже $\pm 5\%$. По техническому заданию ширина зоны равномерного облучения должна составлять 80 см при энергии пучка в интервале 4,5-5 МэВ. Существующий аналог, выпускное устройство промышленного ускорителя ИЛУ-10, обеспечивает требуемую ширину зоны облучения при энергии пучка до 5 МэВ и неравномерности выходного дозного поля до $\pm 10\%$.

В 2016г. велись разработка и изготовление системы питания и управления новой системой выпуска пучка. Была изготовлена, смонтирована на ускорителе ИЛУ-10 в здании 16 ИЯФа, налажена и запущена в работу система питания новой развёртки пучка с тремя электромагнитами – основным сканирующим электромагнитом, корректирующим электромагнитом и линзой Панофского.

Параметры системы питания основного сканирующего электромагнита: напряжение питания – до 600 В, максимальный ток – до 250 А (для ускорителя ИЛУ-10) и до 200 А для ускорителя ИЛУ-8.

15. Моделирование проводки пучка в выпускном устройстве ускорителя ИЛУ-10

В рамках работы по расчёту магнитной сканирующей системы проводилось моделирование проводки пучка в выпускном устройстве ускорителя ИЛУ-10 с целью определения параметров магнитного поля сканирующего и корректирующего электромагнитов.

Расчет поля электромагнита коррекции проводился программой MERMAID. Моделируемый электромагнит должен иметь прямоугольный разборный магнитопровод с двумя катушками, на каждую из которых намотано по 30 витков. Ширина зоны отклоняющего магнитного поля вдоль движения пучка должна быть около 10 см, расчётное сечение магнитопровода выбрано равным $30 \times 60 \text{ мм}^2$, расчетное сопротивление обмоток $8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$. По результатам этого расчёта величина амплитуды магнитного поля составила 0,02 Тл. Для получения такой величины поля (с учетом геометрических размеров магнитопровода и числа витков на его катушках) максимальный ток в обмотках электромагнита должен составлять 70 А.

Расчет траекторий движения электронов, а также выходной плотности тока пучка проводился с помощью программных средств пакета MathCAD.

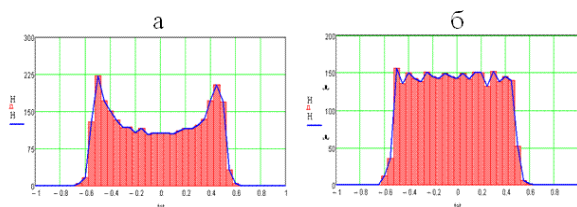


Рисунок 6. Гистограммы выходной плотности тока пучка – а – без коррекции, б – с применением корректирующего электромагнита.

На рис. 6а приведена расчётная гистограмма распределения выходной плотности тока развернутого пучка без использования электромагнита коррекции. Видно, что плотность тока на границах зоны облучения увеличивается. Дополнительное корректирующее поле приводит к уравниванию скоростей сканирования пучка вдоль выпускного окна и достижению необходимой неравномерности дозного поля в зоне облучения (рис. 6б).

На рис. 7 приведены расчётные данные скорости сканирования электронного пучка вдоль выпускного окна без коррекции и с включенным корректирующим магнитом. На рис. 8

приведены формы сканирующего и корректирующего магнитных полей во время импульса пучка.

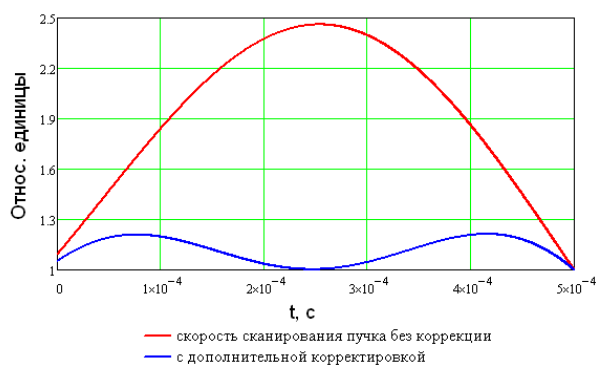


Рисунок 7. Скорость сканирования пучка вдоль выпускного окна раструба во время импульса.

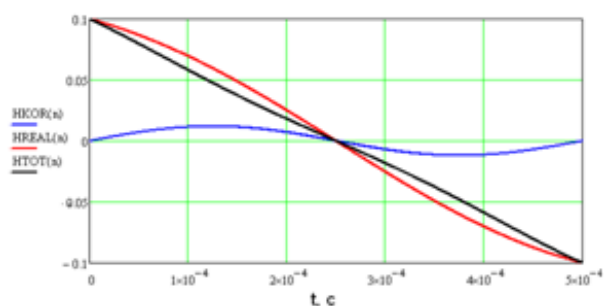


Рисунок 8. Распределения сканирующего (HREAL), корректирующего (HKOR) и суммарного (HTOT) магнитных полей.

При углах выхода электронов из выпускного окна ускорителя, отличных от 90° , глубина их проникновения в материал уменьшается, поэтому пучок должен выходить в атмосферу перпендикулярно облучаемой продукции на всей длине выпускного окна ускорителя. Для получения на выходной фольге раструба пучка с одинаковыми угловыми характеристиками, особенно при больших углах сканирования, необходима установка вблизи выпускного окна доворотного электромагнита (линзы Панофского). В магнитном поле линзы траектории электронов поворачиваются так, что пучок падает на фольгу выпускного окна под углом близким к прямому на всём протяжении выпускного окна (см. рис. 9).

Данная система выпуска пучка позволяет получать неравномерность дозного поля в зоне облучения не более $\pm 5\%$ на длине сканирования 80 см. Рассчитаны дополнительные электромагниты для корректировки пространственных и угловых характеристик пучка при движении в электронно-оптическом канале системы выпуска и на выходе из ускорителя.

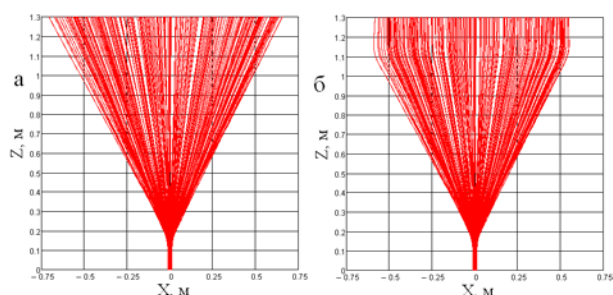


Рисунок 9. Электронные траектории пучка в раструбе ускорителя в процессе сканирования: а – без линзы Панофского, б – с применением линзы Панофского вблизи выпускного окна (градиент магнитного поля линзы 0.15).

16. Изготовление новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10

В 2016г. новая система развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителей серии ИЛУ была изготовлена и установлена на ускорителе ИЛУ-10 в здании №16 ИЯФа (см. рис. 10).



Рисунок 10. Новая система развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителей серии ИЛУ была изготовлена и установлена на ускорителе ИЛУ-10.

Главное отличие новой системы выпуска пучка от существующей состоит в том, что в ней предусмотрен дополнительный электромагнит для коррекции сканирующего магнитного поля (рис. 11), располагающийся перед основным электромагнитом развертки пучка.

Дополнительное корректирующее магнитное поле приводит к уравниванию скоростей сканирования пучка вдоль выпускного раструба, за счет чего достигается необходимая неравномерность дозного поля в зоне облучения. Для получения на выходной фольге раструба пучка с вертикальными относительно выпускного окна электронными траекториями в новой системе выпуска используется доворотный электромагнит (линза Панофского, рис. 11).



Рисунок 11. Сильфонный узел и электромагнит коррекции(вверху) и линза Панофского (внизу).

17. Наладка и испытание новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10

Новая система развёртки и выпуска электронного пучка была установлена на ускорителе ИЛУ-10 в здании №16 ИЯФа, налажена и запущена в работу.

Измерение равномерности дозного поля вдоль выпускного окна ускорителя на ширине зоны облучения 80 см на начальном этапе проводилось при помощи набора алюминиевых датчиков тока при энергии электронов 5 МэВ, импульсном токе пучка 350 мА, частоте повторения импульсов 1 Гц и токе линзы Панофского 4.64 А (см. рис. 12). Распределения тока пучка снимались при разных значениях тока и времени развертки, а также с введением коррекции сканирующего поля. Все эти измерения проверялись при помощи дозиметров В3 WinDOSE.

Данные дозиметры подвергались радиационной обработке при рабочих параметрах ускорителя: импульсный ток 350 мА, энергия электронов 5 МэВ, частота повторения импульсов 20 Гц, скорость подпучкового конвейера 3 см/с.



Рисунок 12. Набор датчиков тока для измерения равномерности дозного поля.

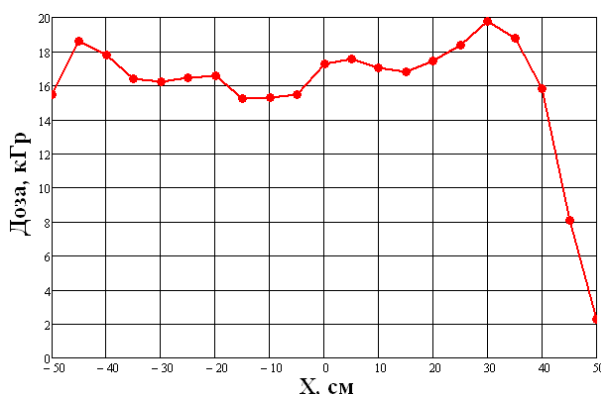


Рисунок 13. Распределение дозного поля вдоль выпускного окна ускорителя без коррекции развертки.

Для распределения, снятого без коррекции развертки, неравномерность дозы (на ширине сканирования 80 см) по датчикам составила $\pm 11.6\%$, по дозиметрическим пленкам: $\pm 13\%$ (см. рис. 13).

Добавление коррекции развертки улучшило неравномерность по датчикам в 2 раза: $\pm 5.8\%$. В дальнейшем была подобрана оптимальная форма коррекции сканирующего магнитного поля, при которой были сглажены ранее существующие неоднородности в распределении плотности тока пучка. Благодаря этому, была получена следующая неравномерность распределения дозного поля: по датчикам $\pm 4\%$, по пленкам $\pm 5\%$ (см. рис. 14).

Исходя из изложенных выше результатов, можно сделать вывод, что при помощи системы коррекции сканирующего поля удалось добиться существенного улучшения равномерности дозного поля вдоль выпускного окна ускорителя ИЛУ-10 (до $\pm 5\%$) по сравнению с предыдущим вариантом выпускного устройства без коррекции.

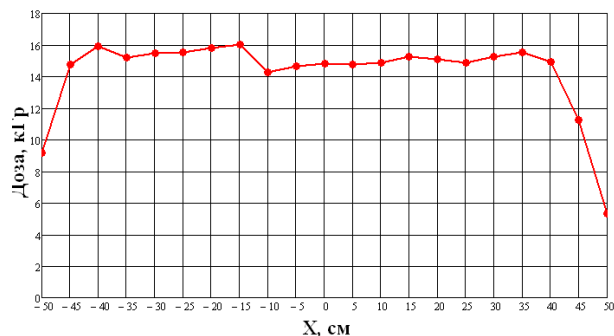


Рисунок 14. Распределение дозного поля вдоль выпускного окна ускорителя с коррекцией развертки.

18. Мониторинг радиационной обстановки рядом с бункерами в зданиях 15, 16 и 17

Совместно с Отделом радиационных исследований и радиационной безопасности проводился мониторинг радиационного фона при работе ускорителей в бункерах расположенных в зданиях 15, 16 и 17.

19. Доработка радиационной защиты в бункерах, расположенных в зданиях 15, 16 и 17

По итогам мониторинга произведено усиление радиационной защиты в бункере расположенном в здании 16.

Заключение

По направлению развития ускорителей типа ЭЛВ продолжались работы по следующим направлениям.

1. Совершенствование ускорителей электронов типа ЭЛВ, это работы:
 - Гл. 3. Совершенствование системы силового питания ускорителей ЭЛВ.
 - Гл. 4. Модернизация и испытание ускорителя 0,5 МэВ, ток 100 мА для радиационной модификации резинотехнических изделий.
2. Создание новых модификаций ускорителей и проблемы физики ускорителей заряженных частиц, работы:
 - Гл. 1. Выбор режимов работы ускорителя ЭЛВ для быстрой томографии.
 - Гл. 2. Разработка и изготовление высоковольтного источника питания на основе ЭЛВ, для тандемного ускорителя ионов с целью уменьшения его размера по высоте.
3. Создания научного и научно-технического задела для развития наукоемких технологий:
 - Гл. 5. Изучение свойств нанопорошков и их применений, полученных с сфокусированным пучком.

Гл. 6. Проведение экспериментальных работ по получению нанопорошков.

Гл. 7. Проведение экспериментальных работ по наплавке порошковых материалов на металлы с целью формирования коррозионно стойких покрытий.

Гл.8. Изучение свойств нанопорошков и их применений.

По направлению развития ускорителей типа ИЛУ продолжались работы по следующим направлениям.

4. Совершенствование системы управления ускорителями электронов типа ИЛУ:

Гл. 10. Изготовление новой системы управления ускорителем ИЛУ-6.

Гл. 11. Разработка и отладка программы управления ускорителем ИЛУ-6 для новой системы управления.

Гл. 12. Наладка и испытания системы управления на ускорителе ИЛУ-6.

Гл. 13. Доработка и корректировка системы управления ускорителей ИЛУ.

5. Совершенствование систем выпуска пучка ускорителей электронов типа ИЛУ:

Гл. 14. Разработка проекта новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ.

Гл. 15. Моделирование проводки пучка в выпускном устройстве ускорителя ИЛУ-10.

Гл. 16. Изготовление новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10.

Гл. 17. Наладка и испытание новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10.

6. Контроль радиационной обстановки в зданиях №15-17:

Гл. 18. Мониторинг радиационной обстановки рядом с бункерами в зданиях 15, 16 и 17.

Гл. 19. Доработка радиационной защиты в бункерах, расположенных в зданиях 15, 16 и 17.

Поставленные цели и задачи на 2016 год и в проекте в целом достигнуты.

№ 15.5.4 Разработка нейтронного источника на базе сильноточного ускорителя – тандема

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения онкологическая заболеваемость неуклонно растет: по прогнозам распространенность онкологических заболеваний в мире к 2020 году удвоится в сравнении с показателями 1999 г. Перспективным подходом в лечении ряда злокачественных опухолей, в первую очередь, трудноизлечимых опухолей головного мозга, рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), которая имеет чрезвычайно высокую привлекательность за счет избирательного воздействия непосредственно на клетки злокачественных опухолей.

Целью проекта является разработка источника эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, пригодного для проведения бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей в условиях онкологических клиник. Достижение цели проекта предполагается осуществить путем проведение экспериментальных, теоретических и расчетных исследований, разработки технической документации, изготовления опытных образцов элементов установки, модернизации источника нейтронов и верификации параметров нейтронного потока проведением *in vitro* и *in vivo* исследований.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

На предыдущих этапах работы был разработан проект инжектора ионов в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, включающий в себя модернизированный источник отрицательных ионов водорода, поворотный магнит и ускорительную трубку на 150 кВ.

Была разработана конструкция системы формирования пучка нейтронов (СФП), сделаны предложения по улучшению качества терапевтического пучка нейтронов и проведена оптимизация СФП, а также выполнен критический анализ всей системы.

Для того, чтобы сформировать более монохроматический пучок нейтронов, оптимальный для БНЗТ, было предложено использовать составной отражатель: графит – в передней полусфере и свинец – в задней.

Для экспериментального определения возможности оперативного детектирования

взрывчатых веществ с применением иммитатора разработаны, изготовлены и испытаны графитовые мишени.

Была изготовлена мишень на основе керамической пластины из нитрида бора (плотность 2,18 г/см³), закреплённой в специальной оснастке для генерации α -частиц. В конструкции мишени предусмотрена диафрагма, ограничивающая ток протонного пучка.

2. Установка источника отрицательных водорода на испытательный стенд, изготовление блоков питания и управления, запуск источника

Для развития установки «Тандем-БНЗТ» предложен источник отрицательных ионов водорода, способный генерировать ток на уровне 15 мА при энергии пучка 25-32 кэВ. Выполнены работы по подготовке системы питания и управления источника, а также испытания источника на стенде (рисунок 2.1, 2.2), включающем в себя вакуумный объём, средства откачки и контроля вакуума, окна для наблюдения за работой источника и диагностики для определения тока пучка.

Первый этап пусконаладочных операций состоял в получении вакуума на стенде с использованием средств вакуумной откачки, измерения уровня остаточного газа в вакуумной камере стенда. Для вакуумной откачки стенда применён турбомолекулярный насос с производительностью 3000 л/с. При отсутствии посторонних источников газа, вакуумный объём откачивается до остаточного давления $\sim 1,9 \cdot 10^{-5}$ Па. При ожидаемой скорости напуска водорода в ионный источник 0,1 л·торр/с предельный вакуум составит $3,3 \cdot 10^{-5}$ торр или $\sim 4,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Для пучка отрицательных ионов водорода с энергией ~ 30 кэВ сечение нейтрализации пучка на молекулах водорода составляет $4,2 \cdot 10^{-16}$ см², а значит потери частиц пучка на нейтрализацию при характерной дистанции пролёта 0,5 м будет иметь величину порядка 2,4%, что допустимо и может быть учтено при обработке экспериментальных данных.

На рисунке 2.3 показана схема поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода. Формирование пучка после зажигания водородно-цезиевого разряда в разрядной камере между катодом (2) и анодом (3) происходит благодаря подаче высокого напряжения на вытягивающий (4) и ускоряющий (5) электроды. Расчётные напряжения для генерации 15 мА пучка составляют 8 кВ вытягивающего напряжения и 24 кВ ускоряющего.

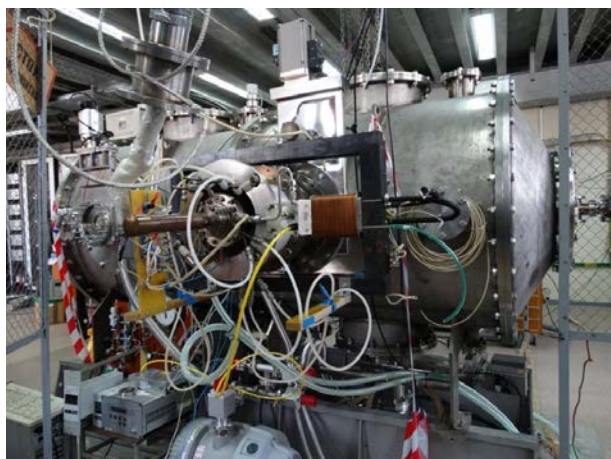


Рисунок 2.1. Ионный источник на испытательном стенде.



Рисунок 2.2. Стойка питания и управления источником отрицательных ионов водорода.

Проверка электрической прочности высоковольтных зазоров ионного источника была осуществлена путем подачи вытягивающее и ускоряющее напряжение от высоковольтного источника питания Spellman STR со встроенным вольтметром, обеспечивающим установку и контроль генерируемого напряжения с точностью 0,05 %. Затем для проверки электрической прочности высоковольтных зазоров ионного источника на них было подано вытягивающее и ускоряющее напряжение, генерируемое штатными источниками питания стойки контроля и управления источником. Контроль подаваемого

напряжения выполнялся при помощи электростатического киловольтметра С100 с основной погрешностью в пределах шкалы измерения $\pm 2,0$ %. Испытания показали, что электрическая прочность зазоров позволяет подавать напряжение 8 кВ на вытягивающий зазор источника и ~ 22 кВ на ускоряющий зазор источника, что соответствует 30 кэВ полной энергии пучка.

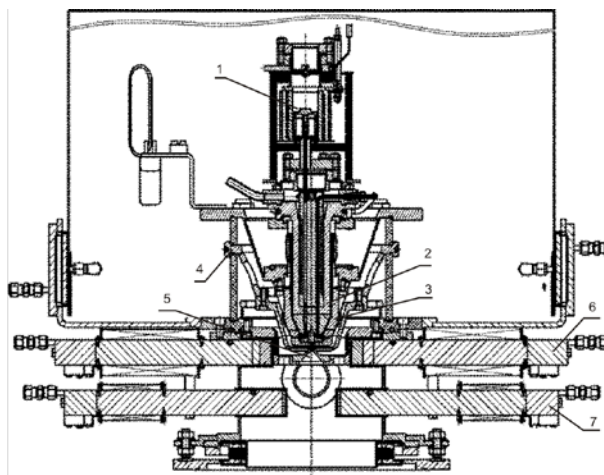


Рисунок 2.3. Схема пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода: 1- цезиевая печь; 2- катод; 3- анод; 4- вытягивающий электрод; 5- ускоряющий электрод; 6- магнит, создающий поле для формирования пеннинговского разряда; 7- магнит для коррекции траекторий ионного пучка.

Выполнена проверка зажигания разряда в ионном источнике. Стенд позволяет наблюдать за свечением разряда через вакуумное окно и регистрировать генерируемый пучок при помощи вторично-эмиссионных датчиков. Для запуска ионного источника использовались экспериментальные таблетки цезия, изготовленные Институтом химии твёрдого тела СО РАН. На начальном этапе эксперимента ионный источник работал не стабильно, но по мере покрытия цезием стенки разрядной камеры, горение разряда стабилизировалось. Система питания стабилизирует ток пеннинговского разряда, при этом напряжение может изменяться в зависимости от количества цезия, попавшего в разрядную камеру. После продолжительных запусков удалось стабилизировать разряд на напряжении 80-90 В, оптимальном для получения ионного пучка. На рисунках 2.4-2.6 показаны фотографии свечения разрядной дуги, видимое через эмиссионное отверстие ионного источника. Разряд малинового цвета происходит в атмосфере водорода, небесно-голубое свечение соответствует цезиевому разряду, а близкое к белому свечение даёт стабилизированный водородно-цезиевый разряд.

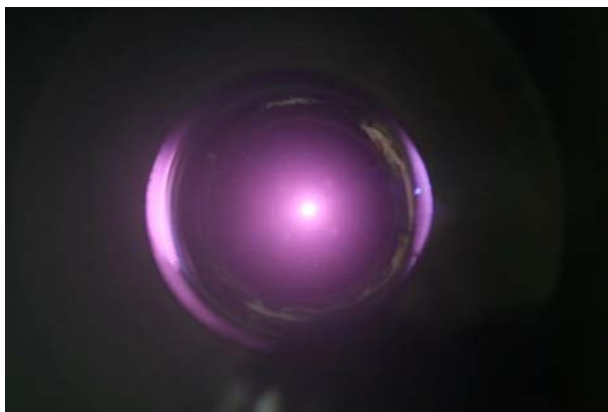


Рисунок 2.4. Водородный разряд.

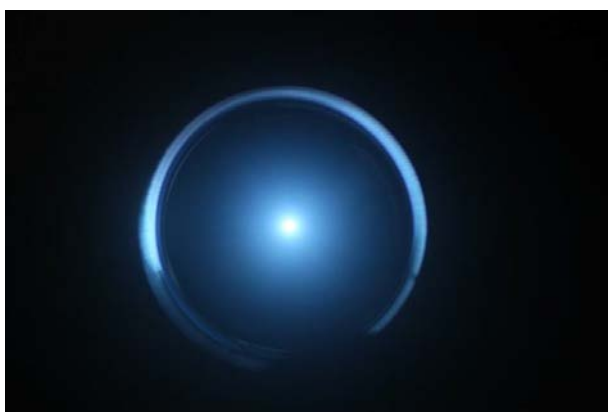


Рисунок 2.5. Цезиевый разряд.



Рисунок 2.6. Водородно-цезиевый разряд.

3. Разработка системы измерения эмиттанса ионного пучка

Для обеспечения эффективной транспортировки пучка, генерируемого ионным источником, необходимо иметь полные данные об эмиттансе формируемого пучка. Для измерения эмиттанса предложена диагностика типа «перечница», включающая в себя матрицу из тугоплавкого материала (тантал), имеющую группу отверстий, позволяющих вырезать из пучка поток тонких струек, и керамического экрана, на котором возможно наблюдать свечение от попа-

дающих струек пучка. Изображения пучка на керамике фотографируются камерой с высоким разрешением через смотровое окно. Обработка изображения учитывает ракурс фотографирования и позволяет определить положение центра и диаметр каждого пятна на координатной сетке, а также его яркость. Затем на основе полученных данных производится построение изображения пучка на фазовой плоскости xx' и yy' .

На рисунке 3.1 показана одна из возможных схем установки данной диагностики в планируемый тракт пучка. Универсальность элементов диагностики позволяет устанавливать её и в других местах ускорительного комплекса, в частности в существующий низкоэнергетический тракт (рисунок 3.2).

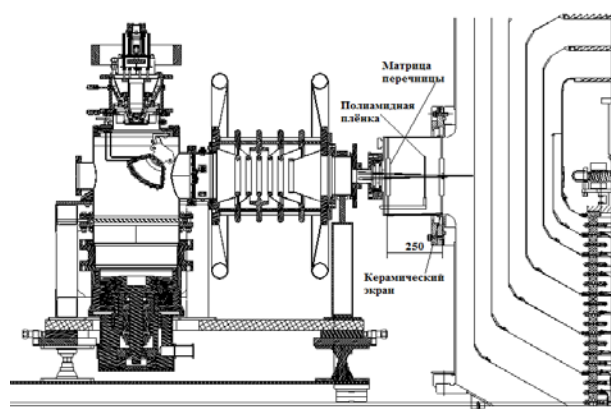


Рисунок 3.1. Схема эксперимента «перечница»

Танталовая матрица имеет толщину ~300 мкм и набор из 73 отверстий диаметром 0,4 мм, по форме представляющий снежинку (см. рисунок 3.3). Шаг отверстий 2 мм. Помимо фотографирования изображения пучка на керамическом экране, возможна фиксация отпечатка пучка на полимерном экране, расположенном на поворотном диске, позволяющем ввести этот экран в область пучка после получения первоначальной информации с керамического экрана.

Чтобы проанализировать угловые характеристики пучка с максимальной точностью, нужно поместить экран как можно дальше от матрицы, при этом необходимо следить за тем, чтобы изображения от струек пучка не накладывались друг на друга – это делает желательным уменьшение количества отверстий с увеличением дистанции между ними. Для получения более полной информации о профиле пучка, требуется наоборот увеличить количество отверстий насколько возможно и приблизить экран к матрице. Оценки разрешающей способности такой диагностики показывает возможность достижения углового разрешения до 0,8 мрад.

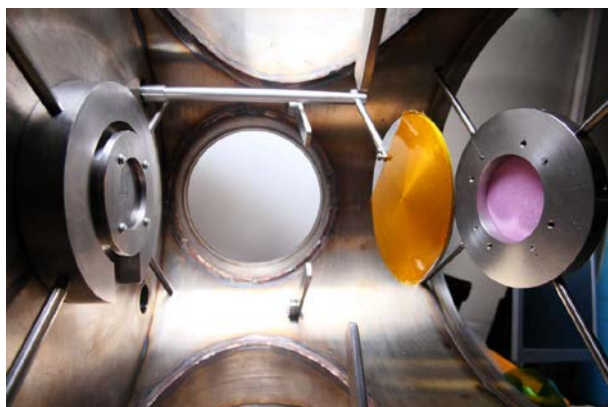


Рисунок 3.2. Элементы диагностики, установленные во входной объем ускорителя «Тандем-БНЗТ».



Рисунок 3.3. Падение света от точечного источника на расстоянии 720 мм от матрицы на керамический экран.

4. Измерение параметров ионного пучка и исследование его предускорения

Для измерения параметров пучка отрицательных ионов использовался подвижный цилиндр Фарадея. Для подавления вторичной электронной эмиссии с плоскости коллектора цилиндр Фарадея снабжён запирающей сеткой, на которую во время измерений подаётся запирающий потенциал -80 В, обеспечивающий возврат вторичных электронов. Для регистрации тока, проходящего на коллектор, с помощью АЦП измерялось падение напряжения на нагрузочном резисторе с сопротивлением 96 ± 1 Ом. Общая калибровка измерений производилась подачей на коллектор тока $20 \pm 0,5$ мА от источника питания, работающего в режиме стабилизации выходного тока. Для измерения профиля пучка с помощью передвижного коллектора производились измерения тока струйки пучка, ограниченной входной диафрагмой диаметром $0,4$ мм. Далее измеренный ток пересчитывался в значение локальной плотности тока пучка. На Рис. 4.1 показан измеренный профиль плотности тока пучка. Размеры пучка (диаметр 35 мм

по полувысоте профиля) соответствуют регулярной угловой расходимости пучка 85 миллирадиан.

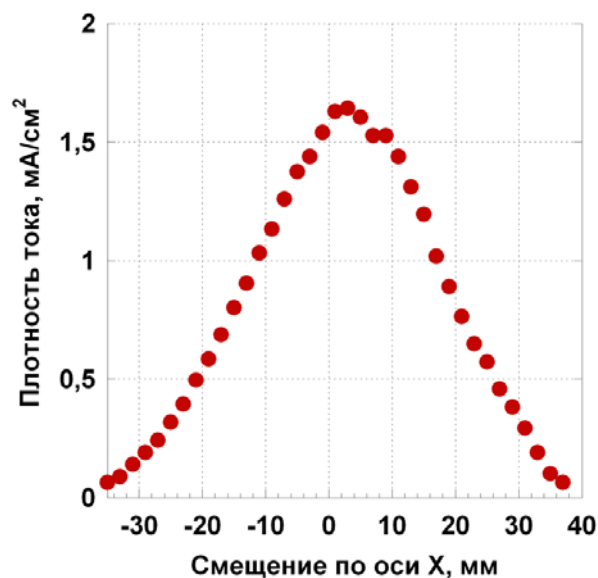


Рисунок 4.1. Профиль плотности тока пучка отрицательных ионов водорода.

Размер цилиндра Фарадея 50×50 мм меньше полного поперечного размера пучка в плоскости регистрации, так что регистрируемый цилиндром Фарадея ток составляет 90% полного тока пучка. Одновременно с регистрацией тока пучка записывались параметры работы источника: напряжения и токи ускорения и вытягивания, ток и напряжение пеннинговского разряда, параметры работы системы подачи цезия, температуры электродов. На рис. 4.2 показан снимок экрана управляющей программы для работы с источником. Представлены осциллограммы, полученные при работе источника в течение 3 часов. На рисунке показаны треки: красный – ток пучка, масштаб 100% соответствует 20 мА; голубой – ускоряющее напряжение, масштаб 100% соответствует 40 кВ; розовый – вытягивающее напряжение, масштаб 100% соответствует 10 кВ; зелёный – напряжение пеннинговского разряда, масштаб 100% соответствует 200 В. Источником стабильно генерируется ток, превышающий 14 мА при полной энергии $27,5$ кэВ.

Для проведения экспериментальных исследований по предускорению пучка отрицательных ионов водорода, ионный источник был установлен соосно с ускорительной трубкой, на выход которой установлен охлаждаемый цилиндр Фарадея (рисунок 4.3). На дне цилиндра располагается танталовая фольга, по регистрации свечения фольги определяется поперечный размер пучка. Осуществлена транспортировка

ионного пучка с током до 6 мА при напряжении доускорения 50,5 кВ, что соответствует полной энергии пучка 82 кэВ. Поперечный размер пучка не превышал 40 мм. Ведётся высоковольтная тренировка ускорительной трубки – напряжение доведено до уровня 80 кВ.

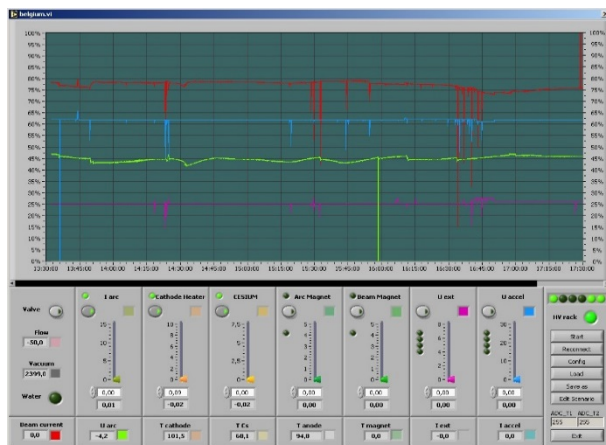


Рисунок 4.2. Треки параметров работы источника: красный – ток пучка, 100% соответствуют 20 мА; голубой – ускоряющее напряжение, 100% соответствуют 40 кВ; розовый – вытягивающее напряжение, масштаб 100% соответствуют 10 кВ; зелёный – напряжение пеннинговского разряда, масштаб 100% соответствуют 200 В.

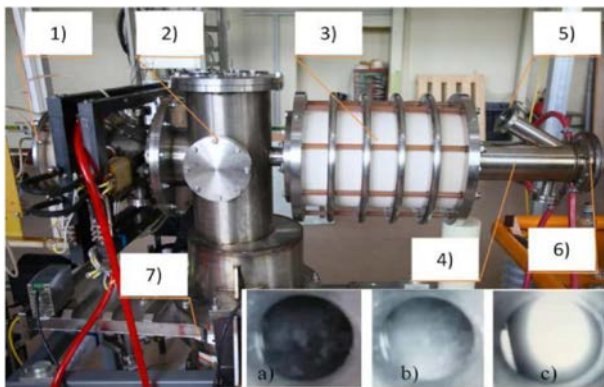


Рисунок 4.3. Постановка эксперимента по предускорению ионного пучка: 1 – 15 мА ионный источник; 2 – вакуумная камера; 3 – ускорительная трубка; 4 – цилиндр Фарадея; 5 – вакуумное окно наблюдения; 6 – положение танталовой фольги; 7 – вакуумный шиббер и откачка. Фотографии танталовой фольги: а) без пучка; б) 6 мА без предускорения; с) 6 мА с напряжением предускорения 50,5 кВ.

5. Разработка и изготовление системы защиты для обеспечения норм радиационной безопасности при генерации нейтронов

Методом Монте-Карло [1] выполнено численное моделирование процессов переноса

протонов, нейтронов и гамма-квантов в нейтронообразующей мишени, изображенной на рис. 5.1 и ее окружении.

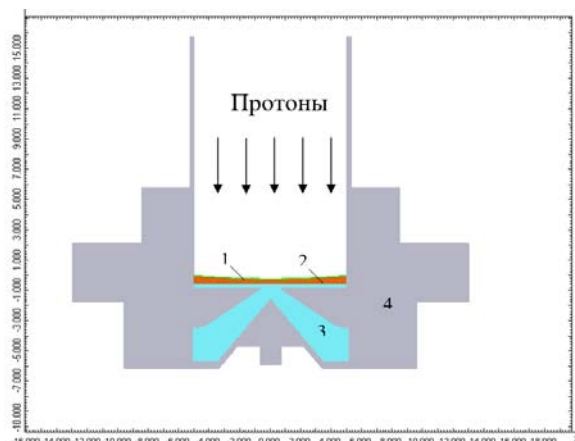


Рисунок 5.1. Расчетная модель мишени: 1 – слой лития, 2 – медная подложка, 3 – вода, 4 – сталь.

Расчетная модель мишени представляет собой тело вращения и включает описание следующих элементов конструкции. Это, прежде всего, тонкий слой лития толщиной от 10 до 100 мкм, заданный в виде вогнутого диска эллиптической формы диаметром 100 мм. Данный слой расположен на медной подложке, представляющей собой диск того же диаметра 100 мм, верхняя сторона которого повторяет эллиптическую форму слоя лития, а нижняя – плоская. Толщина подложки изменяется от 3 мм в центре диска до 5 мм на краях. Ниже подложки задан слой воды толщиной 3 мм и диаметром 100 мм, который соединяется с воронкообразной частью, также заполненной водой. Остальная часть мишени, состоящая преимущественно из стальных конструкций, описана приближенно в виде комбинации цилиндрических и конических тел, заполненных сталью марки 12Х18Н10Т.

Химический состав и плотность ρ (г/см³) материалов:

Литий естественный ($\rho=0,53$), атомные доли: ${}^6\text{Li} - 0,0798$, ${}^7\text{Li} - 0,9202$;

Медь ($\rho = 8,9$);

Вода ($\rho = 1$);

Сталь марки 12Х18Н10Т ($\rho=7,9$), весовые доли:

Fe – 67,925, C – 0,12, Mn – 2,0, Si – 0,8, Cr – 18,0, Ti – 0,8, Ni – 10,0, S – 0,02, P – 0,035, Cu – 0,3.

В качестве источника рассматривается пучок протонов, падающий на слой лития параллельно оси вращения мишени и имеющий равномерную интенсивность в поперечном сечении пучка диаметром 100 мм.

Общая схема радиационно-защищенного помещения (бункера) приведена на рис. 5.2.

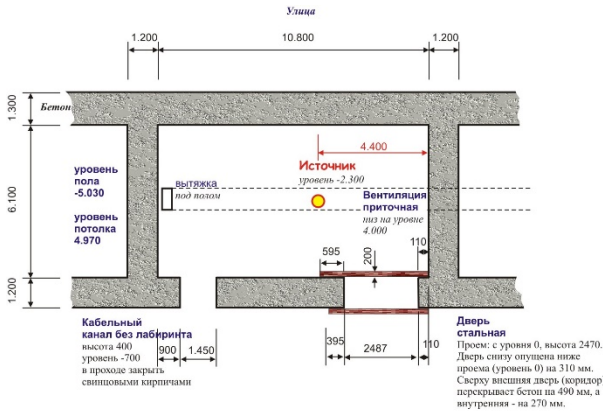


Рисунок 5.2. Общий план бункера (вид сверху).

Описание стен и потолка. Толщина внешней бетонной стены бункера, выходящей на улицу, – 1.3 м, остальных стен – 1.2 м. Стены бункера состоят из нескольких слоев бетона различных марок. Внешняя стена бункера сделана из панелей из керамзитобетона (7 кг/м³ арматурной стали) толщиной 400 мм, плотность 1100 кг/м³. Все внутренние стены сделаны из стеновых панелей толщиной 300 мм из тяжелого бетона марки М150 (7 кг/м³ арматурной стали), плотность - 2300 кг/м³. Внутренность между панелями залита тяжелым бетоном марки М150 (17 кг/м³ арматурной стали), плотность - 2300 кг/м³. Толщина монолита везде 600 мм. Дверь во внутренней стене состоит из двух слоев стали толщиной 20 см каждый, высота двери - 2 м.

Нижняя плита перекрытия потолка толщиной 350 мм изготовлена из тяжелого бетона марки М200 (7 кг/м³ арматурной стали), плотность - 2300 кг/м³. Сверху нее - монолитная железобетонная плита из тяжелого бетона (28 кг/м³ арматурной стали) толщиной 840 мм. Общая толщина потолка – 1,19 м.

В расчетах использован следующий состав бетона (атомные концентрации): Si – 1,84, О – 4,6, Са – 0,287, Mg – 0,0262, Н – 1,39. Химический состав арматурной - тот же, что и у углеродистой стали (см. ниже).

Описание мишени. Если принять уровень земли за 0, то пол в бункере опущен на 5,03 метров, потолок находится на высоте 4,97 м. Мишень (Li слой) показана красным кружком с желтым заполнением. Она находится на 2,3 м ниже уровня 0 на расстоянии 4,4 м от правой стены и смещена на 10 см в направлении к двери относительно центральной оси в другой плоскости. Пучок падает сверху вниз на мишень, ток

протонов - 10 мА (6 · 10¹⁶ протонов/с). В расчетах использована модель мишени, описанная выше (см. Рис. 4.1); для энергии протонов 1,915 МэВ толщина слоя Li равна 50 мкм, для энергии протонов 2,5 МэВ - 100 мкм.

Описание установки. На рис. 5.3 приведена схема установки.

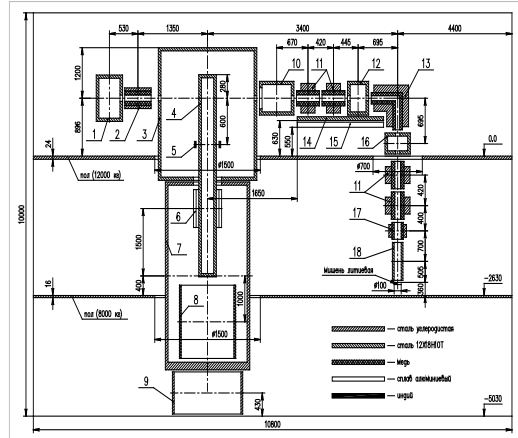


Рисунок 5.3. Расположение элементов установки.

Все основные части установки представлены простыми фигурами, как правило, полыми цилиндрами (см. рис. 5.4). Все фигуры состоят из одного материала: углеродистой стали, нержавеющей, меди, алюминия или индия. Химический состав основных частей установки приведен на рис. 5.5.

На уровне 0 задан сплошной пол по всей площади бункера толщиной 24 мм с двумя отверстиями, а на уровне -2630 мм - сплошной пол толщиной 16 мм с одним отверстием.

Для моделирования радиационных полей нейтронов и гамма-квантов, возникающих за стенами бункера при облучении мишени протонным пучком, подготовлено описание модели бункера и установки в формате исходных данных программы ПРИЗМА. Геометрия расчетной модели представлена на рис. 5.6 – рис. 5.8. Двумерное распределение мощности дозы от нейтронов и гамма-квантов оценивалось на воображаемых экранах-детекторах (см. рис. 5.6), расположенных на расстоянии 1 м от внешней поверхности стен бункера за дверью и на улице параллельно поверхности стен. Высота экранов от уровня земли – 200 см (координата X), длина - 1080 см (координата Z). Правый край экранов расположен напротив внутренней поверхности правой стены бункера (координата Z = 0), отсчет по длине идет справа налево: -1080 < Z < 0. Проему двери соответствует интервал (-260 < Z < -11)).

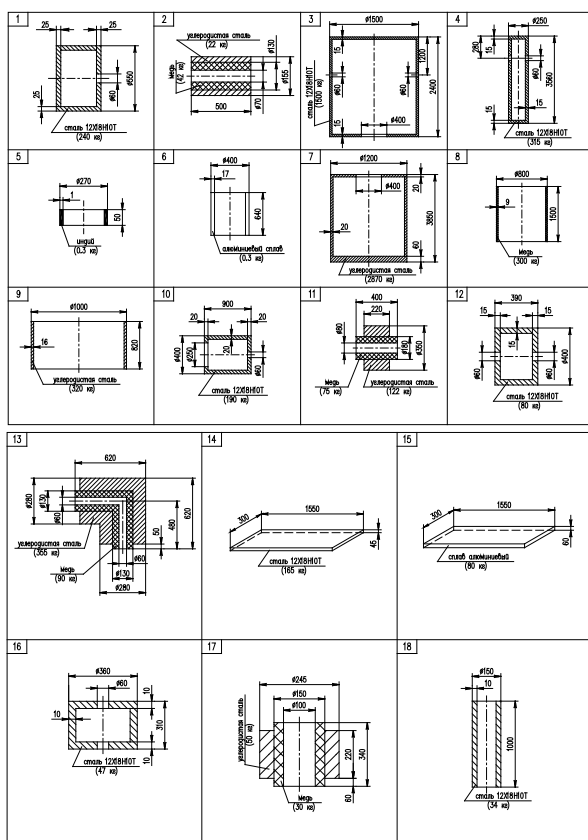


Рисунок 5.4. Фигуры, описывающие установку.

Химический состав материалов, %

1. Сталь углеродистая (Ст.3)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As	Fe
0.20	0.55	0.10	0.04	0.05	0.30	0.30	0.30	0.08	98.08 (стальное)

2. Сталь 12Х18Н10Т

C	Mn	Si	Cr	Ti	Ni	S	P	Cu	Fe
0.12	2.0	0.8	18.0	0.7	10.0	0.02	0.035	0.30	68.025 (стальное)

3. Медь М06

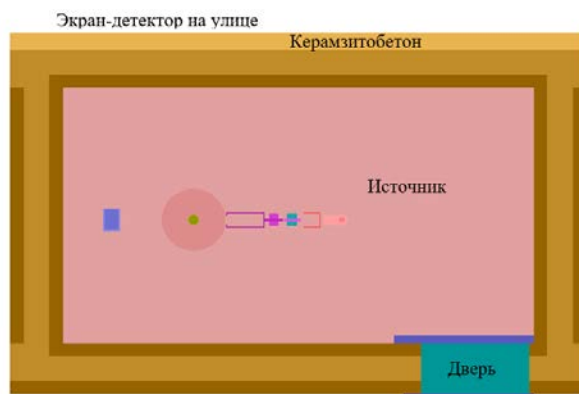
Cu	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	P	Ag
99.97	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.001	0.003	0.002	0.003

4. Сплав алюминиевый (АМг4)

Mg	Mn	Ti	Cr	Fe	Si	Cu	Zn	Al
4.0	1.0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.05	0.2	93.75 (стальное)

Рисунок 5.5. Химический состав материалов (по весу).

По программе ПРИЗМА моделировался перенос протонов в литиевой мишени, рождение в ней нейтронов и гамма-квантов, их дальнейшее распространение по бункеру с учетом расположенной в ней установки и выход за пределы бункера.



Экран-детектор за дверью
Рисунок 5.6. Геометрия модели бункера в плоскости ZY (вид сверху).

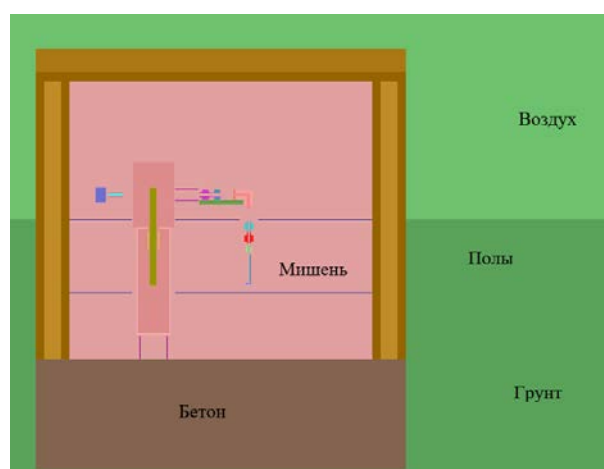


Рисунок 5.7. Геометрия модели бункера в плоскости ZX (вид сбоку).

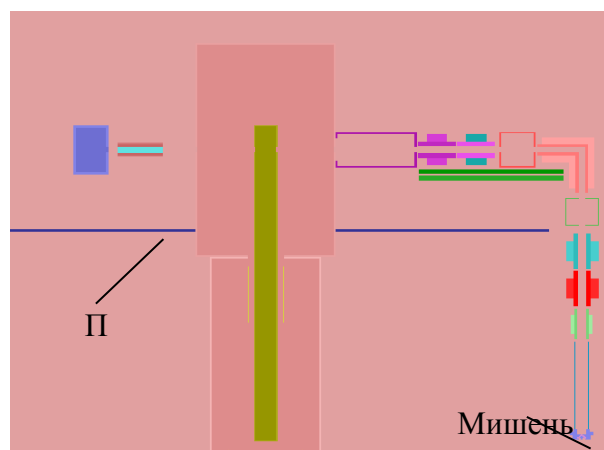


Рисунок 5.8. Увеличенный фрагмент установки (вид сбоку).

Расчет подобной задачи аналоговым методом Монте-Карло мало эффективен из-за значительного ослабления интенсивности выходящих из бункера излучений. Применение неаналоговых методов, реализованных в программе ПРИЗМА, также вызывает значительные трудности, обусловленные сложным видом функции

ценности из-за существенно трехмерной геометрии системы. Для решения данной задачи для каждой энергии источника протонов были разработаны две методики неаналогового моделирования: для расчета дозы за дверью и расчета дозы на улице. Результаты расчетов приведены на рис. 5.9 – рис. 5.20: сначала следуют результаты, полученные в полной постановке с учетом наличия установки и полов в бункере, затем – результаты для упрощенной постановки для случая, когда в бункере задана только нейтронообразующая мишень, а установка и полы отсутствуют.

Протоны с энергией 1,915 МэВ, толщина Li - 50 мкм, полная постановка. На рис. 5.9 приведено распределение мощности дозы за дверью бункера для трех интервалов высот: 0-25, 75-100, 175-200 см над уровнем земли.

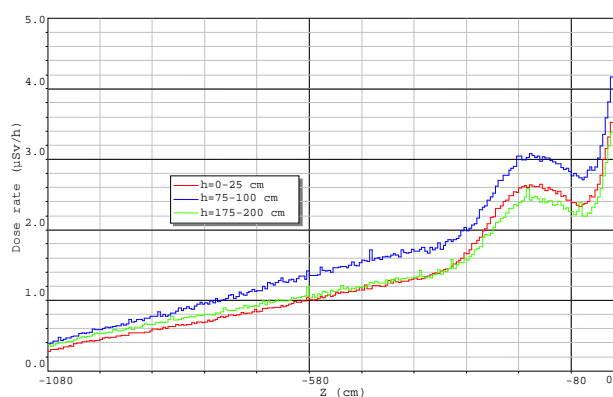


Рисунок 5.9. Распределение по горизонтали мощности дозы за дверью бункера для трех интервалов высот h от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

Из расчетов следует, что для источника протонов с энергией 1,915 МэВ максимальная доза за дверью достигается на интервале по высоте 75-100 см, ближе к 100 см. На этом интервале максимальное значение полной дозы за дверью в ее центральной части не превосходит $\sim 3,3$ мкЗв/ч, в то время как на правом краю двери доза возрастает до $\sim 4,2$ мкЗв/ч. Это происходит из-за дополнительного вклада нейтронов, отраженных от прилегающей к двери боковой стены бункера.

Как видно на рис. 5.10, вклад в дозу от нейтронов за дверью превосходит вклад от гамма-квантов, а левее двери за стеной – наоборот.

Ниже, на рис. 5.11 и рис. 5.12, приведены аналогичные результаты для улицы. В данном случае максимум мощности дозы находится напротив нейтронообразующей мишени.

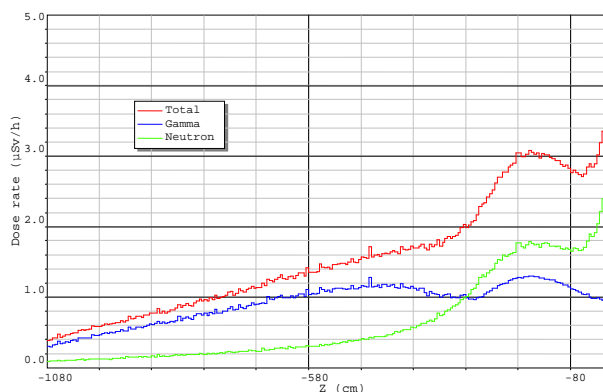


Рисунок 5.10. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы за дверью бункера на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

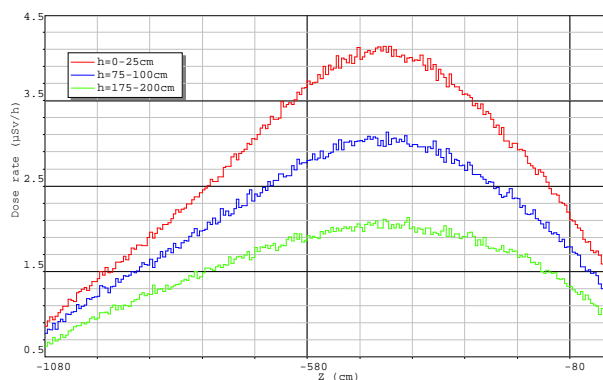


Рисунок 5.11. Распределение по горизонтали мощности дозы на улице для трех интервалов высот h от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

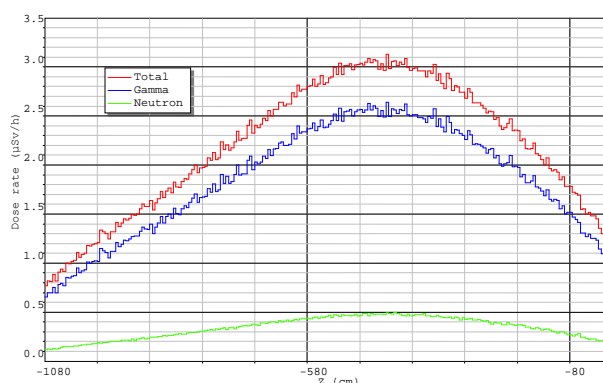


Рисунок 5.12. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы на улице на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

Протоны с энергией 2,5 МэВ, толщина Li - 100 мкм, полная постановка.

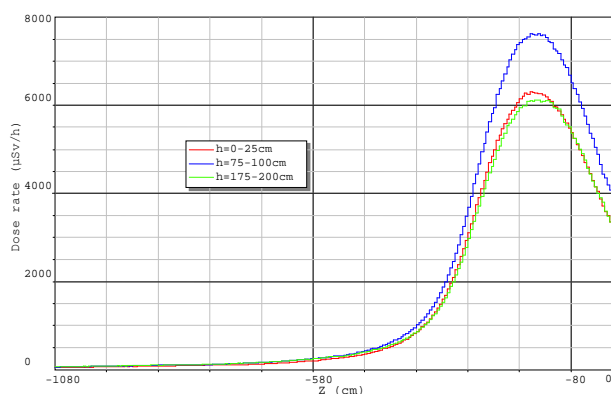


Рисунок 5.13. Распределение по горизонтали мощности дозы за дверь бункера для трех интервалов высот h от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

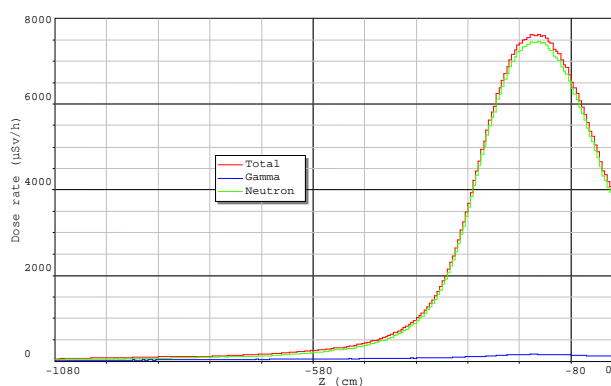


Рисунок 5.14. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы за дверь бункера на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

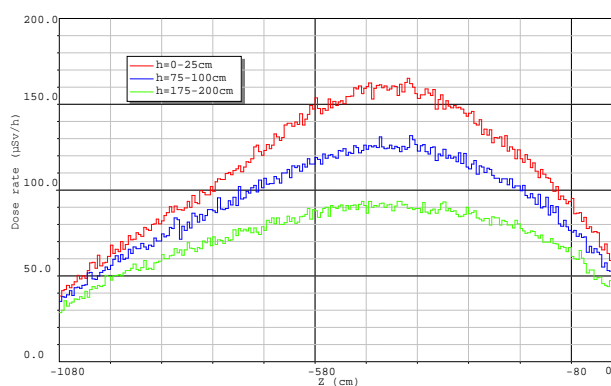


Рисунок 5.15. Распределение по горизонтали мощности дозы на улице для трех интервалов высот h от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

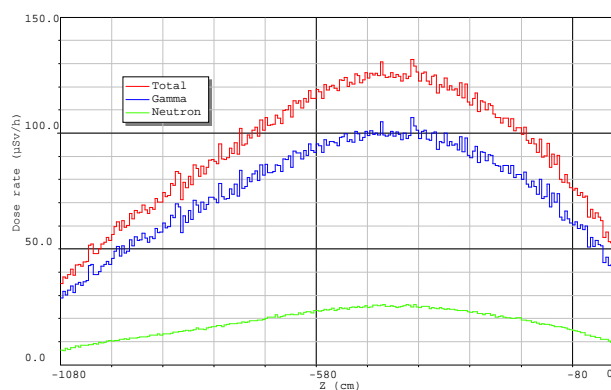


Рисунок 5.16. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы на улице на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с при наличии установки и полов.

Протоны с энергией 1,915 МэВ, толщина Li - 50 мкм, упрощенная постановка.

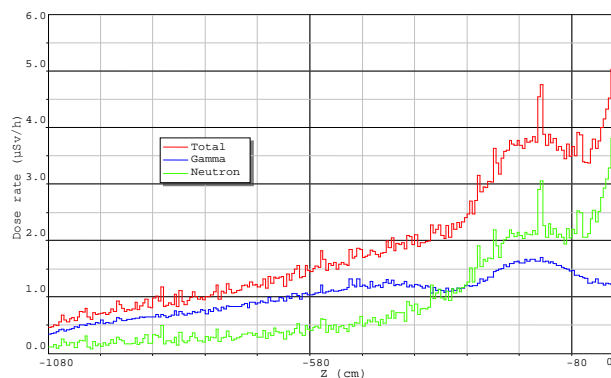


Рисунок 5.17. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы за дверь бункера на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с без установки.

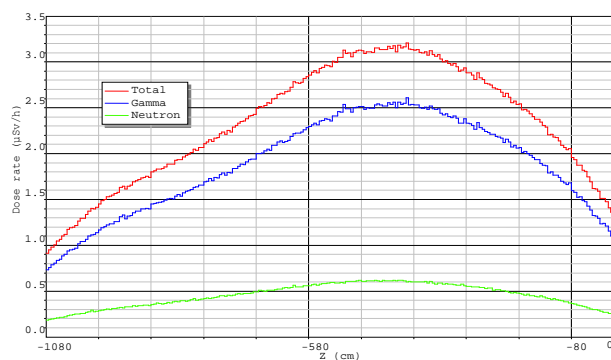


Рисунок 5.18. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы на улице на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 1,915 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с без установки.

Протоны с энергией 2,5 МэВ, толщина Li - 100 мкм, упрощенная постройка.

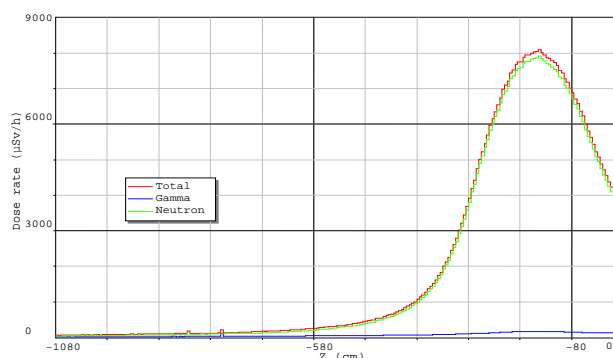


Рисунок 5.19. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы за дверью бункера на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с без установки.

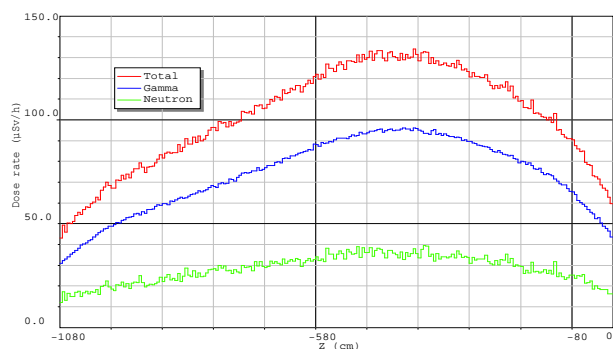


Рисунок 5.20. Распределение по горизонтали вкладов от нейтронов и гамма-квантов в мощность дозы на улице на высоте 75–100 см от уровня земли для энергии протонов 2,5 МэВ и интенсивности $6 \cdot 10^{16}$ протонов/с без установки.

Как видно на рис. 5.13 – Рис. 5.16, для энергии протонов 2,5 МэВ мощность дозы вне бункера значительно выше по сравнению с энергией 1,915 МэВ: примерно на 3 порядка за дверью и почти на два порядка на улице, в основном за счет гамма-квантов.

Сравнение результатов, полученных в упрощенной постройке (см. рис. 5.17 – рис. 5.20), с аналогичными результатами для полной постройки показывает, что учет установки и полов влияет на мощность дозы за дверью и на улице, но незначительно.

Уменьшение мощности дозы в корридоре и на улице обеспечено следующими средствами. Во-первых, значительное уменьшение мощности дозы достигнуто за счет того, что нейтроногенерирующая мишень окружена системой формирования пучка нейтронов, вклю-

чающая в себя замедлитель, отражатель и поглотитель. Во-вторых, в направлении выхода нейтронов вдоль тракта транспортировки пучка протонов за поворотным магнитом и около него размещены блоки из борированного полиэтилена, обеспечивающих поглощение нейтронов. В-третьих, дверь в радиационно-защищенное помещение покрыта листами литиевого полиэтилена, что также уменьшает уровень радиации.

В результате проведенных мероприятий уровень мощности дозы ионизирующего излучения вне радиационно-защищенного помещения снижен до уровня, удовлетворяющего требованиям норм радиационной безопасности.

Заключение

Изготовлена система питания и управления новым ионным источником, способным генерировать пучок с током до 15 мА. Источник отрицательных ионов водорода установлен на испытательный стенд. В ходе проведенных испытаний измерены параметры ионного пучка и исследовано его предускорение. Получен ток пучка, превышающий 14 мА при полной энергии 27,5 кэВ. Регулярная угловая расходимость пучка на выходе ионного источника составляет 85 миллирадиан. При предускорении 6 мА пучка при напряжении доускорения 50,5 кВ размер пучка не превышает 40 мм, что соответствует расчётной величине.

Для определения эмиттанса пучка изготовлена система диагностики «перечница», способная обеспечить анализ пучка диаметром до 40 мм с угловым разрешением до 0,8 мрад.

Новый источник отрицательных ионов водорода вместе с новым трактом транспортировки пучка, включающим в себя поворотный магнит, и ускорительной трубкой предварительного ускорения смонтирован на ускоритель, заменив тем самым источник отрицательных ионов водорода с током до 6 мА.

Методом Монте-Карло выполнено численное моделирование процессов переноса протонов, нейтронов и гамма-квантов, определены места наибольшей мощности дозы ионизирующего излучения за пределами радиационно-защищенного помещения, предложены и реализованы способы уменьшения дозы и достигнуто соответствие мощности дозы нормам радиационной безопасности.

По материал проведенных исследований опубликованы 3 статьи в научном журнале и получен патент РФ на изобретение [2]. Информация о публикациях представлена в приложении А.

Список использованных источников

- [1] М. А. Arnautova, Ya. Z. Kandiev, В. Е. Lukhminsky, G. N. Malyshkin, “Monte-Carlo Simulation in Nuclear Geophysics: Comparison of the PRIZMA Monte Carlo Program and Benchmark Experiments”, Nuclear Geophysics, 7, No.3, pp 407-418 (1993).
- [2] С.Ю. Таскаев, И.Н. Сорокин. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Патент на изобретение № 2582588 от 04.04.2016.

№ 15.6.1 Развитие экспериментальных методов на Новосибирском лазере на свободных электронах

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию экспериментальных методов на Новосибирском лазере на свободных электронах, а также результаты экспериментальных исследований 2016 года на этой установке.

В ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН создан мощный лазер на свободных электронах, длина волны которого может изменяться в широких пределах в терагерцовой и инфракрасной областях спектра. В качестве источника электронов в нем используется многооборотный ускоритель с рекуперацией энергии, который имеет пять прямолинейных промежутков. В трёх из них установлены ЛСЭ, работающие в разных диапазонах длин волн (90-240 мкм для первого, 37 – 80 мкм для второго и 5 – 20 мкм для третьего).

Первый и второй лазеры на свободных электронах были запущены соответственно в 2004 и 2009 году, и в настоящее время работают на пользователей. Они являются самыми мощными в мире источниками узкополосного излучения в своих диапазонах. Излучение первых двух лазеров на свободных электронах применяется для экспериментов по биологии, физике и химии. Запуск третьего лазера на свободных электронах был выполнен в 2015 г. В 2016 г. был изготовлен и собран канал вывода излучения третьего ЛСЭ и проведены первые эксперименты с использованием этого излучения.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Третий лазер на свободных электронах установлен на последней, четвертой, дорожке ускорителя, где энергия электронов максимальна. Он состоит из трех секций ондулятора и оптического резонатора длиной 40 м. В 2015 г. был смонтирован разработанный ранее оптический резонатор третьего лазера на свободных электронах.

Юстировка оптического резонатора проводилась при помощи лазера видимого диапазона. После юстировки на третьем лазере на свободных электронах впервые была получена генерация на длине волны 9 мкм со средней мощностью около 100 Вт. Даже этой небольшой

мощности было достаточно для получения отверстия в оргстекле при помощи несфокусированного пучка излучения.

Запуск лазера на свободных электронах был проведён в режиме максимального усиления, достигаемого при специальном выборе зазоров ондуляторов на постоянных магнитах. Проектная мощность излучения составляет 1 кВт при частоте повторения электронных сгустков 3.75 МГц. В ближайшее время планируется вывести излучение третьего лазера на свободных электронах из защищенного зала на пользовательские станции.

В связи с прекращением выпуска генераторных тетродов ГУ 101А высокочастотный генератор ускорителя-рекуператора Новосибирского лазера на свободных электронах был переделан под близкие по параметрам лампы фирмы «Thales». Эти лампы работают при большем анодном напряжении, поэтому для повышения анодного напряжения была проведена модернизация анодного выпрямителя высокочастотного генератора.

На предыдущих этапах выполнения проекта продолжалась разработка и создание новых пользовательских станций. Субмиллиметровое излучение сильно поглощается парами воды, поэтому для вывода излучения лазера на свободных электронах используется канал, заполненный сухим азотом. В местах поворота направления канала расположены цилиндрические объёмы с зеркалами.

Полученный в ходе работы научный и научно-технический задел имеет высокую значимость как для продолжения фундаментальных научных исследований, так и для практического использования полученных результатов.

2. Разработка и изготовление оборудования для вывода пучков излучения на пользовательские станции

Все три ЛСЭ находятся в радиационно опасном ускорительном зале. Их излучение должно быть выведено на пользовательские станции, находящиеся в десятках метров от ускорительного зала. Задача осложняется тем, что субмиллиметровое и инфракрасное излучение сильно поглощаются в атмосфере. Поэтому излучение транспортируется по трубам, заполненным сухим азотом, который отделён от вакуума ЛСЭ алмазными окнами, а от атмосферы на станциях – полипропиленовой плёнкой. Для того, чтобы излучение каждого ЛСЭ могло вводиться в один и тот же оптический канал, в него установлено два выдвижных зеркала (оптических коммутатора), показанных на рис. 2.1. При

выведенных зеркалах в канал попадает излучение первого ЛСЭ, а при введенных первом либо втором (по ходу пучка излучения) зеркалах – излучение третьего, либо второго ЛСЭ.



Рисунок 2.1 Часть канала вывода излучения на пользовательские станции, находящаяся в ускорительном зале. Видны оптические коммутаторы для ввода излучения второго (слева дальше) и третьего (справа ближе) ЛСЭ в общий канал вывода.

В 2016 г. был запущен оптический коммутатор для третьего ЛСЭ, а его излучение было выведено на пользовательские станции. Это позволило провести первые эксперименты с использованием излучения третьего ЛСЭ.

3. Изучение источников ионизирующих излучений в ускорительном зале и модернизация радиационной защиты ускорителя-рекуператора

Для работы Новосибирского ЛСЭ используется электронный пучок со средним током порядка 10 мА и энергиями 12 МэВ (при работе первого ЛСЭ) 20 МэВ (при работе второго ЛСЭ) и 40 МэВ (при работе третьего ЛСЭ). Даже относительно небольшие (менее 1%) потери электронов приводят к образованию большого количества жестких гамма квантов и нейтронов. Бетонные стены ускорительного зала, где размещена установка, обеспечивают необходимое ослабление ионизирующих излучений, но в них имеются отверстия (входные двери и ворота) вблизи которых интенсивность ионизирующих излучений превышает предельно допустимый уровень. Для снижения радиационной опасности установки изучаются части электроннооптического канала, где происходят потери электронов пучка. В 2016 г. было создано и испытано устройство для измерения

распределения потерь электронов. Оно представляет собой детектор рентгеновского излучения со свинцовым коллиматором. Устройство установлено в ускорительном зале на передвижной подставке. Направление оси коллиматора управляется дистанционно и контролируется прицельной телекамерой, закреплённой на устройстве. Для оценки нейтронной части радиационного фона, вызванного потерями электронов, использованы переносные экраны из фанеры.

4. Работы по повышению надёжности Новосибирского ЛСЭ

Система водяного охлаждения Новосибирского ЛСЭ включает градирню и контур с дистиллированной водой. В отличие от обычных промышленных градирен, градирня Новосибирского ЛСЭ работает при очень низкой (менее 30 градусов Цельсия) температуре охлаждаемой воды. Это требует высокой эффективности охлаждения, особенно летом. В 2016 г. градирня была модернизирована. Вместо старых деревянных элементов установлены современные модули с пластмассовыми перегородками. Это повысило испаряющую поверхность и, следовательно, эффективность градирни. Кроме того, установлен и запущен новый насос в контуре с дистиллированной водой.

5. Модернизация высокочастотной электронной пушки на стенде

Для повышения средней мощности излучения Новосибирского ЛСЭ планируется повышение среднего тока электронного пучка ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ. Последнее будет достигнуто при помощи новой электронной пушки. Такая пушка на основе ускоряющего резонатора на частоте 90 МГц разработана, изготовлена и испытана в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Пушка генерирует сгустки электронов с энергией 300 кэВ и частотой повторения 90 МГц. В 2016 г. на пушку был установлен новый формирователь управляющих импульсов, испытана фокусирующая система на постоянных магнитах и улучшены охлаждение поглотителя пучка и экраны для поглощения гамма излучения. Всё это позволило получить средний ток электронного пучка более 0,1 А. Этот ток в десять раз превышает ток электростатической электронной пушки, используемой сейчас в ускорителе-рекуператоре Новосибирского ЛСЭ.

6. Модернизация электростатической электронной пушки

В ускорителе-рекуператоре Новосибирского ЛСЭ используется электростатическая электронная пушка. Она генерирует пучок электронов с энергией 300 кэВ и средним током около 10 мА. Пучок состоит из электронных сгустков с длительностью 1 нс и зарядом около 1 нКл, следующих с частотой, регулируемой от нуля до 22,5 МГц. Электронная пушка соединена с высоковольтным выпрямителем при помощи высоковольтного кабеля. В 2016 г. был модернизирован формирователь наносекундных управляющих импульсов, подающихся на катод пушки. Это позволило укоротить задние фронты электронных сгустков. Модернизирован и высоковольтный выпрямитель, что снизило вероятность пробоев. Ионизирующее излучение в ускорительном зале повышает вероятность пробоев высоковольтного кабеля. Для снижения интенсивности излучения в районе кабеля установлены свинцовые экраны.

7. Автоматизация управления ондулятором

В третьем ЛСЭ установки «Новосибирский ЛСЭ» используется ондулятор на постоянных магнитах, состоящий из трёх секций. Для перестройки длины волны излучения регулируется амплитуда магнитного поля ондулятора. Изменение амплитуды поля делается при помощи изменения величины рабочего зазора ондулятора. В 2016 г. была запущена система управления зазорами секций. Зазор каждой из секций изменяется при помощи точных винтов, вращаемых шаговым двигателем. Для измерения зазоров установлены энкодеры.

№ 15.6.2 Разработка и изготовление специализированных генераторов синхротронного излучения с использованием сверхпроводящих или постоянных магнитов

Введение

В отчете представлены результаты работ по созданию специализированных сверхпроводящих вставных устройств (вигглеров и ондуляторов), встраиваемых в магнитную структуру накопителей заряженных частиц для генерации синхротронного излучения (СИ). Современные центры СИ имеют тенденцию перехода на многополюсные вигглеры и ондуляторы в качестве источников излучения вместо поворотных магнитов. Установка сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов на накопитель, работающий как источник СИ, значительно увеличивает жёсткость излучения и на несколько порядков увеличивает яркость источников. Полученные в 2016 году и представленные в отчете результаты позволяют значительно продвинуться в этом направлении как с инженерно-технологической, так и с физической точки зрения. Использование сверхпроводящих поворотных магнитов так же разрабатываемых в настоящее время, даёт совместно с нормально проводящими магнитами возможность построения новых, достаточно дешёвых источников излучения с энергией электронов 2-3 ГэВ, которые по своим потребительским характеристикам не уступают большим и дорогим источникам СИ с энергией электронов 6-8 ГэВ.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

На предыдущих этапах выполнения проекта в процессе разработки конструкции полноразмерного сверхпроводящего многополюсного вигглера с чётным числом полюсов была проведена детальная проработка как непосредственно магнитной системы, так и общей конструкции сверхпроводящего вигглера. Испытания изготовленного полноразмерного магнита показали работоспособность выбранной конструкции, Заявленные параметры были продемонстрированы.

Разработана и успешно испытана система магнитных измерений. Для измерений структуры магнитного поля были использованы как трехмерные датчики, так и линейки из пяти датчиков Холла.

Была разработана оптимальная конструкция элементов гелиевой и азотной тепловых трубок, работающих в режиме термосифона. Были оптимизированы такие параметры тепловых трубок, как рабочее давление газа (азота и гелия) с точки зрения максимального отбора мощности, а также исследовано поведение трубки на всем рабочем диапазоне температур. Разработанная конструкция с использованием герметичной сварки медных деталей с помощью электронного пучка была успешно испытана и позволяет осуществлять эффективное охлаждение элементов магнитной системы сверхпроводящего ондулятора, максимально используя мощность холодильных головок криорефрижератора.

Также изучались возможности использования азотных трубок в качестве температурного ключа, для соединения и размыкания отдельных ступеней криокулеров и холодной массы для обеспечения эффективного начального охлаждения последней.

Были проведены расчеты основных систем экспериментального безжидкостного криостата для исследований сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением при его стационарной работе, в процессе захолаживания и отогрева. Выбрана конструкция таких узлов криостата, как наружный корпус, защитные тепловые экраны, элементы крепления сверхпроводящего магнита в криостате, вакуумная камера для пролета электронного пучка через ондулятор, система ввода тока и других. Изготовлены комплекты чертежей для изготовления основных узлов криостата.

Создан универсальный стенд для изучения рабочих режимов работы тепловых трубок, заправленных различными газами (в частности, азотом и гелием). Стенд создан на основе криорефрижератора SRDK-415D с мощностью ступеней 60К и 4К, позволяющего отводить мощность ~1.5 ватт при температуре 4К. Данный стенд позволяет оперативно проводить измерения тепловых трубок, заполняемых различными рабочими газам

Был создан универсальный стенд на основе низкотемпературного криостата ЛГ-15/150-I для изучения таких физических свойств конструкционных материалов, как теплопроводность и теплоёмкость при криогенных температурах. Стенд позволяет проводить измерения при температурах жидкого азота и гелия.

2. Разработка сверхпроводящего поворотного магнита с продольным градиентом и магнитным полем до 8 Тл - ключевого элемента магнитной структуры накопителя с

МИНИМАЛЬНЫМ ЭМИТТАНСОМ

В рамках данного проекта был предложен вариант создания сверхпроводящего дипольного поворотного магнита с продольной вариацией поля. Использование таких магнитов в источниках синхротронного излучения позволяет существенно уменьшить эмиттанс электронного пучка по сравнению с традиционными схемами организации магнитной структуры. Параметры синхротронного излучения из таких магнитов соответствуют параметрам излучения, генерируемого специализированными устройствами (вигглерами) и представляет интерес для организации пользовательских методик. Из каждого такого магнита можно организовать вывод 3 или 5 каналов синхротронного излучения. Кроме того, использование сильнополевых сверхпроводящих магнитов в основной магнитной структуре источников синхротронного излучения позволяет существенно уменьшить их периметр, т.е. осуществить существенную компактизацию. В рамках данного направления, исследованы способы реализации желательного профиля поля в таких магнитах. На рис. 1 представлен вариант конфигурации сверхпроводящих обмоток такого магнита.

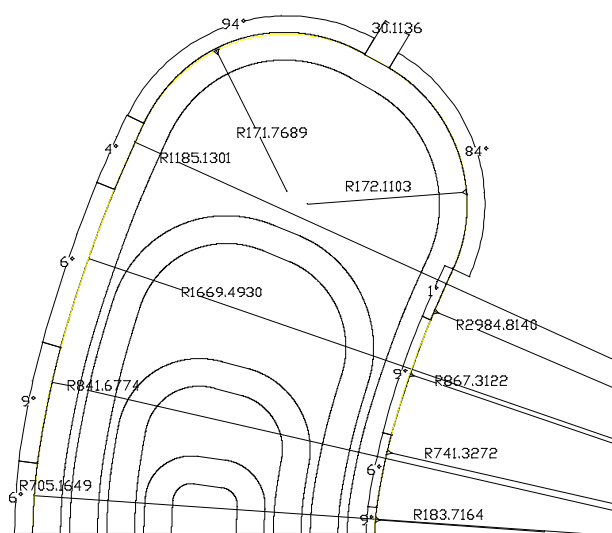


Рисунок 1. Конфигурация сверхпроводящих обмоток дипольного поворотного магнита с продольным градиентом поля.

В данном примере локальная кривизна обмоток соответствует локальной кривизне электронной траектории, которая, в свою очередь, определяется локальной величиной магнитного поля. Возможных вариантов организации магнитного ядра такого магнита показан на рис. 2.

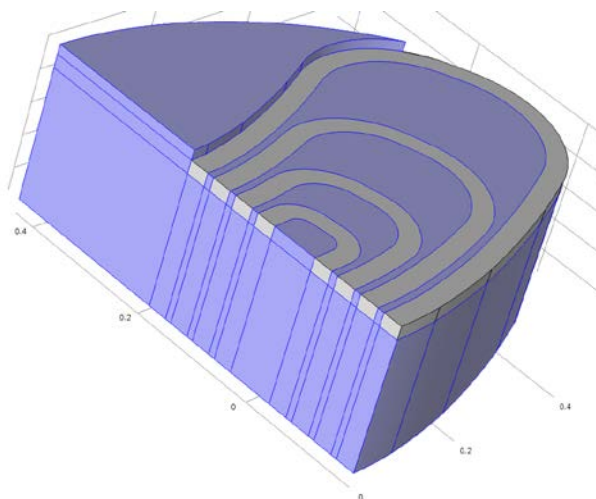


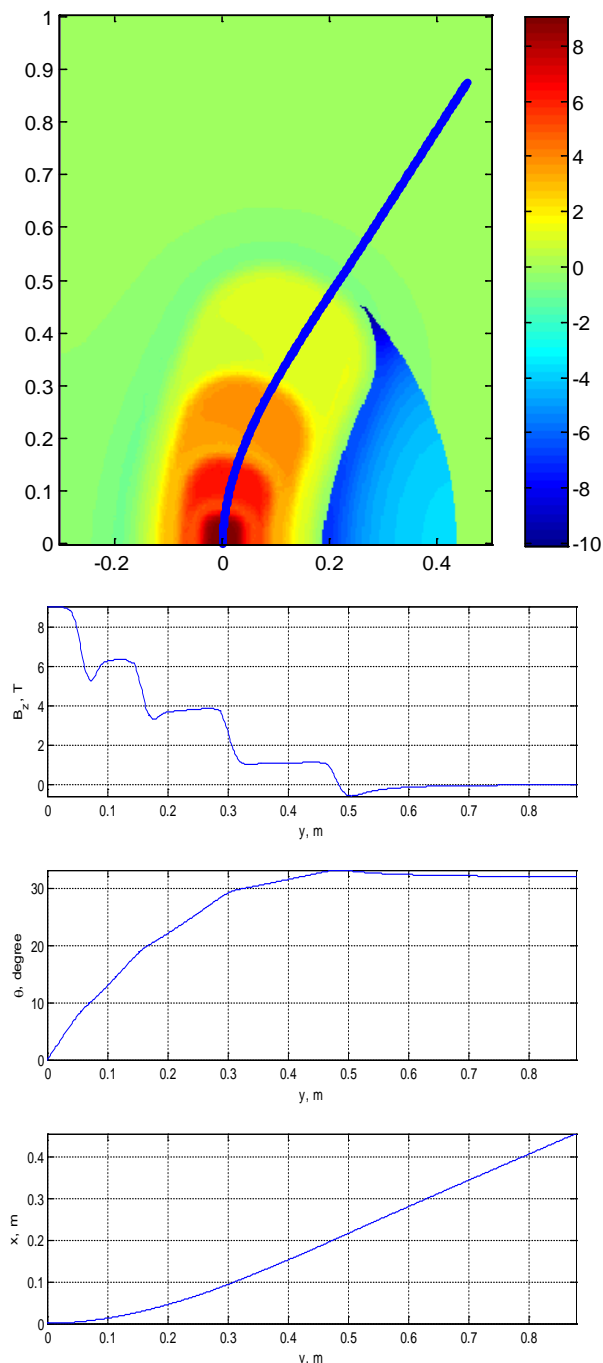
Рисунок 2. Возможный вариант ядра сверхпроводящего дипольного магнита с продольной вариацией поля.

Для данной геометрии обмоток были проведены трехмерные магнитные расчеты полей. На рис. 3 показано распределение магнитного поля в медианной плоскости магнита и вдоль рассчитанной траектории электронного пучка для электронов с энергией 1 ГэВ.

3. Разработка и создание экспериментального безжидкостного криостата для исследований сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением. Исследование карты температур в криостате при различных режимах работы

Были изготовлены основные узлы и системы экспериментального безжидкостного криостата для исследований сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением. Криостат состоит из наружного корпуса, защитных тепловых экранов, элементов крепления сверхпроводящего магнита в криостате, вакуумной камеры для пролета электронного пучка через зазор сверхпроводящего магнита, система ввода тока и других. Внешний вид криостата представлен на рис. 4. Была проведена контрольная сборка основных узлов криостата, пробное включение и охлаждение собранного криостата до рабочих криогенных температур. Особенность данного криостата состоит в том, что он позволяет охлаждать и поддерживать температуру сверхпроводящих магнитов 3 - 4 К без использования жидких хладагентов (азота и гелия). Охлаждение обеспечивается четырьмя рефрижераторами, работающими по тепловому циклу Гиффорда-Макмагона, два из которых обеспечивают температуры 60 К и 10 К на радиационных экранах,

а два других охлаждают непосредственно холодную массу магнита до температуры 3 - 4 К. Эти же два рефрижератора используются для охлаждения блока тоководов, способных вводить ток до ~ 1500 А внутрь криостата, не нарушая при этом расчетный тепловой баланс мощности.



Рисунке 3. Распределение магнитного поля в медианной плоскости магнита (вверху, единицы – Тесла), и вдоль траектории пучка электронов с энергией 1 ГэВ.

В процессе испытания была проведена отладка программного обеспечения и системы управления и контроля основных систем и пара-

метров криостата. Измерения показали совпадение основных измеренных параметров с расчетными. Однако в процессе ввода полного тока выяснилось, что при токе ~1200А температура одного из восьми токопроводящих трактов, представляющих собой комбинацию нормально-проводящих латунных тоководов и вставок из коммерчески доступных «теплых» ВТСП тоководов не стабилизировалась на безопасном уровне. Дальнейший ввод тока привел к лавинообразному сгоранию данного ВТСП токовода. Исследования сгоревшего ВТСП токовода показали, что вероятной причиной этого разрушения является брак изготовителя. В настоящее время такие тоководы, хотя и являются коммерчески доступной высокотехнологичной продукцией, но все еще остаются предметом исследований и изготавливаются под конкретный заказ. Поэтому было принято решение начать исследования и отработку собственной технологии с целью создания надежных ВТСП тоководов собственной разработки. На Рис. 4 представлен общий вид собранного экспериментального криостата.

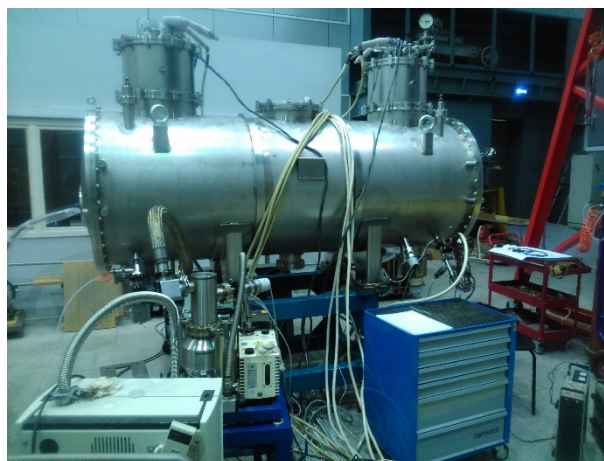


Рисунок 4. Внешний вид собранного экспериментального криостата для исследований сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением.

4. Испытание сверхпроводящего многополюсного магнита с косвенным охлаждением в экспериментальном криостате

Короткий прототип многополюсного магнита с косвенным охлаждением был испытан в экспериментальном криостате (см. рис. 5). Предыдущие включения этого магнита в режиме косвенного охлаждения могли проводиться лишь в кратковременном режиме, при котором ток мог быстро (~3 минуты) подниматься до срыва сверхпроводимости в магните.

Этот ток имеет величину ~ 1200 А, что соответствует критическим параметрам используемого сверхпроводящего провода. Ограничение было связано с конструкцией узла ввода тока ранее используемого криостата, который был спроектирован на стационарный максимальный ток не более ~ 600 А. Предварительный расчет теплового баланса и распределения температур в криостате и сверхпроводящем магните имеет некоторую неопределенность, так как реальные значения теплоемкости и теплопроводности используемых материалов при криогенных температурах не всегда точно известны. Поэтому особенно важна экспериментальная проверка реального стационарного распределения температур в наиболее критических узлах сверхпроводящего магнита, и особенно в таком напряженном месте, как блок ввода тока. В результате долговременных испытаний магнита при включенном максимальном токе ~ 1200 А (в течение нескольких дней) была получена важная информация о стационарном распределении температур, которая будет использоваться в дальнейшем для проектирования криостатов.

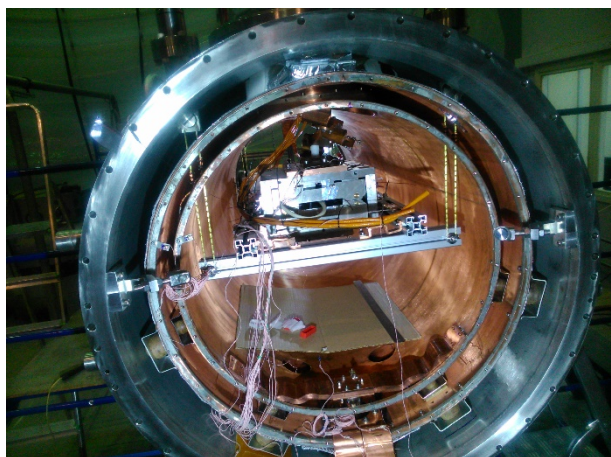


Рисунок 5. Сверхпроводящий многополюсный магнит с косвенным охлаждением, установленный внутри экспериментального криостата перед испытанием.

5. Исследование режимов работы азотных и гелиевых тепловых трубок при криогенных температурах - ключевых элементов эффективной теплопередачи в криостате с косвенным охлаждением сверхпроводящих магнитов

Была проверена на реальной установке – сверхпроводящем многополюсном магните с косвенным охлаждением - работоспособность азотных тепловых трубок сифонного типа в качестве элемента передачи тепла. Тепловая

трубка, состоящая из испарителя и реконденсатора, соединяет между собой 60К ступень криокулера, имеющего холодильную мощность ~ 50 Ватт и охлаждаемый элемент (сверхпроводящий магнит массой ~ 600 кг). В криостате используется суммарно 4 криокулера, обеспечивающих общую мощность на ступенях 60 К до ~ 200 Ватт. Конструкция азотной тепловой трубки была оптимизирована по величине давления газа (~ 95 бар), которой позволило отводить мощность до ~ 100 Ватт. Однако вдвое избыточная холодильная мощность приводила к преждевременному перемерзанию тепловой трубки и превращению азота в лед при температуре 64 К. Для предотвращения этого эффекта и расширения рабочего интервала температур был использован нагреватель реконденсатора с обратной связью. Были подобраны оптимальные режимы работы нагревательной системы, позволившие охладить магнит до рабочего состояния с температурой 4 К за 5 дней. На рис. 6 представлен внешний вид реконденсорной части тепловой трубки, установленной на холодильной головке реконденсатора 60К. Следующим шагом должно быть экспериментальная проверка работоспособности гелиевой тепловой трубки и оценка ее эффективности для поддержания температуры магнита 4К.



Рисунок 6. Реконденсорная часть азотной тепловой трубки, соединенная со ступенью криокулера 60 К.

6. Создание системы измерений магнитных полей в сверхпроводящих многополюсных магнитах с малой апертурой и периодом. Исследование различных факторов и ограничений, влияющих на точность измерений магнитного поля и интегралов поля

До последнего времени для проведения магнитных измерений в качестве измерительной камеры использовалась трубка из нержавеющей стали с внешним диаметром 8 мм. В процессе измерения для снятия карты поля в поперечном направлении трубка перемещалась по горизонтали. Уменьшение вертикальной магнитной апертуры изготавливаемых устройств потребовало разработки новой конструкции и в результате для измерительной камеры был использован прямоугольный профиль из алюминиевого сплава. Для герметизации во фланцах были изготовлены и приварены алюминиевые наконечники с овальной поверхностью. Появившаяся возможность проводить измерения поперечного распределения магнитного поля сверхпроводящих магнитов с малой апертурой без необходимости перемещать вакуумную камеру существенно улучшила качество магнитных измерений, и при этом упростила конструкцию измерительной системы. На рис. 7 представлен внешний вид измерительной системы для сверхпроводящих магнитов с малой апертурой.

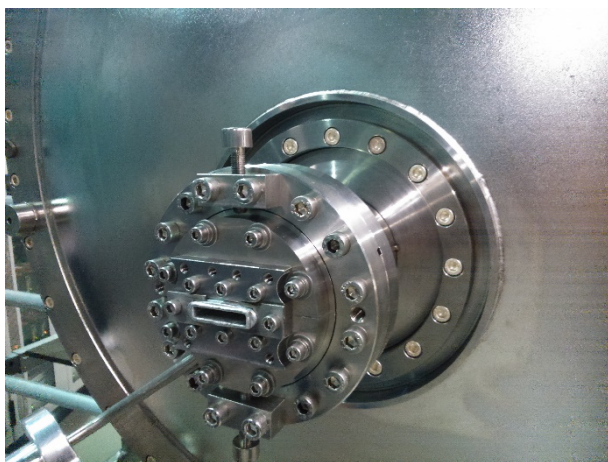


Рисунок 7. Внешний вид измерительной системы для сверхпроводящих магнитов с малой апертурой.

7. Исследование карты магнитных полей многополюсного сверхпроводящего магнита. Изучение влияния основных компонент магнитного поля на электронный пучок накопителя

В погружном криостате с жидким гелием был испытан новый тип многополюсного

магнита, каждый период которого состоит из набора чередующихся активных и нейтральных полюсов. Такая конфигурация магнитной системы дает преимущество в точности изготовления обмоток и имеет распределение сил на обмотках, обеспечивающее лучшую механическую устойчивость по сравнению с традиционными структурами. В процессе магнитных измерений был обнаружен эффект нарушения симметрии магнитного поля при отклонении от медианной плоскости. Были найдены пути решения этой проблемы с помощью подбора соотношения между шириной активного и нейтрального полюса. Для экспериментальной проверки результата этой коррекции необходимо провести новый цикл измерений как в погружном криостате, так и в экспериментальном безжидкостном криостате.

8. Проектирование и создание стенов для исследования физических свойств конструкционных материалов при криогенных температурах

Был модернизирован ранее созданный стенд для изучения физических свойств конструкционных материалов, позволяющий оперативно проверять теплоёмкость и теплопроводность различных материалов при криогенных температурах. В результате установки новых калиброванных датчиков температуры повысилась точность и надежность измерений.

9. Изучение влияния наполнителей с высокой теплоёмкостью при изготовлении сверхпроводящих обмоток магнита для повышения их стабильности

Было изучено влияние ряда наполнителей с различной концентрацией, выравнивающих коэффициент теплового расширения и теплоёмкость эпоксидного компаунда, используемого для пропитки ниобий-титановых сверхпроводящих катушек. Эта информация будет использована при конструировании сверхпроводящих обмоток для магнитов с косвенным охлаждением.

10. Модернизация участка намотки сверхпроводящих катушек. Монтаж модернизированной системы вентиляции

Были начаты монтажные работы по установке новой системы вентиляции на участке по намотке сверхпроводящих катушек. Была смонтирована более мощная вытяжная

часть вентиляции. На очереди монтаж приточной системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Khrushchev S., Lev V., Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zorin A., Magnetic system of the high field superconducting multipole wiggler for LSU CAMD. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, Volume:26, Issue:3 (DOI: 10.1109/TASC.2016.2520089).
- [2] Alexey Bragin, Axel Bernhard, Sara Casalbuoni, Laura Garcia Fajardo, Paolo Ferracin, Andreas Grau, Yevgeny Gusev, Steffen Hillenbrand, Sergey Khrushchev, Iliya Poletaev, Vitaliy Shkaruba, Daniel Schoerling, Vasily Syrovatin, Olga Tarasenko, Valeriy Tsukanov, Askold Volkov, Konstantin Zolotarev, Nikolay Mezentsev, Test results of a CLIC damping wiggler prototype. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, Volume:26, Issue:4. (DOI: 10.1109/TASC.2016.2516341).
- [3] A.Bernhard, J.Gethmann, S.Casalbuoni, S.Gerstl, A.W.Grau, E.Huttel, A.-S.Mueller, D.Saez de Jauregui, N.J.Smole, A.V.Bragin, S.V. Khrushchev, N.A.Mezentsev, V.A.Shkaruba, V.M.Tsukanov, K.V.Zolotarev, P.Ferracin, L.Garcia Fajardo, Y.Papaphilippou, H.Schmickler, D.Schoerling, A CLIC damping wiggler prototype at ANKA: commissioning and preparation for a beam dynamics experimental program. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea. p.2412-2415. (DOI:10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPMW002).
- [4] A.Bragin, Ye.Gusev, S. Khrushchev, N. Mezentsev, V. Shkaruba, V. Syrovatin, O. Tarasenko, V. Tsukanov, A. Volkov, K. Zolotarev, A.Zorin, Superconducting 72-pole indirect cooling 3Tesla wiggler for CLIC dumping ring and ANKA image beamline. SRF-2016, Physics Procedia 84 (2016) 54-61. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.010>)
- [5] S. Khrushchev, N. Mezentsev, V. Shkaruba, V. Syrovatin, V. Tsukanov, The research of the superconducting undulator prototype with neutral poles and features of the magnetic field distribution in it. SRF-2016, Physics Procedia 84 (2016) 62-66. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.011>)
- [6] S. Khrushchev, V.Lev, N. Mezentsev, V. Shkaruba, V. Syrovatin, V. Tsukanov, K. Zolotarev, Performance of Nitrogen Heat Tubes in Cooling Down of Superconducting Magnets. SRF-2016, Physics Procedia 84 (2016) 90-95. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.016>)
- [7] A.Bragin, S. Khrushchev, V.Kubarev, N. Mezentsev, V. Shkaruba, G.Sozinov, V. Tsukanov, Superconducting solenoid for superfast THz spectroscopy. SRF-2016, Physics Procedia 84 (2016) 82-85. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.014>)

№ 15.6.3 Разработка оптимальных вариантов создания источников рентгеновского излучения нового поколения

Введение

Уникальные свойства синхротронного излучения (СИ) привели к возникновению большого количества востребованных исследовательских методик, позволяющих получать исчерпывающую информацию об изучаемых образцах в широком диапазоне научных направлений и дисциплин. В настоящее время в мире существует около 50 центров СИ. В этих центрах работают десятки тысяч исследователей и количество публикаций, производимых по результатам данных работ, составляет тысячи в год.

Создание компактных источников СИ в рентгеновской области спектра является одним из важнейших направлений развития. На базе таких источников можно организовывать небольшие исследовательские центры для университетов, промышленных предприятий и госпиталей. Разработка концепции компактного источника СИ с использованием сверхпроводящих магнитов также представляет огромный интерес для большого количества потенциальных пользователей [1]-[3].

Последнее десятилетие в мировом сообществе активно обсуждаются проекты рентгеновских источников СИ четвертого поколения. Были выработаны требования к этим источникам и предложены несколько путей их создания. На сегодняшний день наиболее перспективным представляется проект источника, использующий преимущества схемы ускорителя-рекуператора (УР). Концепция такого источника излучения на основе многооборотного УР MAPC (MARS – Multiturn Accelerator-recuperator Radiation Source) была предложена в 1997 году Г.Н. Кулипановым, А.Н. Скринским и Н.А. Винокуровым. Её основные преимущества заключаются в возможности получения пучков электронов с ультрамалыми значениями эмиттанса и энергетического разброса, высокое значение реактивной мощности в пучке (~ ГВт) и отсутствие проблем с радиационной безопасностью [4,5].

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Отсутствие специализированного источника синхротронного излучения (СИ) в Сибирском центре сильно усложняет возможности

применения современных научных методик для широкого междисциплинарного сообщества Новосибирского научного центра и других научных групп из российских институтов и университетов.

Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является создание машины, при строительстве которой возможно эффективное использование существующей в настоящее время инфраструктуры. Одним из таких вариантов является создание специализированного источника СИ в существующем тоннеле бустерного накопителя ВЭПП-3.

В рамках данного направления была предложена магнитная система источника СИ, совпадающая по геометрии с существующим тоннелем. Ввиду того что периметр тоннеля составляет всего 72 м, основное внимание было уделено компактности предлагаемой структуры. Основная ячейка состоит из поворотного магнита с поперечным градиентом поля и квадрупольной линзы. Таким образом удалось реализовать структуру близкую к структуре с теоретически-минимальным эмиттансом. Горизонтальный равновесный эмиттанс оказался примерно в тридцать раз лучше существующей в ВЭПП-3 величины (10 нм рад против существующего 300 нм рад).

В процессе работы были предложены варианты конструкции основных магнитных элементов магнитной структуры (дипольного магнита и квадрупольной линзы). Выработаны основные требования к их параметрам для составления технического задания на их детальное проектирование.

Вакуумная камера источника СИ изготавливается по экструзионной технологии из алюминиевого сплава. Внутренняя поверхность камеры в поворотных арках имеет эллиптическую форму с размерами осей 50x30 мм. Толщина стенок в камеры в самом тонком месте составляет 1 мм. Данные размеры камеры позволяют обеспечить достаточный импеданс, при этом камера без проблем вмещается в апертуры основных магнитных элементов (дипольных магнитов и квадрупольных линз).

Для улучшения вакуумных условий и обеспечения распределенной откачки предлагается покрыть внутреннюю поверхность камеры неиспаряемым гетерным покрытием. Предусматривается активация покрытия нагревом камеры до температуры 180°C. Предполагается, что во время активации камеры возможно осуществить термическую изоляцию магнитных элементов от камеры.

Для уменьшения негативных явлений,

связанных с внутрипучковым рассеянием, рабочая частота ускорительной системы была выбрана равной 180 МГц. Для уменьшения стоимости ВЧ системы предполагается использовать существующие в настоящее время генераторы ВЧ, используемые на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4.

В качестве основных ускоряющих структур предлагается использовать два специализированных резонатора с подавлением высших мод. Общее напряжение составляет 2 МВ, что позволяет уверенно покрыть радиационные потери энергии частиц в поворотных арках, сверхпроводящих диполях и вигглерах. Длина сгустка составляет 5 см. К сожалению общая длина резонаторов составляет 4 м, что затрудняет их размещение в техническом прямолинейном промежутке совместно с инжекционной системой. Окончательная конструкция резонаторов в настоящее время еще не определена.

В данном проекте предполагается использовать три сверхпроводящих устройства для генерации СИ, вигглер и два поворотных магнита.

Из каждого устройства предполагается вывести три канала СИ. Таким образом полное количество каналов доступных пользователю составляет 12 и в 9 каналах доступно жесткое рентгеновское излучение, позволяющее реализовывать все популярные рентгеновские методики распространённые в центрах СИ (спектроскопия, дифракционный анализ, рентгено-флуоресцентный анализ и др.).

Разработана и испытана на уникальной научной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» система измерения положения электронного пучка. При помощи разделения измеряемого сигнала ёмкостных датчиков положения по времени система позволяет одновременно определять траектории нескольких пучков, проходящих через датчик положения. Типичный результат измерения орбиты показан на рис. 3.

На основе опыта работы с прототипом высокочастотной электронной пушки, проведены выбор схемы высокочастотного инжектора и оценка его технических параметров.

Рассматриваются различные варианты фотокатодов и лазеров-осветителей.

Предлагаемые в данном направлении установки позволяют обеспечивать заинтересованных пользователей излучениями с необходимыми параметрами для реализации передовых исследовательских методик.

Концептуальные проекты, выполненные в рамках данного направления технически реа-

лизуемы и при наличии необходимого финансирования, могут быть доведены до эксплуатационного состояния.

2. Разработка магнитной системы источника СИ поколения 3 для Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения в существующем тоннеле синхротрона инжекционного комплекса ИЯФ

В 2016 году в рамках работ по созданию проекта нового источника СИ проводился исследование и моделирование с целью предложения оптимальной магнитной структуры источника СИ который может быть размещен в существующем кольцевом тоннеле инжекционного комплекса ИЯФ. На основе анализа современных подходов к созданию источников СИ и анализа существующих методик с использованием синхротронного излучения и актуальных потребностей пользователей были выбраны основные параметры источника, которые могут представлять интерес для Новосибирского научного центра и других научных учреждений и университетов.

Предлагаемый в данном проекте подход к созданию нового источника с низкой стоимостью в существующем тоннеле инжекционного комплекса ИЯФ. Данный тоннель предназначен для размещения бустерного синхротрона, но по мере развития комплекса на некоторой стадии разработка такого синхротрона была приостановлена из-за недостатка финансирования. Тоннель позволяет разместить в нем накопительное кольцо с периметром орбиты около 136 м, что является достаточным для организации низкоэмиттансной магнитной структуры. Такая структура была предложена и вариант размещения представлен на рис. 1.

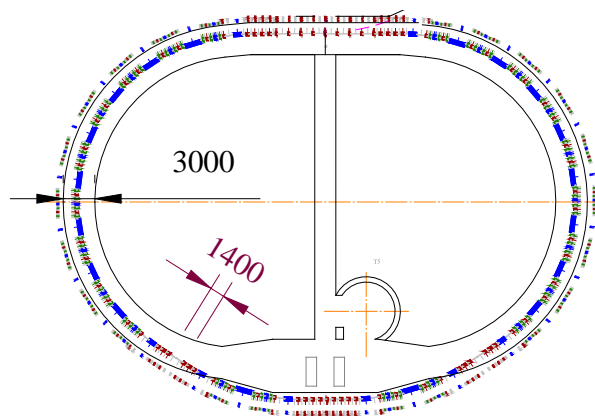


Рисунок 3. Общий вид магнитной структуры в тоннеле бустерного синхротрона.

Структура выходит за границы существующего тоннеля, но на данном этапе это не является принципиальным недостатком, т.к. для реализации данного предложения, в любом случае, необходима существенная переделка тоннеля (его расширение) для создания помещений в которых возможно размещение пользовательских станций.

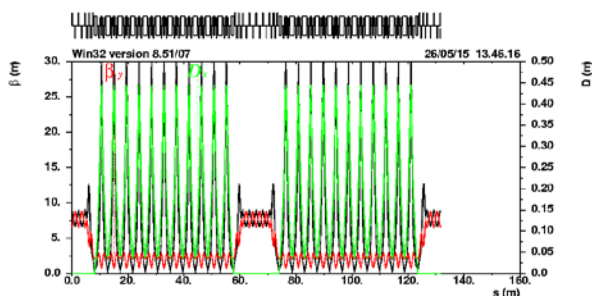


Рисунок 4. Оптические функции структуры источника СИ в тоннеле бустерного синхротрона.

Оптические функции предлагаемой магнитной структуры представлены на рис. 2. Данная структура позволяет обеспечить равновесный эмиттанс ниже 4 нм рад для энергии пучка 2.5 ГэВ. Данная величина обеспечивает хорошее качество пучков СИ и возможность использовать ондуляторы для генерации излучений представляющих большой интерес для реализации востребованных пользовательских методик.

В структуре используются реалистичные магнитные элементы, производство которых не вызывает проблем. Структура также обеспечивает достаточную динамическую апертуру (см. рис. 3) и энергетический акцептанс.

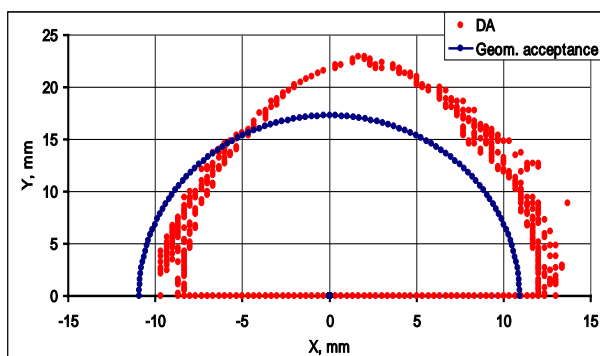


Рисунок 5. Динамическая апертура и энергетический акцептанс структуры.

Таким образом представленная магнитная структура удовлетворяет поставленным требованиям и может быть реализована на базе существующих технологий. Детальная, техническая разработка магнитных элементов и других

технических систем возможна в случае принятия окончательного решения строительства в соответствии с предлагаемым вариантом и наличием необходимого финансирования (около 10% от общей стоимости проекта).

3. Конструирование прототипа ондулятора специализированного источника СИ 4-го поколения

Основными излучателями источника СИ 4-го поколения являются ондуляторы. В качестве одного из возможных типов ондуляторов были рассмотрены ондуляторы на постоянных магнитах. Для изменения длины волны излучения можно менять амплитуду магнитного поля ондулятора. Это обычно достигается изменением величины рабочего зазора ондулятора. Так как амплитуда поля сильно зависит от величины зазора, то диапазон его изменения может не превышать периода ондулятора. Так как для источника СИ 4-го поколения требуются довольно длинные ондуляторы, то целесообразно разбивать их на секции. Схема прототипа такой секции показана на рисунке 4.

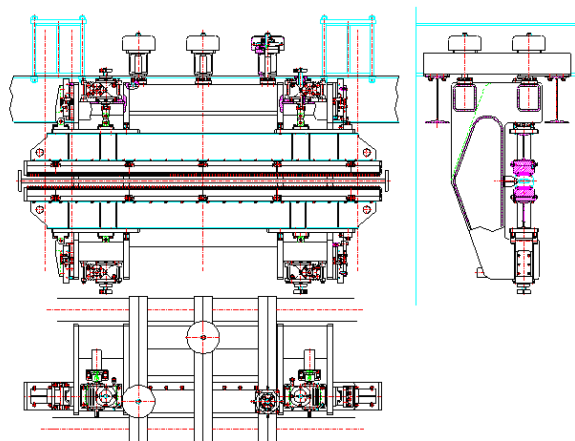


Рисунок 6. Конструкция двухметровой ондуляторной секции.

4. Разработка вакуумной системы специализированного источника СИ

Вакуумная система является одним из ключевых элементов современного ускорительного комплекса. Современные вакуумные системы источников синхротронного излучения должны обеспечивать давление остаточного газа на уровне 10^{-9} Торр. Давление остаточного газа вносит вклад в определение времени жизни пучка, поэтому не должно сильно превышать вышеуказанную величину.

Кроме того, малые апертуры магнитных элементов, ввиду необходимости обеспечения

требуемого качества поля, приводят к существенному снижению апертур вакуумных камер. Таким образом обеспечить необходимую вакуумную проводимость и необходимую скорость откачки возможно только при наличии распределенных вакуумных насосов с использованием неиспаряемых гетерных покрытий. Помимо этого, в электронных ускорительных комплексах одной из проблем локальных увеличений на профиле давления является существенное увеличение десорбции различных газов в окрестностях взаимодействия синхротронного излучения со стенками вакуумных камер. Поэтому при проектировании вакуумной системы необходимо особое внимание уделять разработке вакуумных камер поворотных магнитов и специализированных устройств для генерации СИ. В случае последних, при проектировании каналов вывода СИ, в окрестностях коллиматоров пучка СИ необходимо предусматривать наличие портов откачки и специальных водоохлаждаемых поглотителей (коч-абсорберов).

В данном проекте предполагается использовать алюминиевую вакуумную камеру с нанесением неиспаряемых гетеров (TiZnV) на внутреннюю поверхность. Камера изготавливается экструзионным способом. Камеры дипольных магнитов имеют эллиптическое сечение с внешними размерами 30 мм (по вертикали) и 50 по горизонтали. Камеры прямолинейных промежутков имеют круглый профиль с внешним диаметром 28 мм. Толщина стенок составляет 1 мм.

Камеры вигглеров или ондуляторов могут иметь существенные заужения по вертикали (до 7-8 мм, по внутреннему размеру).

Все переходы при смене профиля должны быть плавными, чтобы избежать сильного увеличения импеданса и соответствующих коллективных нестабильностей пучка.

Сильфонные соединённые должны иметь внутренние высокочастотные экраны, аналогичными экранами должны быть обеспечены шиберные затворы для секционирования камеры.

Одним из серьезных требований, налагаемых использованием гетерных покрытий является необходимость их активации при длительном нагреве камеры до температуры 180°C, это, в свою очередь предполагает возможность разведения магнитных элементов и их тепловой изоляции от вакуумной камеры при проведении такой активации.

Не смотря на вышеизложенные сложности, данная камера может быть изготовлена с использованием существующих и доступных технологий.

5. Разработка высокочастотной системы с частотой 180 МГц для специализированного источника СИ

Высокочастотная система является одним из основных элементов синхротронных ускорительных комплексов. Предлагаемом проекте предлагается использовать частоту 180 МГц. Выбор частоты обусловлен развитием в ИЯФ технологий производства высокочастотных систем с данной частотой. Также возможно использование существующих генераторов и резонаторов.

Также выбор относительно низкой частоты позволяет существенно снизить проблемы ограничения времени жизни пучка из-за внутрепучкового рассеяния.

В данном проекте предлагается использовать резонаторную систему с подавлением высших мод (см. рис. 5).



Рисунок 7. Резонатор с поглощением высших мод на 180 МГц.

6. Разработка проекта модернизации зала для размещения экспериментальных пользовательских станций

Учитывая, что существующий экспериментальный зал находится под землей и в существующем здании, расширение площади зала является трудновыполнимой и дорогостоящей операцией. Возможность такого расширения еще ослаблена тем, что в область этого расширения попадает кабельный канал, по которому проходит большое количество силовых и сигнальных коммуникаций и несколько трубопроводов. Кроме того, при определении технологии работ была понята необходимость существенной модификации инфраструктуры более высоких этажей над расширяемой областью, включая снос отдельных помещений включая существующий.

ющую пульсативную. После детальной оценки объема работ и возможных способов их проведения было принято решение отказаться от такого расширения.

В настоящее время идет разработка проекта источника СИ, не связанного с переделкой существующих комплексов и зданий.

В 2015 г был предложен вариант единой программы развития источников СИ в России, в котором рассматриваются возможные варианты создания источников СИ для российских научных центров.

Разработка единой программы создания источников СИ для российских ученых и самих источников является важным, практически критическим, направлением развития российских наук и технологий. Отсутствие такой программы создает риски национального технологического отставания.

Виду большой протяженности российской территории, для обеспечения исследовательских групп необходимо создание нескольких источников СИ в крупных региональных научных центрах. Представляется целесообразным создание трех таких центров: в европейской части, в Новосибирском научном центре и во Владивостоке. Причем один из предлагаемых источников должен соответствовать самым передовым идеям организации таких машин. В качестве примеров таких структур могут быть использованы идеи создания новых машин ESRF-EBS (Гренобль, Франция) и APS-U (Аргон, США). Одним из перспективных мест строительства такого источника может считаться г. Гатчина, где создается источник нейтронов: высокопоточный реактор ПИК (Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова - ПИЯФ). Наличие источника СИ в непосредственной близости от реактора позволяет использовать синергетический эффект дополненности синхротронных и нейтронных исследований.

Развитие Синхротронного центра в Новосибирске способствует междисциплинарному научному взаимодействию благодаря близкому расположению большого количества научно-исследовательских институтов СО РАН и Новосибирского государственного университета.

Учитывая, что при создании такого источника необходимо использовать самые передовые современные технологии создания ускорительных систем и экспериментального оборудования, необходимо обеспечить их опробование в менее критичных условиях. Для этих целей предлагается в первую очередь создать источник СИ с относительно нежесткими параметрами, выступающего в качестве прототипа

флагманского источника СИ в Гатчине. Данный подход позволит гарантировать получение предельных параметров флагманского источника, а также минимизировать затраты при проектировании, строительстве и эксплуатации. Площадкой для создания источника-прототипа предлагается рассмотреть Институт ядерной физики в Новосибирске. ИЯФ имеет большой российский и международный опыт создания и эксплуатации ускорителей для научных исследований, в том числе и с синхротронным излучением. Здесь имеется экспериментальное производство, необходимое для создания ключевых систем как прототипа источника СИ, так и для флагманского источника. Кроме того, в ИЯФ имеется задел по проекту по созданию универсальной масштабируемой магнитной структуры, которую можно использовать для создания источника-прототипа и для источника предельной яркости. В процессе строительства прототипов возможно организация подготовки высококвалифицированной команды разработчиков и создателей источника предельной яркости в ПИЯФ.

Строительство источника СИ на Дальнем востоке предлагается реализовать на последнем этапе с учетом опыта реализации прототипа источника СИ в Новосибирске и флагманского источника СИ с предельными параметрами в Гатчине, параметры которого будут выбраны исходя из потребностей функционирования действующих источников.

Проведены совещания по обсуждению предложений. Предполагается совместное участие команд из РАН, Министерства науки и образования РФ, РОСАТОМа и из Курчатковского института.

7. Разработка проекта установки высококачественного инжектора на ускоритель-рекуператор многодорожечного ЛСЭ

Одной из наиболее сложных и слабо разработанных подсистем ускорителей-рекуператоров является источник электронов (инжектор). Он должен обеспечивать электронный пучок с нормализованным эмиттансом порядка 1 мм·мрад и достаточно большим средним током. При этом для инжекторов ускорителей-рекуператоров на электронный пучок налагается дополнительное требование малости «галло», т. е. малого количества частиц, сильно отклоняющихся от оси пучка. Этим требованиям удовлетворяет разработанный и изготовленный в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН высокочастотный инжектор. Для его испытаний планируется установить высокочастотный инжектор на ускоритель-

рекуператор установки «Новосибирский лазер на свободных электронах». В 2016 г. был разработан проект установки высокочастотного инжектора на ускоритель-рекуператор многорожечного ЛСЭ. Инжектируемый пучок впускается в ускоряющие резонаторы при помощи электроннооптического канала с 90-градусным ахроматическим поворотом. Схема канала показана на рисунке 6.

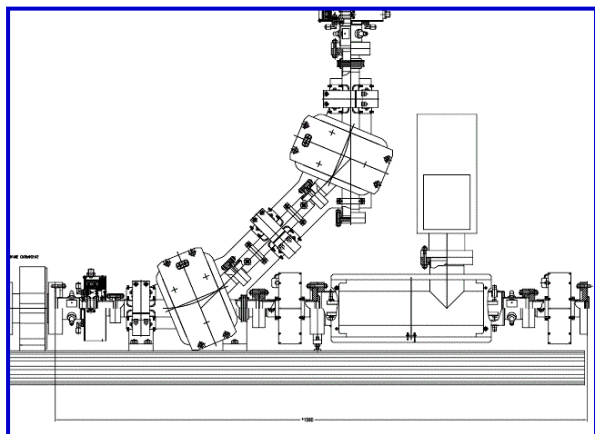


Рисунок 9. Схема электроннооптического канала с 90-градусным ахроматическим поворотом для транспортировки электронов из высокочастотного инжектора в ускоритель-рекуператор.

8. Разработка и изготовление оборудования для управления и диагностики в многорожечном ускорителе-рекуператоре

Многорожечные ускорители-рекуператоры (МУР) являются относительно новым типом ускорителей. Поэтому для создания новых МУР требуется разработка специального оборудования. Первый и единственный в мире МУР создан и работает в ИЯФ СО РАН. На этой установке испытываются новое оборудование и приборы для МУР.

Были рассмотрены различные варианты магнитной системы МУР. Одним из главных требований, предъявляемых к магнитной системе, является сохранение малого эмиттанса электронного пучка при ускорении электронов. Для выполнения этого требования средний радиус поворота должен быть не менее 100 м, а фокусирующая система должна быть оптимизирована. Первоначально был рассмотрен вариант магнитной системы с использованием стандартных электромагнитных квадрупольных и дипольных. В 2016 г. была спроектирована магнитная система на постоянных магнитах. Преимуществами такой системы являются малое энергопотребление и высокая стабильность поля, а недостатком – малый диапазон регулировки поля

и градиентов поля. Для устранения зависимости рабочего поля от температуры в конструкции используется самарий-кобальт и термокомпенсирующие магнитные шунты из сплавов никеля. Для проверки работоспособности магнитной системы на постоянных магнитах требуется создание прототипов поворотных магнитов и квадрупольных линз и соответствующего испытательного стенда.

В 2016 г. испытана новая электроника для ёмкостных датчиков положения пучка. Каждый датчик положения (пикап-станция) содержит 4 ёмкостных датчика (пикап-электрода). Положение электронного пучка в пикап-станции определяется по разностям сигналов с противоположных пикап-электродов, нормированной на их сумму. Специфика МУР состоит в том, что через каждую пикап-станцию проходит несколько электронных пучков с различными энергиями электронов и поперечными координатами. Новая электроника, использующая быстрые ключи, позволяет различать 8 пучков и обеспечивает координатное разрешение лучше 1 мм.

Кроме того, на Новосибирском МУР успешно испытана новая система для определения участков вакуумной камеры, где происходят относительно небольшие (менее 1%) потери электронов. Такая система необходима для снижения радиационного фона.

Список использованных источников

- [1] O.A. Shevchenko, V.S. Arbuzov, N.A. Vinokurov, P.D. Vobly, V.N. Volkov, Ya.V. Getmanov, Ya.I. Gorbachev, I.V. Davidyuk, O.I. Deychuly, E.N. Dementyev, B.A. Dovzhenko, B.A. Knyazev, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, V.R. Kozak, E.V. Kozyrev, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, E.A. Kuper, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, et al., The Novosibirsk Free Electron Laser – Unique Source of Terahertz and Infrared Coherent Radiation, *Physics Procedia*, Volume 84, 2016, Pages 13-18.
- [2] P.A. Piminov, G.N. Baranov, A.V. Bogomyagkov, D.E. Berkaev, V.M. Borin, V.L. Dorokhov, S.E. Karnaev, V.A. Kiselev, E.B. Levichev, O.I. Meshkov, S.I. Mishnev, S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev, S.V. Sinyatkin, P.D. Vobly, K.V. Zolotarev, A.N. Zhuravlev, *Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4*, *Physics Procedia*, Volume 84, 2016, Pages 19-26.
- [3] Boris A. Knyazev, Elena G. Bagryanskaya, Evgeniy N. Chesnokov, Yulia Yu. Choporova, Vasily V. Gerasimov, Yaroslav V. Getmanov, Boris G. Goldenberg, Gennady N. Kulipanov,

Alexander S. Kozlov, Vitali V. Kubarev, Alexey K. Nikitin, Vladimir S. Pavelyev, Sergey E. Peltek, Vasily M. Popik, Tatiana V. Salikova, Mikhail A. Scheglov, Stanislav S. Serednyakov, Oleg A. Shevchenko, Alexander N. Skrinsky, Sergey L. Veber, Nikolay A. Vinokurov, et al.

- [4] Novosibirsk Free Electron Laser as a User Facility, *Physics Procedia*, Volume 84, 2016, Pages 27-34.
- [5] Georgii Shamuilov, Konstantin Zolotarev, The Project of a Magnetic System for Compact x-ray Light Source, *Physics Procedia*, Volume 84, 2016, Pages 118-125.

№ 15.7.1 Развитие экспериментальных методов исследований с использованием СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

Введение

Синхротронное излучение (СИ) в силу своих уникальных особенностей уже многие годы широко используется во всем мире для решения фундаментальных и прикладных задач в физике, химии, биологии, геологии, материаловедении и многих других дисциплинах, а также в междисциплинарных исследованиях. Синхротронное излучение возникает при работе крупных электрофизических установок – накопителей элементарных частиц высоких энергий. В настоящее время в Российской Федерации такими установками оснащены только Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и Научно-исследовательский центр им. И.В.Курчатова (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва).

На базе ИЯФ СО РАН действует Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ), объединяющий и координирующий усилия и работу различных организаций по использованию пучков синхротронного излучения на накопителях ИЯФ СО РАН. Это накопители ВЭПП-3 (2 ГэВ) и ВЭПП-4М (до 4 ГэВ), генерирующие пучки синхротронного излучения от вакуумного ультрафиолетового до жесткого рентгеновского.

Целью выполнения данной темы является обеспечение регулярных исследований на экспериментальных станциях синхротронного излучения российскими и зарубежными экспериментальными группами из различных организаций. Неотъемлемыми составными частями этой цели являются модернизация существующих станций СИ с целью расширения их экспериментальных возможностей, разработка и создание новых экспериментальных станций СИ на накопителях ВЭПП-4М и ВЭПП-3, разработка новых и развитие существующих методов исследования объектов с использованием пучков СИ. Физический запуск Инжекционного комплекса ВЭПП-5, снабжающего пучками электронов накопители ВЭПП-3 и ВЭПП-4М позволил расширить экспериментальную программу исследований на этих накопителях, улучшить стабильность работы накопителей, а,

следовательно, поднять эффективность выполняемых работ.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В течении всего времени работ по проекту было обеспечено выполнение регулярных фундаментальных и прикладных научных исследований на пучках синхротронного излучения из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М более чем 25 российскими организациями, включающими научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения, федеральные ядерные центры. Исследования проводились с использованием инфраструктуры и оборудования центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

Для обеспечения безопасности работ пользователей была произведена существенная модернизация системы непрерывного радиационного контроля в бункере СИ ВЭПП-4М.

В рамках создания станции рентгеновской «Фазово-контрастной интроскопии и РФА» на накопителе ВЭПП-4М реализованы оптические схемы получения рефракционного контраста и фазовой интерферометрии Талбота. Были получены изображения тестовых объектов, слабоконтрастных в ультракоротковолновом рентгеновском диапазоне 0.15 – 0.4 Å.

В 2015 году на станции проведены первые эксперименты по исследованию элементного состава проб на основе анализа спектров их рентгенофлюоресценции. Определены минимальные пределы обнаружения (MDL) тяжелых и редкоземельных элементов (Z=55-66) по линиям K-серий характеристического излучения, возбуждаемого фотонами с энергией 56 и 69,2 кэВ.

Завершено проектирование и произведен физический запуск станции «Детонация» на накопителе ВЭПП-4М. Станция «Детонация» на 8-м канале вывода СИ из накопительного кольца ВЭПП-4М использует излучение из 7-и полюсного вигглера (5 основных полюсов с полем 1.3 Тл и 2 боковых с половинным полем). Станция нацелена на изучение быстропротекающих процессов, проходящих в детонационной волне и на фронте ударной волны. Новая станция имеет значительно более высокие, по сравнению со станцией на ВЭПП-3, значения основных параметров эксперимента, таких как интенсивность и "жесткость" спектра СИ, объем взрывной камеры и допустимый вес взрываемых образцов.

Были проведены тестовые эксперименты по измерению динамики малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) при детонации зарядов ТГ50/50 диаметром 30 мм. Были выполнены тестовые эксперименты по исследованию образования наноалмазов в зарядах диаметром от 10 мм до 40 мм.

Была разработана экспериментальная установка, позволяющая реализовать метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии.

На основе станции РФА-СИ накопителя ВЭПП-3 (Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения) была создана установка «Микро-РФА», на которой проведены работы многомерному картированию, сканированию по глубине, детальному анализу микропроб, а также по послойному двумерному элементному анализу.

Экспериментально обоснована возможность регистрации рентгенограмм от образцов, находящихся под слоем электролита, что позволило подобрать условия для реализации метода получения структурной информации об электроде и электрохимическом осадке непосредственно в процессе электролиза.

Опробован метод самокалибровки алюминиевых фильтров в мягком рентгеновском (МР) диапазоне 1300-2200 эВ. Суть метода заключается в измерении изменения спектральной зависимости сигнала детектора от угла, под которым установлен фильтр по отношению к падающему пучку СИ. При изменении угла меняется эффективная толщина фильтра, что позволяет определить элементный состав фильтра и поверхностную плотность входящих в него элементов. В дальнейшем полученная информация может быть использована для построения расчетной модели спектрального пропускания фильтра за пределами спектрального диапазона, на котором проводились измерения.

2. Обеспечение выполнения исследований с пучками СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

В 2016 году выполнялись исследования с пучками СИ как из накопителя ВЭПП - 3, так и из накопителя ВЭПП - 4М. За отчетный период (январь – декабрь 2016 г.) было выделено 1374 часа для работы с пучками СИ из накопителя ВЭПП - 3 и 396 часов для работы с пучками СИ из ВЭПП - 4М. В выполнении фундаментальных и прикладных исследований на пучках СИ участвовало 14 российских организаций (ИЯФ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, ИГМ СО РАН, ИХТТМ СО РАН,

ИХКиГ СО РАН, ИЦиГ СО РАН, ИГХ СО РАН (Иркутск), НГТУ, НГУ, ТПУ (Томск), РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск), РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров). Длительных остановок из-за поломок не было, было 180 часов дополнительных смен, обусловленных высокой эффективностью работы Инжекционного комплекса ВЭПП - 5.

Следует отметить, что уменьшение интегрального времени, выделенного на экспериментальные исследования, связано с модернизацией канала впуска электронов в накопитель ВЭПП - 3 и сопряжение его с каналом К-500 Инжекционного комплекса ВЭПП - 5.

3. Изучение параметров пучка СИ в канале станции «Детонация-2» и оптимизация его характеристик

На станции «Детонация-2» были проведены измерения параметров пучка СИ, которые сравнивались с теоретическими расчетами. Эксперимент показал, что интегральная интенсивность в два раза меньше расчетной. Была проведена оценка совпадения реального спектра СИ с теоретическим – в этих экспериментах также не было обнаружено полного совпадения экспериментальных данных с теорией.

В связи с этим встал вопрос об измерении реального спектра СИ и реальной интенсивности, которые крайне необходимы для проведения экспериментов по малоугловому рентгеновскому рассеянию (МУРР).

Это объясняется тем, что существующей интенсивности пучка СИ недостаточно для использования монохроматического излучения в измерениях МУРР, т.к. интенсивность рассеянного излучения на несколько порядков меньше, чем в прямом пучке. Поэтому в экспериментах использовалось излучение с полихроматическим реальным спектром, представленным на рис. 3.1. Этот спектр получен путем расщепления всех спектров: излучения вилглера, поглощения в образце, поглощения в детекторе DIMEX-3.

Математические расчеты интенсивности сигнала МУРР для реального спектра от сферических частиц разного диаметра показывают, что разным частицам соответствует разные наклоны сигнала МУРР (рис. 3.2).

Методом наименьших квадратов определена эффективная энергия фотонов, такая, чтобы отклонение между сигналом МУРР от реального спектра излучения на станции и сигналом МУРР на эффективной энергии было минимальным. С помощью математических расчетов для частиц различного размера получена эффективная энергия рентгеновского излучения в 38

кэВ (рис. 3.3), при этом длина волны СИ составляет $\lambda = 0.0326$ нм. Получив эффективную длину волны, можно ввести понятие вектора рассеяния $q = 4\pi\sin(\theta) / \lambda$ для реального спектра излучения и восстановить размеры частиц, применяя формулу Гинье.

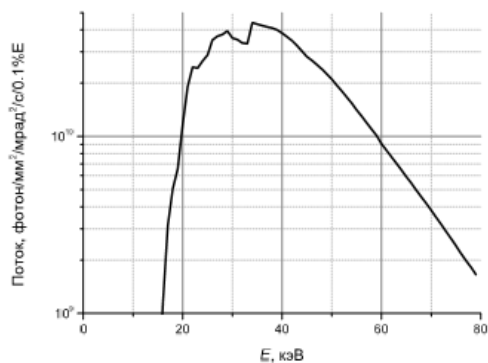


Рисунок 3.1. Расчетный спектр излучения на станции «Детонация-2» (40 мм ТНТ).

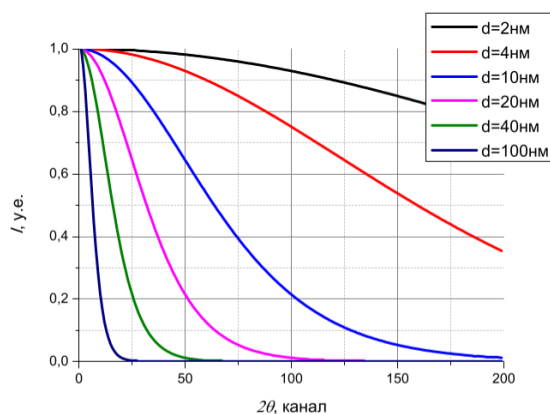


Рисунок 3.2. МУРР на расчетном спектре излучения от сферических частиц разного диаметра.

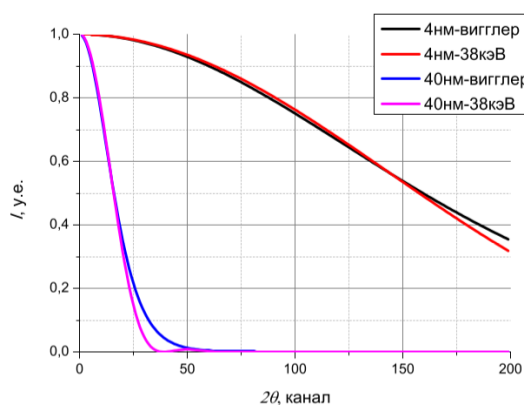


Рисунок 3.3. МУРР с учетом реального спектра и для эффективной энергии.

На рис. 3.3 приведены вычисленные кривые МУРР от наночастиц диаметром 4 и 40 нм для реального спектра (черная и синяя линии) и кривые МУРР для эффективной энергии

38 кэВ (красная и фиолетовая линии). Видно, что на первых 70% спада интенсивности зависимости МУРР совпадают, что позволяет использовать формулу Гинье для реального спектра на станции. На рис. 3.4 приведена зависимость эффективной энергии от диаметра просвечиваемого заряда.

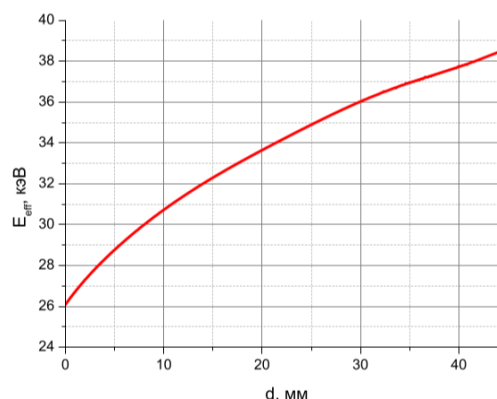


Рисунок 3.4. Зависимость эффективной энергии от диаметра просвечиваемого заряда.

4. Модернизация станции СИ «Космос» на накопителе ВЭПП-4М

На станции "Космос" проведен физический запуск нового двухзеркального монохроматора мягкого рентгеновского диапазона. Новый монохроматор, по сравнению с предыдущим, обеспечивает лучшие кинематические характеристики, что расширяет диапазон энергий, доступных за одно сканирование без вскрытия рабочего объема на атмосферу и повышает пространственную стабильность пучка в ходе сканирования.

На механизме нового монохроматора отработана методика работы с фокусирующими зеркалами полного внешнего отражения, что позволило существенно повысить поток фотонов на исследуемые детекторы при работе в ВУФ диапазоне (10-100 эВ).

В объеме эталонного детектора установлен вторичный электронный умножитель, работающий в счетном режиме. Применение такого детектора существенно повышает нижний порог чувствительности станции при проведении относительных измерений на слабых потоках ВУФ и мягкого рентгеновского излучения (10 - 2000 эВ).

Установлено два набора оптических ножей (по 4 штуки до и после монохроматора). Каждый нож имеет независимый сильфонный привод. Такая конструкция позволяет формиро-

вать рабочий пучок различных размеров в любом месте приемной апертуры монохроматора, а также эффективно подавлять паразитные отражения после него.

Добавлен дополнительный блок вводимых тонкопленочных фильтров, позволяющий устанавливать на пути пучка парные фильтры для устранения влияния возможных точечных проколов на каждом из этих фильтров.

В результате проведенной модернизации удалось существенно (примерно на 2 порядка) уменьшить нижний порог регистрации потока фотонов и улучшить фоновые условия в объеме эталонного детектора станции. Также новый инструментарий дает возможности разработки новых, ранее недоступных метрологических методик.

5. Разработка методов исследования радиационной деградации детекторов в мягком рентгеновском и ВУФ диапазонах

На станции синхротронного излучения "Космос" накопителя ВЭПП-4М разработана методика исследования радиационной стойкости полупроводниковых детекторов в диапазоне энергий фотонов 80-160 эВ.

Для выделения из "белого" пучка СИ квазимонохроматического излучения, т.е. фотонов с энергиями, лежащими в рамках некоторой ограниченной полосы, на станции "Космос" применяется зеркало полного внешнего отражения и тонкопленочные фильтры. Фильтры ограничивают поток фотонов в мягкой области спектра, а зеркало используется для удаления из пучка фотонов с высокой энергией. Для увеличения потока фотонов на облучаемую поверхность детектора использовалось сферическое зеркало с радиусом кривизны 10 м, установленной под углом $\theta=7^\circ$ к пучку СИ.

После облучения производилось исследование однородности чувствительности детектора по всей входной поверхности. Исследование проводилось на монохроматическом пучке без фокусировки. Перед детектором устанавливалась диафрагма $\varnothing 500$ мкм, выделяющая из параллельного монохроматического пучка СИ узкий луч, относительно которого производилось сканирование детектором по двум поперечным координатам. Полученная трехмерная диаграмма по существу представляет собой карту чувствительности поверхности детектора. Деградация чувствительности детектора в месте облучения на энергии 100 эВ составила 13 %. Таким образом, в результате проведенной ра-

боты отработана методика получения квазимонохроматического пучка СИ ЭУФ диапазона, позволяющая проводить облучение различных объектов дозами порядка нескольких МГрэй. Продемонстрировано падение чувствительности облученной области кремниевого фотодиода на 13% при наборе поглощенной дозы 1.8 МГрэй. Отработана методика получения карты чувствительности облученного детектора и методика сравнительного измерения спектрального отклика облученной и необлученной частей детектора.

6. Модернизация системы непрерывного радиационного контроля в бункере СИ ВЭПП-4М

Основные работы по модернизации системы непрерывного радиационного контроля были проведены в 2015 г. Основные блоки были заменены с учётом современной элементной базы. В 2016 г. продолжалась модернизация системы. Основное направление модернизации было связано с совершенствованием программного обеспечения входящего в состав системы.

В частности, основные изменения касались системы долговременного хранения данных радиационного контроля и составления записей элементов каналов вывода СИ. В частности, была организована запись показаний датчиков системы в основную операционную базу данных в которой накапливается информация обо всех технических системах комплекса ВЭПП-3/ВЭПП-4М. Данная информация в последствии может быть использована для анализа, получения статистических характеристик работ на каждом канале и для удобной визуализации режима работ.

Пример визуализированного представления одного из заходов работ с использованием СИ представлен на рис. 6.1.

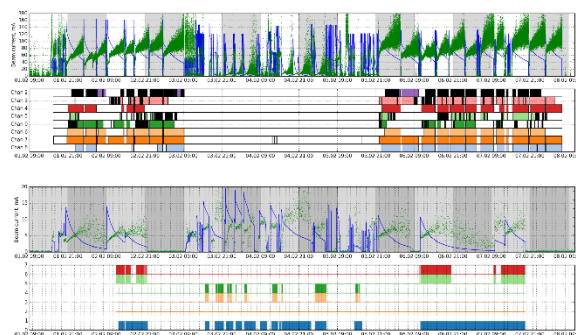


Рисунок 6.1. Общий вид системы визуализации долговременного режима работ с использованием СИ из накопителя ВЭПП-3 (верхний рисунок) и ВЭПП-4М (нижний рисунок).

Данная система визуализации позволяет просматривать статистику использования пучкового времени на каждом канале. Так как все технические параметры работы комплекса представляют интерес для последующего анализа (возможно через несколько лет) данные системы радиационного контроля также могут быть проанализированы позже с учетом долгосрочных тенденций и приоритетов.

7. Запуск станции рентгеновской фазоконтрастной интроскопии и РФА на накопителе ВЭПП-4М

Реально физический запуск экспериментальной станции произошел в 2015 г. В 2016 г. продолжались испытания возможностей использования станции для анализа различных образцов и объектов. В частности, была реализована процедура рентгеноскопического контроля лабораторных животных (мышей), используемых в работах по разработке микропучковой терапии. Показана реальная возможность контрастирования слабоконтрастных изображений.

Были также протестированы возможности фазоконтрастной визуализации внутренних неоднородностей в различных технологических образцах. Проведён цикл работ по исследованию неоднородностей в высокоэнергетических материалах от различных производителей.

Была произведена дозовая калибровка мониторных детекторов, используемых на станции для контроля абсолютной интенсивности входного излучения. В настоящее время возможно достаточно точная оценка общей дозы или потока фотонов (3 – 5 %).

Флуоресцентная часть станции также была протестирована на предмет применения рентгено-флуоресцентного анализа с реальными геологическими образцами. В частности, была проанализирована серия образцов из полиметаллического метеорождения Тамтор. В качестве образцов сравнения использовались российские и международные стандарты магматических горных пород и озёрных отложений (AGV-1, BCR-1, CBT-16A, DNC-1, BIR-1, CGD-1A, G-2, БИЛ-1). Минимальные пределы обнаружения тяжелых и редкоземельных элементов ($Z=55-66$) по линиям К-серий характеристического излучения, возбуждаемого фотонами с энергией 56 и 69.2 кэВ лежат в диапазоне от 0.5 до 2 ppm (г/т).

8. Разработка концепции нового канала для изучения откольных явлений

Исследования процессов разрушения

материалов при действии интенсивных импульсных нагрузок представляют большой интерес для прикладных задач. Помимо традиционных направлений, связанных с военной техникой и вооружением, эти исследования имеют значение для разработки и эксплуатации многих современных конструкций. Развитие новых технологий с применением взрыва, импульсных лазеров, корпускулярных пучков и других импульсных источников энергии также тесно связано с результатами экспериментов с ударно-волновым нагружением материалов. Наконец, такие эксперименты значительно расширяют возможности фундаментальных исследований в области физики прочности.

Специфика ударно-волновых воздействий заключается в том, что из-за малой длительности времени нагружения практически отсутствует взаимное влияние отдельных участков нагружаемого тела, содержащих какие-либо крупные дефекты, и, соответственно, их вклад в процесс откольного разрушения. Кроме того, при этом развиваются экстремально высокие скорости деформирования, происходит разогрев вещества, изменяется сам механизм пластической деформации (например, в металлах происходит активирование дополнительных плоскостей скольжения, увеличивается вклад двойникования в деформацию даже для тех материалов, где в обычных условиях нагружения деформационные двойники не образуются). Долгое время считалось, что при ударно-волновом нагружении разрушение (откол) происходит мгновенно при достижении критической величины растягивающих напряжений σ_p , называемой обычно откольной прочностью материала, а сама величина σ_p является некоторой постоянной характеристикой прочности материала, не зависящей от фактора времени.

Только в 60-х годах 20-го столетия появились первые работы, неоспоримо указывающие на необходимость учета этого фактора при откольном разрушении, то есть при ничтожно малых временных интервалах, меньших 10^{-6} с.

Законченной теории откольного разрушения материалов при действии кратковременных растягивающих напряжений пока не существует. Результаты проведенных исследований демонстрируют сложный характер откольного разрушения.

Кроме того, откольные явления существенным образом зависят от формы и размера образца. Поэтому для решения практически важных задач при проектировании новой станции необходимо закладывать параметры образцов, наиболее близких к реальным изделиям.

Именно размер и материал исследуемых образцов определяет спектр СИ новой станции.

Проведенные расчеты показали, что для исследования практически важных объектов необходимо иметь излучение с энергией квантов не меньше 600 кэВ. Для генерации такого излучения необходимо использовать электроны с энергией порядка 6 ГэВ, движущиеся в магнитном поле 7 Т.

Один из вариантов, который позволит реализовать эксперимент по исследованию откольных явлений – изготовление 50-ти полюсной сверхпроводящей змейки с полем 7 Т и установка ее на накопитель ВЭПП-4.

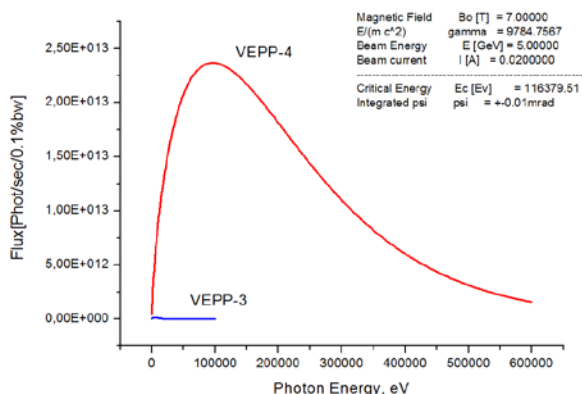


Рисунок 8.1. Рассчитанный спектр излучения вигглера с полем 7 Т, установленного на ВЭПП-4.

9. Разработка новых материалов стенок термоядерного реактора и исследование их поведения в экстремальных условиях, близких к реальным

Требования, предъявленные к материалу первой стенки токамака, открыли новую страницу в материаловедении. Поэтому пока ограничимся перечнем основных процессов, происходящих при таких воздействиях. Во-первых, распыление стенки потоками ионов. Во-вторых, распыление под действием потоков нейтронов. В-третьих, при нейтронной бомбардировке из поверхности стенки вылетают «куски» примерно по 10-12 атомов (10 мкм³), так называемые «чанги». В четвертых, вколотенные в материал стенки атомы гелия и водорода собираются в пузыри, и в результате материал «распухает» — этот процесс называется «свеллинг». Если пузырь образуется близко к поверхности, она вспучивается — этот процесс называется «блистеринг». В-пятых, шелушение поверхности — верхняя корка на этом пузыре отваливается; этот процесс называется «флекинг». Получающаяся в результате блистеринга

пористая, губчатая поверхность тормозит флэкинг, и после разрушения материала на некоторую глубину процесс замедляется. Предложено и целенаправленное применение этого эффекта — использование поверхности с губчатой, игольчатой (щетка) и сотовой структурой. В последнем случае замедляется и распыление, так как часть материала переплывает со стенки на стенку, не вылетая в объем. И, наконец, в-шестых, радиационная сегрегация — под действием облучения ионами меняется состав сплавов, т. е. облучение вызывает диффузию. Так, если на квадратный сантиметр сплава NiCrWMo обрушить дозу 5-1020 ионов Н⁺ с энергией 10 кэВ каждый, то поверхностный слой на глубине 1 мкм уже не будет содержать W и Mo, которые уйдут в более глубокие слои. Ни про один из этих процессов нельзя сказать, что он достаточно изучен и понят.

Чтобы затормозить перечисленные процессы, необходимо переходить к более тугоплавким материалам. Новый класс таких материалов – сложные карбиды. Карбид гафния-тантала обладает рекордной на данное время температурой плавления – 4200° С. Синтез таких материалов был исследован методами синхротронного излучения на канале СИ № 4 ВЭПП-3.

Методами дифракции с использованием синхротронного излучения (энергия квантов 33.7 кэВ) и сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения исследовано взаимодействие в системах Ti - C, Ta - C, Hf - C в ходе интенсивной механической активации в высокоэнергетическом активаторе планетарного типа. Установлено, что в системах Me - C на первом этапе образуются механокомпозиты Me/C. В системе Ti - C в дальнейшем, по-видимому, происходит плавление титана, растекание его по поверхности частиц сажи и практически одновременная кристаллизация карбида титана. Для системы Hf - C механохимическая реакция взаимодействия, аналогично системе Ti - C, идет с участием жидкого гафния, однако для завершения реакции требуется большее время. В системе Ta - C, вероятно, механохимическое взаимодействие носит твердофазный характер вследствие более высокой температуры плавления тантала по сравнению с адиабатической температурой взаимодействия Ta с углеродом (~2930 К). Полученные ультрадисперсные механокомпозиты Ti/C, Ta/C, Hf/C и карбиды TiC, TaC, HfC использованы в качестве прекурсоров для радиационно-термического синтеза и плавления карбидов. Установлено, что в зависимости от режима и плотности тока на образце можно получать частично спеченный порошок карбида, либо монолитный плавленый образец.

Для получения смеси титан-сажа (50:50) проводили кратковременную механоактивацию в течение нескольких секунд, которая не приводит к существенному изменению формы и размеров частиц титана и сажи, однако поверхность частиц титана становится изъеденной, шероховатой. Также наблюдается изменение распределения частиц титана по размерам: возрастает вклад более мелких частиц. Явных изменений в размерах и форме частиц сажи не происходит. На дифрактограмме смеси, механизированной в течение нескольких секунд, регистрируются только рефлексы титана.

При механической активации в течение 4 мин уже образуются агрегаты, состоящие из кристаллических частиц с неровными краями, имеющих строение, близкое к пластинчатому. На дифрактограмме этой смеси (рис. 9.1.) фиксируются четкие рефлексы карбида титана и едва заметные размытые рефлексы остаточных незначительных количеств титана. Дифрактограммы такого типа, с узкими и интенсивными рефлексами, обычно свидетельствуют о предварительном плавлении одной из фаз и кристаллизации продукта из расплава, в данном случае, карбида титана из расплава титана.

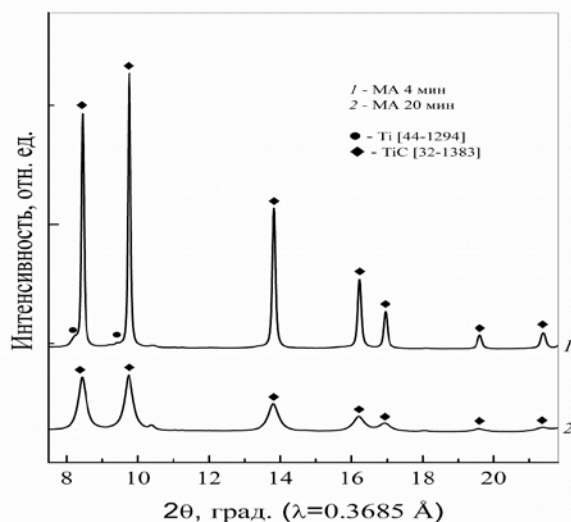


Рисунок 9.1. Дифрактограммы смеси титан + углерод (50:50) после механоактивации в течение 4 (1) и 20 мин (2).

10. Разработка методов исследования новых высокоэффективных твердых ракетных топлив нового поколения

Твёрдое ракетное топливо (ТРТ) — твёрдое вещество или смесь отдельных веществ, способная гореть без доступа воздуха, выделяя при этом большое количество газообразного рабочего тела, нагретого до высокой температуры. Используется в твердотопливных ракетных двигателях для создания реактивной

тяги.

Смесевые твердые топлива (СТТ) представляют собой смесь твердых горючего и окислителя. Существует большое количество различных смесей, пригодных для ракетостроения. Как правило, все они создаются вокруг небольшого количества эффективных твердых окислителей, которые комбинируют с разнообразными горючими веществами.

В современных твердотопливных двигателях большой мощности чаще всего применяют смесь перхлората аммония с алюминием и каучуками. Иногда вместо каучуков используют полиуретан, что позволяет повысить срок годности шашки ТРТ и увеличить её жесткость, но в ущерб технологичности производства. Алюминий является основным источником тепловой энергии благодаря высокой теплотворности реакции окисления. Для более эффективного горения предложено использовать не чистый алюминий, а сплав на основе алюминия с кальцием и барием.

В 2016 году была разработана методика для исследования поведения этого сплава на пучке синхротронного излучения при взаимодействии с кислородом. Динамика изменения фазового состава и структуры образцов в процессе окисления изучалась рентгенодифракционным методом с использованием СИ из накопителя ВЭПП-3 на станции 4-го канала. Монохроматическое излучение ($\lambda = 0.308 \text{ \AA}$) проходило сквозь тонкий слой образца и давало дифракционную картину, регистрируемую плоским двухмерным детектором. В качестве детектора служила система на основе запоминающих экранов MAR345 фирмы «Marresearch». Образец порошка помещали в отверстие держателя из оксида алюминия и нагревали на воздухе со скоростью 10 К/мин. до 1273 К.

На рис. 10.1 представлены дифрактограммы, полученные на порошках сплавов при температуре 773 К.

Дифрактограммы, снятые от комнатной температуры до температуры плавления сплавов, имеют аналогичный вид. Их различие состоит в количестве регистрируемых фаз. В случае порошка сплава Al-Ca фиксируется алюминий и два интерметаллида составов Al_4Ca и Al_2Ca . В системе Al-Ba фиксируется, кроме алюминия металлического (твёрдого раствора Ba в Al), лишь одна фаза интерметаллида — Al_4Ba . Имеются максимумы оксида алюминия, но они при заданной чувствительности незначительны, что говорит о малой окристаллизованности оксида. В основном оксид ренгеноаморфен. Количество установленных интерметаллидов в структуре

порошков сплавов согласуется с фазовыми диаграммами сплавов Al-Ca, Ba. В области, богатой алюминием, наиболее устойчивы интерметаллиды Al_4Ca , Al_2Ca и Al_4Ba .

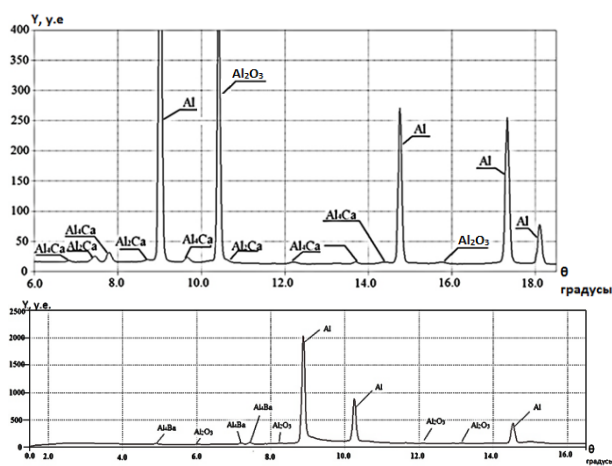


Рисунок 10.1. Дифрактограммы порошков сплавов при 773 К: Al-Ca (вверху); Al-Ba (внизу).

11. Создание станции диагностики процессов горения с использованием СИ ВУФ диапазона на накопителе ВЭПП-4М

Для исследования процессов горения на основе фотоионизационной масс-спектрометрии с использованием СИ ВУФ диапазона (5 – 20 эВ) совместно с ИХКиГ СО РАН на накопителе ВЭПП-4М создана экспериментальная станция «Пламя».

Созданная станция использует излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4М и получила рабочее название "Станция синхротронного излучения «Пламя»". Место установки станции – фронтенд ныне действующей метрологической станции «Космос». Поскольку станции установлены на одном канале вывода СИ, они действуют в режиме разделения времени. Станция «Пламя» использует инфраструктуру фронтенда, обеспечивающую предварительную коллимацию пучка СИ, его оперативное перекрытие радиационными затворами, систему дифференциальной откачки и систему быстродействующей вакуумной защиты канала СИ на случай аварийного прорыва атмосферы со стороны станции (Рисунок 11.1).

На предыдущем этапе выполнения проекта был проведен монтаж станции, получен рабочий вакуум, проведен первичный запуск, произведены тестовые измерения потока фотонов в рабочую область после всех оптических элементов станции. По результатам измерений в конструкцию станции внесены необходимые

доработки. В соответствии с изменением конструкторской документации были изготовлены новые элементы вакуумного сопряжения станции и канала фронтэнда, а также элементы сопряжения рентгенооптических и оптических узлов. Ведётся установка и настройка модернизированного оборудования.

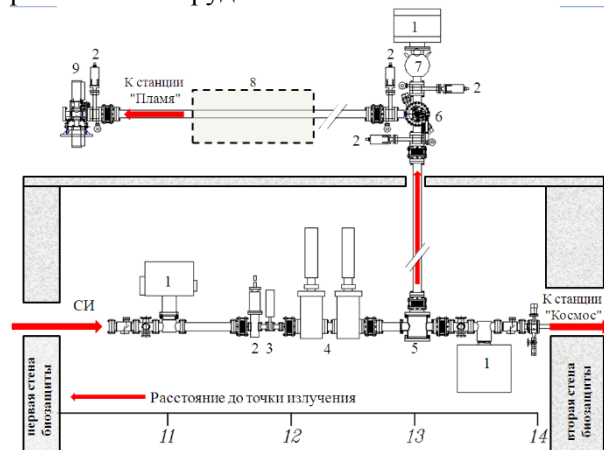


Рисунок 11.1. Компоновка канала вывода СИ: 1 – магниторазрядные насосы; 2 – вакуумные шиберы; 3 – аварийный быстродействующий (10 мс) шибер аварийной защиты вакуума; 4 – радиационные затворы; 5 – блок вводимого фокусирующего зеркала; 6 – блок дифракционной решетки; 7 – азотная ловушка; 8 – газовый фильтр; 9 – выходная щель. В нижней части рисунка показано расстояние до точки излучения в метрах.

12. Разработка методов прецизионной рентгеновской топографии

В рамках разработки методов прецизионной рентгеновской топографии совместно с сотрудниками института геологии и минералогии им. В.С.Соболева проводилось исследование структуры полученных ими монокристаллов алмаза II-а типа с использованием метода рентгеновской топографии. Проведены исследования кристаллической структуры синтетических алмазов, выращенных на затравочных кристаллах Mg-C при давлении 7 ГПа и температуре 1800-1900°C.

Исследование с использованием рентгеновской топографии показали, что монокристаллы, выращенные на затравках Mg-C, имеют высококачественную структуру. Искажение кристаллографических осей по полученным данным не превышает 0.01°. На топограммах хорошо разрешаются пучки дислокаций (рис. 12.1).

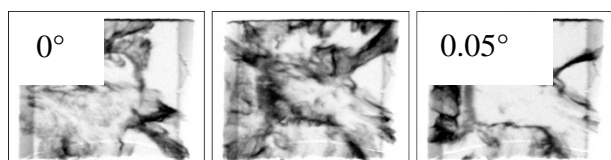


Рисунок 12.1. Рентгеновские топограммы монокристалла алмаза, полученные при сканировании по углу.

Большая часть дислокаций наследуется из затравочного кристалла. В затравочном кристалле дислокации ориентированы по $\langle 100 \rangle$, а в секторах $\{111\}$ граней по $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ направлениям. При переходе дислокаций из затравочных кристаллов в выросший слой, многие дислокации изменяют направления и становятся не строго прямолинейными, многократно изменяя направления. По полученным данным общую плотность дислокаций можно оценить величиной, не превышающей 10^{-4} см^{-2} .

13. Разработка методов рентгеновской вычислительной томографии в комбинации с дифракционными данными

В рамках развития методов рентгеновской вычислительной томографии в комбинации с дифракционными данными для изучения взаимосвязи микроструктуры высокоэнергетических материалов с кристаллическим строением были выполнены исследования смеси фуразанотетразин диоксида (ФТДО) и динитродиазептана (ДНП). Исследования были выполнены на миниатюрных (характерный размер 0.8 мм) образцах, вырезанных из капель, кристаллизованных при различных температурных условиях. В качестве примера на рис. 13.1 представлены изображения томографических срезов образцов смеси ФТДО/ДНП в соотношении 75/25, закристаллизованных при температурах $+20^\circ\text{C}$ и -20°C . Толщина полученного среза составляет 2 мкм, пространственное разрешение находится на уровне 3-4 мкм.

Образцы отличаются концентрацией пор, представленных на рисунке черным цветом. По-видимому, при быстрой кристаллизации, происходящей при низких температурах, газовые пузыри, образующиеся в результате химической реакции, не успевают быть вытеснены растущими кристаллитами на поверхность образца. При использовании в качестве добавки 3% наноразмерного катализатора оксида титана (рис. 13.2) концентрация пор в образце остается низкой и не зависит от температуры кристаллизации. Объяснение этого факта требует дополнительных исследований.

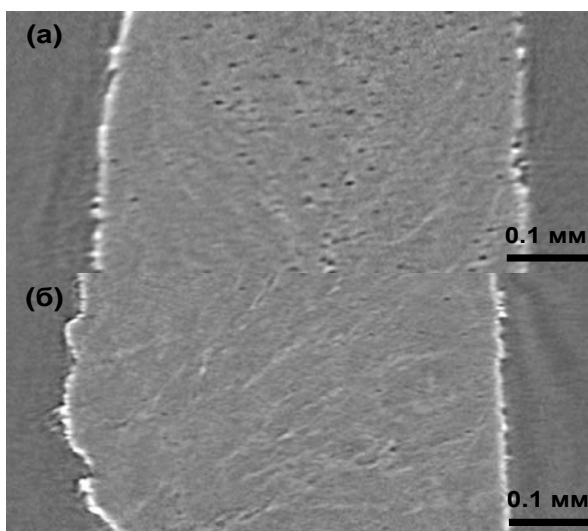


Рисунок 13.1. Томографический срез образцов смеси ФТДО/ДНП=75/25: (а) полученный при температуре -20°C и (б) при температуре $+20^\circ\text{C}$.

Светлые точки на рис. 13.2 представляют собой агломераты наночастиц TiO_2 микрометрового размера, что свидетельствует о неравномерности распределения катализатора в объеме образца. На всех томографических срезах присутствуют белые полосы, которые обусловлены границами раздела кристаллитов и косвенным образом свидетельствуют о направлении их роста. Из снятых методом Дебая-Шеррера дифрактограмм рис. 13.3 видно, что рост кристаллитов в образце имеет преимущественное направление, что обуславливает неравномерность интенсивности в дифракционных кольцах.

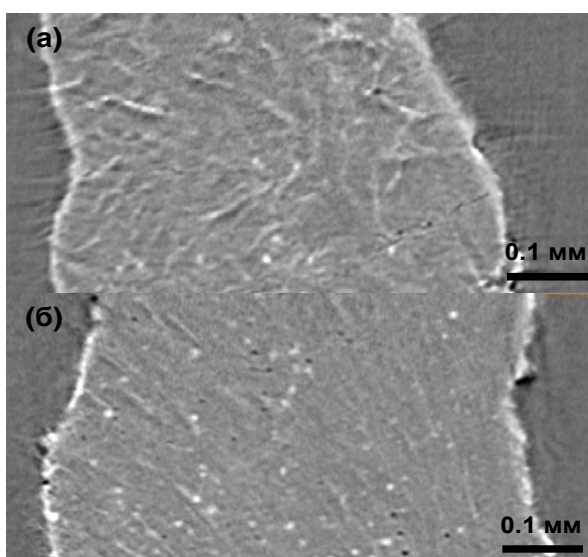


Рисунок 13.2. Томографические срезы образцов смеси ФТДО/ДНП=75/25 с добавлением 3% TiO_2 : (а) полученный при температуре -20°C и (б) при температуре $+20^\circ\text{C}$.

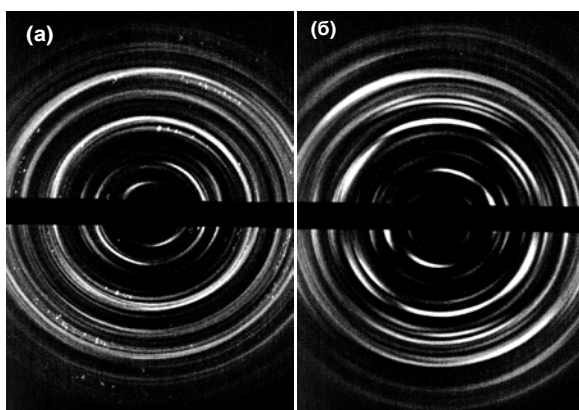


Рисунок 13.3. Дифрактограммы образцов (а) ФТДО/ДНП=75/25 (+20°C) и (б) ФТДО/ДНП=75/25 с добавлением 3% TiO₂ (+20°C), полученных в излучении с длиной волны $\lambda=0.727$ Å.

По точечным рефлексам на кольцах Дебая рис. 13.3(а) так же видно, что при температуре +20°C в образцах без примеси TiO₂ образуются достаточно крупные кристаллиты. Данные о внутренней структуре образцов кристаллизованных смесей используются для контроля и совершенствования технологии приготовления образцов и для обнаружения зависимости результатов огневых испытаний от качества используемых образцов.

14. Создание многофункционального рентгенодифракционного комплекса для структурных исследований моно-, поликристаллических и аморфных материалов при нормальных условиях и в реакционных средах при высоких и низких температурах на базе прецизионного дифрактометра HUBER 5020 на накопителе ВЭПП-4М

В рамках подготовительных мероприятий по созданию рентгенодифракционного комплекса для структурных исследований в бункере СИ ВЭПП-4М были выполнены следующие работы:

- Выполнена трассировка канала вывода СИ №3, в процессе которой установлено, что при равновесной орбите электронов в накопителе в канал СИ выводится только малая часть пучка СИ, а для вывода полного пучка требуется значительное искажение орбиты электронов в накопителе. Таким образом, требуется дальнейшая корректировка положения фронтенда канала СИ №3 в зале накопителя.
- Проверена работоспособность механических узлов монохроматора, и монохроматор подготовлен к установке на канал СИ.
- Изготовлен пьедестал, на котором будет

установлен дифрактометр HUBER 5020.

- Изготовлен и размещен в бункере СИ ВЭПП-4М каркас бокса радиационной защиты дифрактометра, на котором будут смонтированы свинцово-алюминиевые защитные панели.

На рис. 14.1 представлен общий вид дифрактометра HUBER 5020 в законсервированном состоянии, пьедестал дифрактометра и каркас бокса радиационной защиты, собранные и установленные в бункере СИ ВЭПП-4М.



Рисунок 14.1. Дифрактометр HUBER 5020 (слева). Пьедестал дифрактометра и каркас бокса радиационной защиты в сборе (справа).

№ 15.7.2 Исследования быстропротекающих процессов с наносекундным разрешением с использованием рентгеновского СИ

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов изучения быстропротекающих процессов на пучках СИ. Эти методики открывают новые возможности по исследованию фундаментальных проблем, возникающих при воздействии экстремальных давлений и температур на вещество, таких как, образование нано-частиц за детонационной волной, уравнение состояния вещества в условиях детонации, а также процессы, происходящие при ударном воздействии на материалы. Для развития таких методик были разработаны и запущены в эксплуатацию компоненты станции «Детонация-2» на канале СИ №8 на ВЭПП-4М, а также усовершенствовались быстродействующие детекторы DIMEX для регистрации быстропротекающих процессов.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

Для выполнения работ по проекту выполнялась регулярная работа на станции «ВЗРЫВ» на ВЭПП-3 с газовым детектором DIMEX, на которой был исследован детектор с прототипом нового чипа регистрации, и на основе полученных данных завершена разработка нового полноформатного чипа, который позволит улучшить временное разрешение газового детектора DIMEX в 4 раза (до 125 нс).

В 2015 г. был получен стабильный пучок в канале с 7-миполосной змейкой и измерены его характеристики. Это дало возможность наладить регулярную работу на станции «ВЗРЫВ» на ВЭПП-4М, провести испытания прототипов кремниевых сенсоров на пучке СИ на ВЭПП-4М и сформулировать предварительные требования к финальному сенсору для микрополоскового кремниевого детектора DIMEX.

На канале СИ ВЭПП-4М с 7-полосной змейкой проводились работы по изучению параметров пучка при помощи детектора DIMEX и прототипов кремниевых сенсоров для будущего детектора DIMEX-Si. Было измерена величина потока фотонов СИ и профиль пучка, и подтверждено соответствие полученных экспериментальных данных расчетам. Результаты измерения сравниваются с данными, получен-

ными моделированием. Видно хорошее согласие эксперимента с моделированием. Прототип сенсора имеет толщину 0.3 мм и увеличение длины линии пересечения с пучком достигалось поворотом сенсора относительно плоскости пучка.

Были изучены зависимость характеристик малоуглового рентгеновского рассеяния от размера заряда взрывчатого вещества (масштабные эффекты), а также процессы образования кумулятивных струй при взрывном нагружении различных материалов (пыление). В частности, было впервые обнаружено, что при увеличении диаметра заряда увеличивается время образования наночастиц алмазов и их средний размер.

Были закончены испытания детектора DIMEX с прототипом новой электроники. В рабочем режиме собственный шум электроники составляет примерно 3000 электронов, что соответствует сигналу примерно от 6 фотонов с энергией 20 кэВ в ксеноне. Эта величина позволит детектору эффективно регистрировать слабый сигнал в экспериментах по малоугловому рассеянию.

В течение 2015 года изучались характеристики прототипов сенсоров для кремниевого детектора DIMEX-Si, изготовленных в 2014 г. фирмой Hamamatsu Photonics по нашему заказу. Основное отличие изготовленных прототипов от традиционных кремниевых микрополосковых сенсоров заключается в том, что Каждая полоска прототипа присоединена к охранному кольцу, которое в свою очередь присоединено к нулевому полюсу высокого напряжения, через резистор малой величины от 100 Ом до 1000 Ом (было изготовлено три варианта прототипов с различными номиналами сопротивлений). Это необходимо для того, чтобы большой ток, генерируемый вспышками СИ, не создавал падения напряжения, которое нейтрализует внешнее напряжение смещения на сенсоре.

На основе данных полученных в процессе испытаний прототипа электроники для газового детектора DIMEX, был разработан полноформатный чип DMXG64. Новый чип включает в себя 64 канала, каждый из которых содержит интегратор с изменяемой емкостью в обратной связи и с возможностью подключения резистора в обратной связи, кроме того в каждом канале содержится 100 ячеек аналоговой памяти с возможностью чтения и записи с частотой до 10 МГц.

Чипы были изготовлены осенью 2015 г. и к концу года были измерены их основные характеристики. Линейность сигнала соблюдается до величины входного заряда $\sim 10^6$ электронов в чувствительном режиме и до 2.5×10^6 электронов

в грубом режиме. Учитывая, что величина шума составляет около 3000 электронов динамический диапазон в грубом режиме составляет около 1000. Показано, что полноформатный чип может успешно работать в режиме с циклом в 125 нс.

В результате испытаний прототипов кремниевых микрополосковых сенсоров были сформулированы требования к финальному варианту сенсора.

2. Эксплуатация канала вывода СИ из 7-полюсной змейки ВЭПП-4М, оптимизация пучка СИ

В течение 2016 года была начата регулярная эксплуатация канала №8 в бункере СИ ВЭПП-4М. В канал выводится излучение из 7-полюсной змейки с полем 1.3 Т в пяти центральных полюсах и 1 Т в крайних полюсах. Расчетный спектр излучения с учетом всех поглотителей на пути излучения представлен на рис.1 [1].

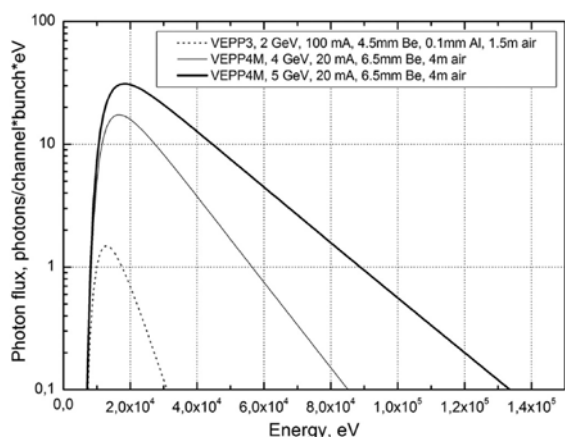


Рисунок 1. Сравнение спектров СИ на станции «Экстремальные состояния вещества» на ВЭПП-3 и на станции «Детонация-2» на ВЭПП-4М при двух значениях энергии электронного пучка в накопителе [1].

Внешний вид канала показан на рис.2. Канал состоит из вакуумной трубы длиной 35 м, в конце которой расположены блок коллиматора, взрывная камера и блок детектора.

В блоке коллиматора находится коллиматор Кратки, позволяющий прецизионно задавать вертикальный размер пучка, а также быстрый затвор, открывающий пучок на короткое время (~100 мкс) во время эксперимента. Быстрый затвор необходим для ограничения времени облучения образца и детектора. Взрывная камера позволяет взрывать образцы до 0.5 кг в тротиловом эквиваленте и пропускать пучок СИ

при минимальном поглощении. Для этого в камере устроена система диафрагм, гасящая ударную волну. В камеру вводится сигнал на детонатор и выводится сигнал от датчика, сигнализирующего о прохождении фронта детонации. Блок детектора располагается в помещении с радиационной защитой от излучения, рассеянного от детектора и его корпуса. В блоке располагается система перемещения, позволяющая прецизионно передвигать детектор по вертикали, горизонтали по углу в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На системе перемещения может быть закреплен детектор DIMEX, а также разрабатываемые прототипы DIMEX-G и DIMEX-Si различных модификаций.



Рисунок 2. Внешний вид канала СИ №8 в бункере ВЭПП-4М.

Все перечисленные элементы были смонтированы и введены в эксплуатацию в течение 2015-2016 гг [2].

3. Эксплуатация станции «Экстремальное состояние вещества» на ВЭПП-3 с детектором DIMEX

В течение 2016 года на станции «Экстремальные состояния вещества» на ВЭПП-3 проводились различные эксперименты по изучению быстротекущих процессов с детектором DIMEX, а также, запущенном в 2015 году прототипом нового детектора DIMEX-G. Прототип позволил работать с временем экспозиции кадра 125 нс, в отличие от детектора предыдущего поколения, который позволяет работать с минимальным временем экспозиции 500 нс. С помощью этих детекторов проводились эксперименты по изучению ударных воздействий на металлы (пыление), изучению прохождения ударной волны через различные материалы, а также по детонации зарядов сверхмалого диаметра [3,4].

4. Сборка и испытания прототипа кремниевго детектора DIMEX с многоканальной электроникой

В течение 2016 года продолжались работы по изучению характеристик прототипов кремниевых микрополосковых сенсоров для кремниевой версии детектора DIMEX. В частности, изучалась реакция сенсора на облучение СИ максимальной возможной интенсивности на накопителе ВЭПП-4М. Результаты таких измерений показаны на рис.3 [5].

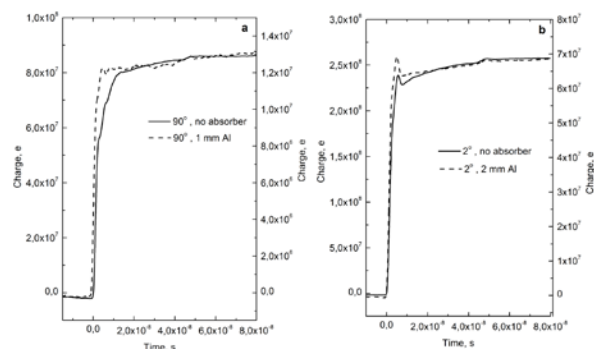


Рисунок 3. Заряд, собранный с одной полоски на нагрузке 50 Ом: а) сенсор перпендикулярно пучку, пучок полностью открыт (сплошная кривая, левая шкала), пучок ослаблен поглотителем 1 мм алюминия (пунктирная кривая, правая шкала); б) сенсор под углом 2 градуса по отношению к пучку, открытый пучок (сплошная кривая, левая шкала), ослабленный пучок (пунктирная кривая, правая шкала).

На рисунке видно, что кроме быстрого процесса сбора носителей, который занимает менее 5 нс, при интенсивном облучении возникают две медленных компоненты, - около 10 нс и около 50 нс, которые, очевидно, связаны с накоплением объемного или поверхностного заряда в сенсоре, искажающего внешнее электрическое поле. Эти эффекты требуют дополнительного изучения, однако, уже сейчас понятно, что точно измерить сигнал за время менее 50 нс будет затруднительно. По-видимому, гарантировать точность около 10^{-3} , которая закладывалась в технических требованиях, можно будет при времени измерения не менее 50 нс. Эти предположения нужно будет проверить на прототипе детектора на 120 каналов, который в настоящее время монтируется на основе прототипов чипов для кремниевого детектора DMXS112A, разработанных в ИЯФ СО РАН. Все компоненты для этого прототипа, включая платы электроники, электронные компоненты и корпус, были изготовлены и закуплены в 2016 г., однако из-за больших сроков поставки ряда

деталей монтаж электроники не удалось завершить в 2016 г и прототип будет запущен в первой половине 2017 г.

5. Ввод в эксплуатацию газового детектора DIMEX с новой электроникой с улучшенными характеристиками

В 2016 году был смонтирован полноформатный газовый детектор на основе нового чипа DMXG64, разработанного в ИЯФ СО РАН. В течение года изучались характеристики нового чипа и детектора на его основе [5]. В частности, была проведена электронная калибровка и измерен динамический диапазон чипа в двух режимах. Результат этих измерений показан на рис.4. Видно, что канал чипа работает линейно до сигнала в 1000000 электронов в чувствительном режиме и до сигнала в ~ 2300000 электронов в режиме с дополнительной подключенной емкостью. В технических требованиях на чип закладывался максимальный сигнал в 2000000 электронов. Другие характеристики чипа, такие как шум и зависимость сигнала от момента появления заряда на входе (временное разрешение) ведут себя таким же образом, как и в чипе-прототипе DMXG12B [6]. При проведении экспериментов с новым детектором на пучке СИ была обнаружена проблема, возникающая при инъекции большого заряда на входы чипа. Оказалось, что в этой ситуации возникает сигнал во всех каналах чипа, даже в тех, на которые не поступал сигнал из детектора. В течение года эта проблема исследовалась, и в настоящее время разрабатывается математический алгоритм коррекции этого эффекта.

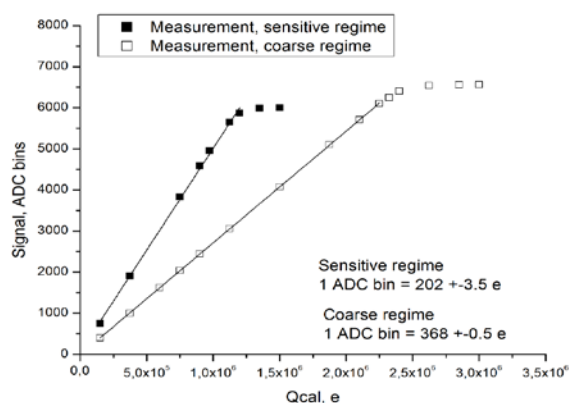


Рисунок 4. Зависимость выходного сигнала от заряда, инжектированного на вход чипа. Измерение проведено в двух режимах: с дополнительной подключенной емкостью (пустые квадраты), без дополнительной емкости (черные квадраты).

6. Изучение параметров пучка СИ ВЭПП-4М в канале станции «Детонация-2» и оптимизация его характеристик

В течение 2016 года было продолжено изучение пучка СИ на канале №8 и его оптимизация. В частности, при помощи прототипа кремниевого детектора DIMEX-Si изучался профиль пучка по вертикали и абсолютный поток мощности в пучке. С помощью этих измерений была проведена оценка углового разброса электронов в пучке в накопителе, а также был обнаружен эффект изменяющегося ослабления пучка СИ в канале. На рис.5 показано сравнение расчетного и измеренного профилей пучка. Измеренный профиль шире, чем расчетный, поскольку при расчете не принимался во внимание угловой разброс электронов в пучке накопителя. По разнице ширин профилей можно сделать оценку углового разброса 82 ± 10 мкрадиан.

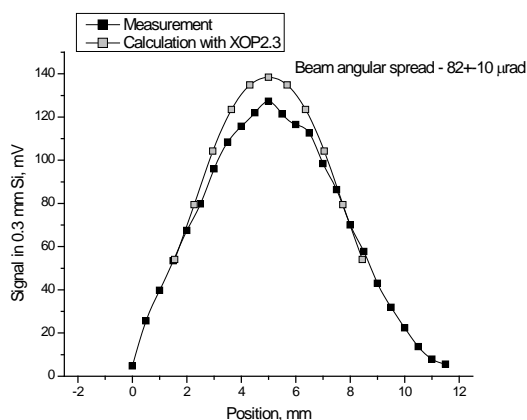


Рисунок 5. Сравнение измеренного и расчетного профилей пучка СИ (по вертикали). Различие профилей дает возможность сделать оценку углового разброса электронов в пучке в накопителе.

На рис.6 показано сравнение нескольких измерений профилей пучка СИ по вертикали, сделанных за период с апреля 2015 года по декабрь 2016 года. Видно, что форма профиля не меняется, тогда как абсолютное значение потока мощности в максимуме сильно меняется. В настоящее время этот эффект изучается и наиболее вероятная причина – это плохая откатка в каком-либо элементе канала.

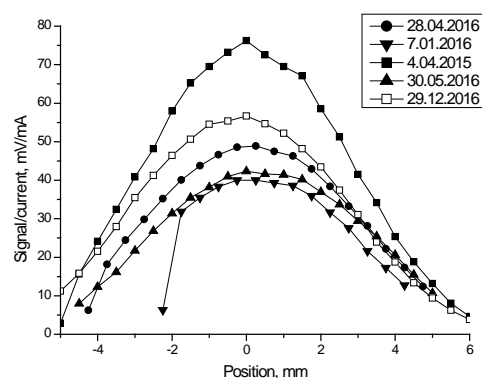


Рисунок 6. Сравнение профилей пучка по вертикали, измеренных в течение 2015-2016 гг. Вертикальная шкала показана в единицах сигнала с кремниевого детектора на нагрузке 50 Ом, нормированного на ток в накопителе.

7. Разработка методов исследования реальных промышленных и специализированных изделий во время детонации (диаметром до 50 мм) методом малоуглового рассеяния

В течение 2016 года была закончена компоновка станции «Детонация-2» на канале СИ №8 ВЭПП-4М и началась ее регулярная эксплуатация. На станции проводились эксперименты по наблюдению дифракции из монокристаллов различных материалов при импульсном воздействии на них мощным лучом лазера [7], а также изучалось малоугловое рассеяние при взрывах зарядов большого диаметра с помощью детектора DIMEX. В частности, изучались масштабные эффекты при взрывах зарядов различного диаметра, а также эффекты ударного воздействия на металлы [8,9,10].

Заключение

При вводе в эксплуатацию детектора DIMEX-G с новой электроникой возникли проблемы технического характера с новым чипом, которые будут решаться в течение 2017 г.

Список использованных источников

- [1] Development of the microstrip silicon detector for imaging of fast processes at a synchrotron radiation beam, V. Aulchenko, E. Prueel, L. Shekhtman, K. Ten, B. Tolochko, V. Zhulanov, Nucl.Instr. and Meth. A, in press, corrected proofs, available online,

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.096>.
- [2] The experimental station "DETONATION" at beamline 8 from 7 pole 1.3 T wiggler installed at e+e- collider VEPP-4, TOLOCHKO, Boris; EVDOKOV, Oleg; TEN, Konstantin; KOSOV, Aleksandr; ZOLOTAREV, Konstantin; и др. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016). Book of abstracts. 2016. P. 84.
- [3] Detection of the emission of the particles from a free surface of metals loaded by strong shock wave using the Synchrotron Radiation methods, Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O., Rubtsov I.A., Shechtman L.I., и др., Fifth International Symposium on Explosion, Shock Wave and High-strain-rate Phenomena (ESHP 2016). Conference Proceedings. P. 58-59
- [4] Detection of microparticles in dynamic processes, K A Ten, E R Prueel, A O Kashkarov, I A Rubtsov, L I Shekhtman, V V Zhulanov, B P Tolochko, G N Rykovanov, A K Muzyrya, E B Smirnov, M Yu Stolbikov and K M Prosvirnin. XXXI International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS2016) IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 774 (2016) 012070 doi:10.1088/1742-6596/774/1/012070.
- [5] Upgrade of the detector for imaging of explosions. L.I.Shekhtman, V.M.Aulchenko, V.N.Kudryavtsev, V.D.Kutovenko, V.M.Titov, и др, Proceedings of the International Conference "Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application", SFR-2016, 4-8 July 2016, Novosibirsk, Russia, Physics Procedia 84 (2016) 189 – 196.
- [6] Development of the specialized integrated circuit for signal readout from micro-strip structures of a coordinate detectors, V. Aulchenko, L. Shekhtman and V. Zhulanov, 2015 JINST 10 P09013.
- [7] The nanosecond time resolved X-ray diffraction with synchrotron radiation for exploration of fast processes in solids. TOLOCHKO, Boris; ARAKCHEEV, Aleksey; ZHULANOV, и др. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016). Book of abstracts. 2016. P. 81.
- [8] Dynamics of nanoparticles sizes during trinitrotoluene detonation, RUBTSOV, Ivan; TEN, Konstantin; PRUUEL, Edward; KASHKAROV, Alexey; TOLOCHKO, Boris; ZHULANOV, Vladimir; SHEKHTMAN, Lev. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016). Book of abstracts. 2016. P. 31.
- [9] Динамика размеров наночастиц при детонации тринитротолуола, Рубцов И.А., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Толочко Б.П., Жуланов В.В., Шехтман Л.И., Теплофизика и физическая гидродинамика. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых. 19-25 сентября 2016 г. Стр. 106.
- [10] Экспериментальное исследование выброса частиц из ударно-нагруженных металлов, Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Рубцов И.А., Шехтман Л.И., и др. Теплофизика и физическая гидродинамика. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых. 19-25 сентября 2016 г. Стр. 117.

№ 15.7.3 Развитие методов нанодиагностики на базе Новосибирского ЛСЭ

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов диагностики вещества в микро- и нанометровом диапазонах с использованием излучения терагерцового диапазона частот на Новосибирском лазере на свободных электронах, а также результаты некоторых экспериментальных исследований 2016 года, в которых использованы развитые методы.

1. Результаты работ по проекту, полученные на предыдущих этапах

В процессе работ на предыдущих этапах выполнения проекта были подготовлены и испытаны на экспериментальном стенде системы измерений длины пробега поверхностных плазмонов вдоль плоских и изогнутых поверхностей.

Захват поверхностной волны осуществлялся методом дифракции сфокусированного излучения на краю $\frac{1}{4}$ -цилиндра. Источником излучения служил Новосибирский лазер на свободных электронах. Регистрация ПП проводилась с помощью измерения интенсивности дифрагированного поля ПП на ребре 45-градусного зеркала, примыкающего к поверхности образца. Детектором являлась опто-акустическая ячейка Голя с узкой входной щелью, сопряжённая с собирающей линзой ТРХ или матричный микролометрический приемник.

Измеренная длина пробега ПП на плоской поверхности, напыленной непрозрачным слоем золота, составила около 10 см, что на три порядка меньше, чем предсказывается теорией Друде. При нанесении очень тонких (порядка $1/500$ длины волны) слоев диэлектрика ZnS длина распространения ПЭВ в зависимости от толщины слоя сначала увеличивается, достигает максимума при определенной толщине.

С помощью 45-градусного зеркала радиационные потери были напрямую измерены и найдена их диаграмма направленности. Было также обнаружено, что длина пробега, диаграмма направленности и оптимальная толщина зависят от шероховатости и структуры поверхности напыленного металла. Данные свойства поверхностных плазмонов в терагерцовом диапазоне можно использовать для исследования и характеристики поверхностей и диэлектрических слоев толщиной до нескольких десятков

нанометров.

Был разработан проект создания плазмонного сенсора для диагностики диэлектрических веществ, в том числе биологических объектов, с использованием "spoof"-плазмонов, распространяющихся по металлическим структурированным поверхностям.

Была написана программа расчета оптимальных параметров и такие параметры были найдены для ряда модельных случаев. Было также обнаружено, что при некоторых параметрах структуры показатель преломления для поверхностной "spoof"-волны становился отрицательным.

Для исследования возможности переноса информации с одной поверхности на другую мы провели эксперименты, в которых два образца отделялись друг от друга воздушным зазором. Экспериментально показано, что свободная волна, образующаяся при дифракции плазмона на краю образца, может быть вновь трансформирована в плазмон на другом образце, находящемся на расстоянии до 100 мм от первого.

Был подготовлен и испытан на экспериментальном стенде синхронный детектор с электронной схемой накопления импульсов, предназначенный для регистрации интенсивности импульсного терагерцового излучения ЛСЭ. Также был создан и испытан на экспериментальном стенде терагерцовый поляриметр с блоком нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Для исследования киральности биологически важных молекул в водных растворах и порошках был создан поляриметр по схеме интерферометра Майкельсона с модулем НПВО с использованием в качестве источника монохроматического терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах. Измерения проводились для определенной длины волны, а для получения спектральной зависимости они повторялись при нескольких длинах волн. В ходе проведения тестовых испытаний было обнаружено влияние обратного отражения от оптических поляризаторов.

2. Модернизация рабочей станции СПИН на лазере на свободных электронах. Монтаж азотного криостата для расширения экспериментальных возможностей станции, в том числе для исследования в терагерцовом диапазоне оптических свойств тонких пленок и полупроводниковых наноструктур

Рабочая станция СПИН на Новосибирском лазере на свободных электронах (НЛСЭ)

является многофункциональной станцией, на которой многими исследовательскими группами из разных организаций выполняется большое количество проектов, многие из которых направлены на исследование с помощью терагерцового излучения микро- и наноразмерных объектов. Для обеспечения экспериментальных исследований на станции необходимо выполнить несколько условий. Во-первых, пользователям необходимо обеспечить излучением, геометрические и оптические характеристики которого соответствуют требованиям выполняемой работы. Как правило, это – заданная длина волны, конфигурация пучка и поляризация пучка. Во-вторых, на станции должен быть диагностический комплекс, позволяющий измерить все необходимые параметры и записать их на электронные носители. В-третьих, многие работы требуют исследований образцов, охлажденных до низких температур. Для решения этих задач в течение 2016 года была проведена модернизация рабочей станции.

3. Разработка комплексной системы детектирования излучения, объединяющей пирозлектрические, оптоакустические, микроболометрические, интерферометрические детекторы и криогенные детекторы на горячих электронах, с возможностью измерения абсолютных значений мощности терагерцового излучения

Благодаря использованию разработанных совместно с Самарским университетом бинарных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) из высокоомного кремния, на станции была обеспечена возможность формирования пучков разных конфигураций, от пучков с орбитальным угловым моментом до пучков, фокусируемых в заданные объемы. В частности в работе [1] гауссов пучок НЛСЭ с помощью ДОЭ, фазовая структура которого видна на рис. 1(а), получен пучок, сфокусированный в параксиальный сегмент. Пучок имеет гауссово сечение диаметром 0.7 – 0.9 мм на длине не менее 50 мм. Если учесть, что в прошлом году мы сформировали закрученные "бездифракционные" бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, то можно констатировать, что к настоящему времени на станции СПИН имеется инструментарий для исследований, в которых требуются пучки малого диаметра с разным распределением интенсивности, сохраняющие свое сечение на большой длине.

Имеющиеся на станции средства диагностики, включают следующую аппаратуру:

- Одноканальные детекторы излучения (пирозлектрические детекторы и оптоакустические детекторы Голея с обтюраторами, криогенный детектор на горячих электронах);
- Синхронные усилители;
- Изображающий микроболометрический приемник;
- Линейные актуаторы с шаговыми двигателями с длиной перемещения 20, 30 и 74 см
- Скоростные осциллографы с частотой 0.5 и 16 ГГц.

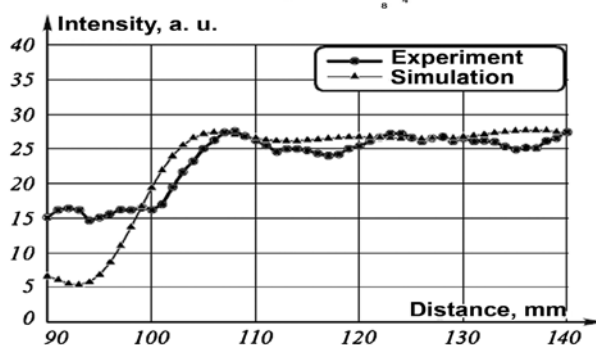
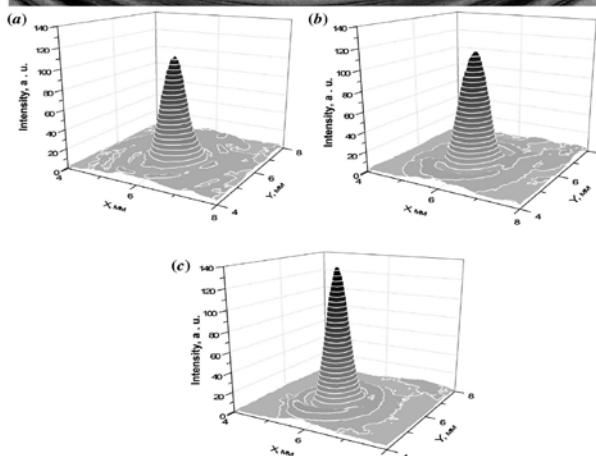
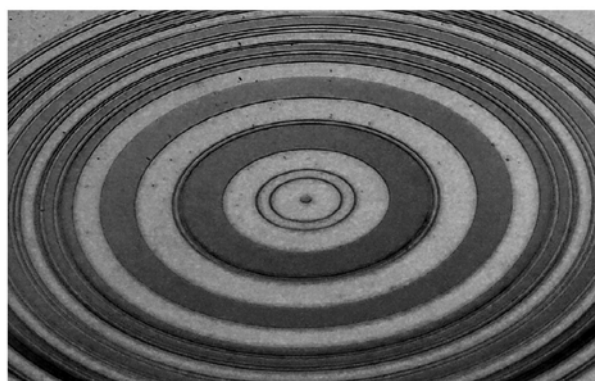


Рисунок 1. Фокусировка пучка лазера на свободных электронах в соосный отрезок с гауссовым сечением. (а) Кремниевый бинарный дифракционный оптический элемент; (б) Распределение интенсивности в пучке на расстояниях 120 130 и 140 мм от ДОЭ; (с) Интенсивность на оси пучка как функция расстояния от ДОЭ.

К ним добавился теперь абсолютный болометрический измеритель мощности терагерцового излучения Ophyr 3A-P-THz. Все эти приборы были объединены в общую измерительную систему, позволяющую компоновать эти измерительные средства в различных сочетаниях, для чего был (при активном участии пользователей из Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород) создан аппаратный комплекс с управляющей им программой, позволяющий с помощью актуаторов перемещать оптические элементы и детекторы с синхронной записью сигналов с различных устройств. Например, при измерениях сигналов в двухканальных измерительных системах с помощью ячеек Голея сигналы подавались на синхронные усилители SR-830, а затем оцифрованные сигналы выводились с синхронных усилителей через Ethernet кабель на COM-порт компьютера через USB-разъем. Для управления актуаторами USB-кабель от контроллера Standa соединялся с USB-разъемом компьютера. Прием сигналов с синхронных усилителей и управление актуаторами осуществлялись специальной программой, написанной на C++.

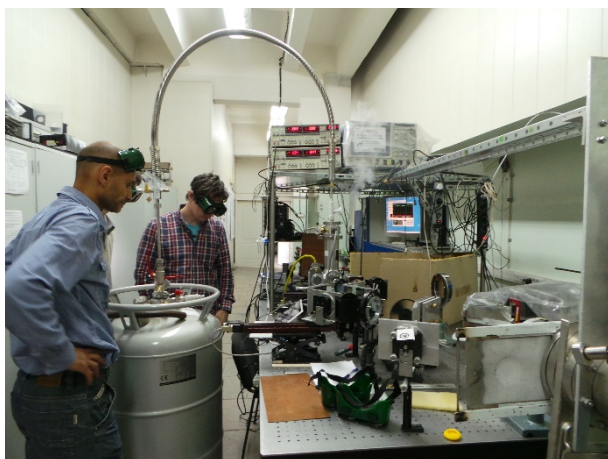


Рисунок 2. Аппаратно-программный комплекс для экспериментов на установке СПИН: ведутся эксперименты с охлаждением образцов до температуры жидкого гелия.

Внешний вид установки при выполнении двухканальных измерений с оптической задержкой одного из сигналов с использованием аппаратно-программного комплекса показан на рис. 2. Программа позволяет устанавливать шаг по времени (в данном случае это перемещение актуатора на заданное расстояние с точностью 2.5 мкм), после которого сигналы с синхронных детекторов принимаются и записываются. Данное время не должно быть меньше постоянной времени, предустановленной на синхронных усилителях, которое в данных экспериментах

составляло 300 мс. Программа задает также длительность остановки актуатора, в течение которой детектор копит сигнал, затем измерение прекращается, и актуатор делает следующий шаг. В процессе измерения сигналов с детекторов Голея, например, в каждой точке записываются сигналы X, Y и R синхронных детекторов. После завершения сканирования, измеренные данные записываются в текстовый файл.

Установка дополнилась в прошедшем году проточным криостатом, позволяющим поддерживать находящийся в вакуумной камере образец при температуре от комнатной до 4 К. Работающий криостат можно видеть на рис. 2.

4. Исследования влияния шероховатости поверхностей метал-диэлектрик-воздух на характеристики поверхностных плазмонов и детальное исследование их длины распространения

Одним из способов исследования поверхностей и тонких пленок вплоть до нанометровых толщин является использование поверхностных плазмон-поляритонов. Нами несколько лет назад было показано, что использование в этих целях ППП терагерцового диапазона имеет ряд преимуществ по сравнению в ППП видимого диапазона. Прежде всего, длины пробега ППП видимого диапазона составляют несколько десятков микрометров, то есть измерения возможны только для очень малых образцов. В терагерцовом диапазоне, длина пробега составляет сантиметры или десятки сантиметров, то есть можно исследовать образцы макроскопических размеров, но при этом терагерцовые ППП "чувствуют" очень тонкие слои диэлектрика (до 100 нм!) на металлической поверхности, то есть их можно использовать для спектроскопии пленок нанометровых толщин. Особенно интересна спектроскопия полимерных, органических и биологических объектов, имеющих линии поглощения в ТГц диапазоне, соответствующие вращательным и колебательным степеням свободы.

ППП мы получаем с помощью дифракции излучения НЛСЭ на краю образца. Излучение источника преобразуется в эванесцентную p -поляризованную волну, направляемую поверхностью проводника (металла) с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Прямое копирование методик ППП-спектроскопии, используемых в видимом и ИК диапазонах, при терагерцовых частотах оказывается невозможным в силу ряда особенностей терагерцовых

ППП: а) их длина распространения достигает тысяч длин волн (λ); б) глубина проникновения поля в окружающую среду (воздух) – сотен λ ; в) показатель преломления превышает единицу (на границе «металл-воздух») всего на 10^{-3} – 10^{-4} (см. рис. 3), г) наблюдается большой вклад радиационных потерь в затухание ППП; д) ТГц ППП способны преодолевать сантиметровые зазоры между направляющими их поверхностями.

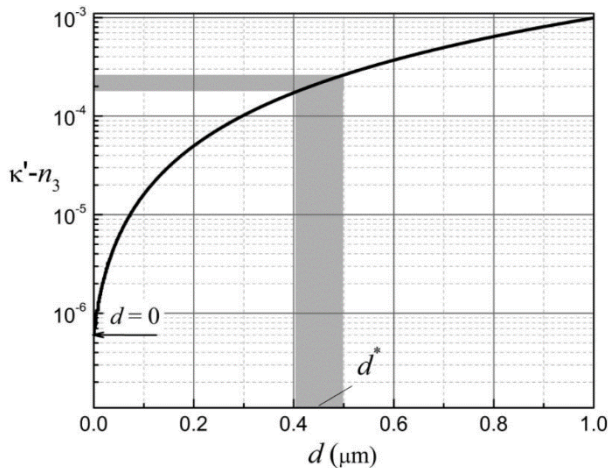


Рисунок 3. Разность между действительной частью показателя преломления поверхностного плазмона, распространяющегося по поверхности золото-ZnS-воздух при длине волны 130 мкм, и показателем преломления воздуха как функция толщины слоя ZnS.

Основным препятствием, затрудняющим применение ТГц ППП, генерированных непрерывным лазерным излучением, оказались мощные засветки фотоприёмника паразитными объёмными волнами (ОВ), порождаемыми в процессе дифракции излучения источника на элементе преобразования, самих ППП на изгибах поверхности, а также при рассеянии ППП на её неоднородностях (шероховатостях и инородных включениях).

Дифракционные засветки являются причиной и низкой эффективности применения метода импульсной терагерцовой спектроскопии (time-domain spectroscopy - TDS) для исследования ТГц ППП. Небольшое различие фазовых скоростей гармонических составляющих широкополосных ППП, а также паразитные ОВ от элемента преобразования и с трека ППП приводят к низкому разрешению таких измерений, что существенно затрудняет количественную оценку характеристик ППП и их дисперсии.

Наиболее значимые результаты, полученные нами [2, 3], состоят в изучении природы ТГц ППП и их особенностей с использованием НЛСЭ. В частности, нами адаптирован к ТГц

частотам способ преобразования излучения источника в ППП на прямоугольном ребре образца (the end-fire coupling method), предложен эффективно отсекающий паразитные ОВ цилиндрический элемент преобразования, измерено распределение поля над треком ППП и его зависимость от толщины диэлектрического покрытия, изучено явление дифракции ТГц ППП на прямоугольном ребре образца, обнаружена способность ТГц ППП преодолевать сантиметровые зазоры между направляющими их подложками, установлено наличие мощных радиационных потерь ТГц ППП, обуславливающих затухание ППП, на много превышающее рассчитанное с применением модели Друде.

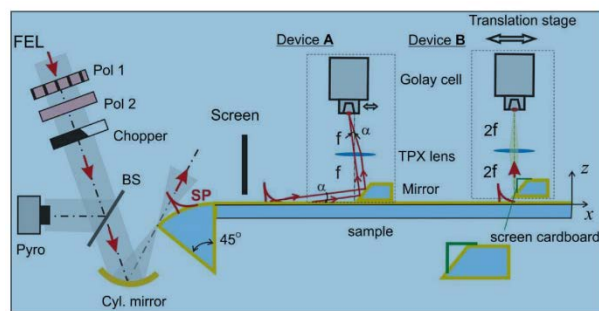


Рисунок 4. Экспериментальная установка для исследования радиационных потерь поверхностных плазмонов, распространяющихся вдоль поверхности золото-сульфат цинка-воздух.

Основные результаты, описывающие радиационные потери ППП, опубликованы в [3]. Экспериментальная установка, использованная для исследования радиационных потерь плазмонов, показана на рис. 4. Для преобразования объёмного излучения в ППП, вместо плоского волновода, использовавшегося в предыдущих исследованиях, мы использовали дифракцию на границе образца как более простой, эффективный и надёжный метод. В отличие от классической реализации метода с прямоугольным краем образца, мы использовали одну восьмую часть стеклянного цилиндра (см. рис. 4), полированного с оптическим качеством, криволинейная поверхность которого покрыта золотом толщиной 1 мкм, в качестве соединительного элемента. Его цилиндрическая форма обеспечивает эффективное экранирование, защищая фотодетектор от дифрагированных объёмных волн. Радиус цилиндра, $R = 60$ мм, уменьшает радиационные потери до приемлемого уровня и обеспечивает выход сгенерированного на краю плазмона на плоскую часть образца. Объёмные волны, которые могли появиться при переходе

ППП через стык цилиндр-плоскость, экранировались непрозрачным экраном.

Поверхностный плазмон и радиационные потери, показанные красными стрелками, отражались 45-градусным зеркалом под углом, близким к 90 градусам и регистрировались одним из показанных над образцом детектирующих устройств. Детектором в обоих устройствах служил детектор Голя с узкой входной щелью, перпендикулярной к плоскости рисунка. Устройство А, с оптической схемой, обеспечивающей фурье-преобразование волнового фронта, отраженного зеркалом, (схема f - f), позволяло зарегистрировать угловое распределение излучения, но не давало информации о положении источников этого излучения. Вторая схема В была изображающей (схема $2f$ - $2f$). Она регистрировала положение источников излучения, не определяла их угловое распределение. 45-градусное зеркало вместе с линзой и детектором перемещалась шаг за шагом по образцу вдоль оси x , причем в устройстве А в каждой точке выполнялось сканирование детектора в плоскости регистрации, что и позволяло записать угловое распределение интенсивности излучения.

Основные результаты исследований представлены на рис. 5. Было показано экспериментально, что радиационные потери играют важную роль в распространении СП вдоль реальных металлических поверхностей в терагерцовом диапазоне частот. Длина распространения ППП, рассчитанная по теории Друде, хорошо согласуется с экспериментами в видимом и ближнем ИК диапазонах, но резко расходится с экспериментами в области ТГц. Для того, чтобы выявить причину, были изучены ППП созданные с использованием НЛСЭ при длине волны 130 мкм на структурах Au-ZnS-воздух при толщине сульфида цинка от 0 до 0.025λ (~ 3000 нм). Были исследованы два набора образцов различным качеством поверхности. Измеренная длина затухания (глубина проникновения поля в воздух SP) со всеми образцами совпала с предсказаниями теории Друде, что подтверждает справедливость теории в ТГц диапазоне. Используя изображающую оптическую систему и фурье-преобразующую систему, мы записали угловые распределения связанных и несвязанных (радиационные потери) волн, распространяющихся вдоль поверхности. Было установлено, что радиационные потери, обусловленные преобразованием ППП в объемные волны на поверхностных дефектах, могут значительно превышать релаксационные потери внутри металла, особенно для поверхности без непокрытия. Они, очевидно, и ответственны за

сокращение длины распространения терагерцовых ППП. Мы обнаружили, что с ростом толщины ZnS длина распространения сначала увеличивается, достигает максимального значения при толщине $(0,003-0,004)\lambda$, а затем монотонно уменьшается. Обнаруженный эффект доказывает полезность покрытия направляющей поверхности тонким слоем диэлектрика, так как это увеличивает длину распространения ТГц ППП, концентрирует поле ППП в непосредственной близости от поверхности и защищает его от внешних воздействий, что имеет большое значение для использования ППП в плазмонных передающих линиях.

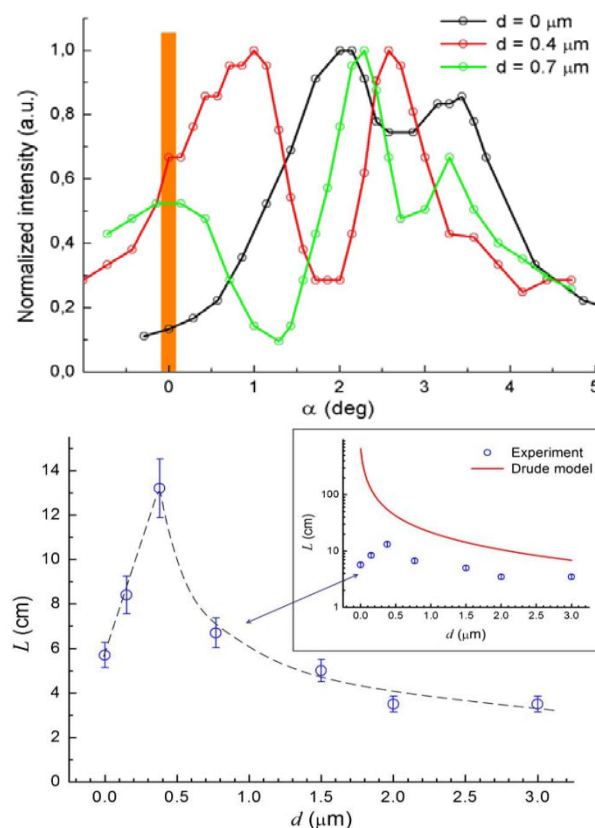


Рисунок 5. (а) угловые распределения, записанные для золота с ZnS слоем различной толщины d с помощью 45° зеркала (см схему А на рис. 4); (б) длина распространения ППП (L) как функция от толщины слоя ZnS. Врезка: те же экспериментальные значения L (кружки) рядом с кривой, рассчитанной по теории Друде (сплошная линия).

5. Повышение точности эллипсометрических и поляризметрических измерений в терагерцовом диапазоне

В настоящее время область субмиллиметровых длин волн привлекает большое количество исследователей. Разработаны различные источники и приёмники терагерцового излучения. Данный

диапазон позволяет исследовать неоднородные среды – такие, как биологические субстанции, границы с шероховатостями и порами с масштабом в несколько микрон. Отдельный интерес представляет исследование метаматериалов и спектроскопия мелких уровней в твёрдых телах.

В экспериментах по измерению оптических констант материалов, оптической активности, а также в спектроскопии твёрдого тела необходимо иметь возможность менять поляризацию заданным образом. Целью данной работы является создание устройств для контролируемого изменения поляризации излучения терагерцового диапазона.

Ранее в нашей группе был создан эллипсометр терагерцового диапазона, способный измерять состояние поляризации в рассматриваемой области частот электромагнитного излучения [3.1]. Эллипсометр работает по фотометрической схеме в режиме пошагового вращения анализатора. Накопление сигнала в режиме синхронного детектирования совместно с использованием опорного канала позволяет сократить уровень до 2%, что позволяет реализовать точность измерений до $\delta\psi=0.03$ и $\delta(\cos(\Delta)) = 0.01$. В качестве источника терагерцового излучения при этом используется Новосибирский лазер на свободных электронах [3.2]. С использованием такого оборудования можно реализовать различные варианты оптических схем с поляризационными элементами и детально исследовать их свойства.

Нами предложено несколько схем поляризационных контроллеров. Первая – схема интерферометра Майкельсона с ортогональными поляризациями в плечах (рис. 1, а). Вторая – с использованием набора поляризаторов и призмой-компенсатором между ними (рис. 2, б). В интерферометре Майкельсона с ортогональной поляризацией в плечах изменение длины одного из плеч позволяет изменять поляризацию от правой циркулярной до левой циркулярной через линейную. На рис. 1, б. показаны результаты измерений фазового сдвига при движении зеркала в одном из плеч интерферометра. При этом ортогонально поляризованные компоненты в каждом из плеч складываются каждая в своей фазе. Видно, что в эксперименте не достигается строго линейная поляризация. Это связано с конечной шириной линии излучения ЛСЭ и сильной ахроматичностью фазосдвигающего устройства интерференционного типа. Ахроматичность обусловлена различным набегом фазы в плечах для отличающихся между собой длин волн. Длина когерентности составляет 3 см, что соответствует отношению ширины линии к длине волны ~ 103 мкм. Тем не менее, данный

метод управления поляризацией позволяет быстро и контролируемо менять состояния поляризации, что может быть полезно в приложениях со сканированием по фазе (таких как поляриметрия и системы pump-probe). К тому же, на базе данного устройства можно легко реализовать интерференционный эллипсометр [3.3] в терагерцовом диапазоне, который позволит визуализировать эллипс поляризации на экране осциллографа.

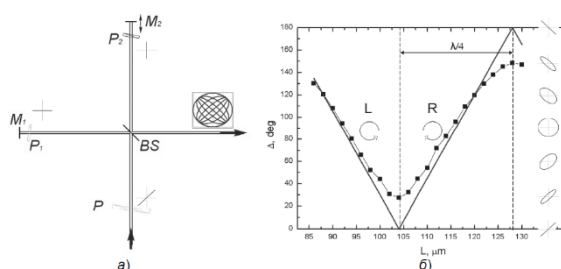


Рисунок 6. а) схема интерферометра Майкельсона с ортогональными поляризациями в плечах. Р-входной поляризатор, установленный под углом 45° к плоскости лучей; P1 и P2 – поляризаторы в плечах, имеющие ортогональные поляризации (в плоскости лучей и в перпендикулярном направлении); BS – делитель пучка в виде тонкой плёнки полипропилена; M1 – неподвижное зеркало, M2 – зеркало на линейной микроподвижке. Жирными стрелками указано направление входящего и выходящего пучков; б) результаты измерений поляризации на выходе устройства. По оси абсцисс отложено положение зеркала M2; сплошной линией показано расчётное поведение фазового угла Δ ; точки – результат измерений эллипсометром. Справа приведены соответствующие эллипсы поляризации, круговыми стрелками указано направление вращения вектора электрического поля L – левое вращение, R – правое, которые меняются при смещении зеркала M2 на четверть длины волны ($\lambda/4$).

Вторая схема поляризационного контроллера была создана с использованием фазосдвигающего устройства на основе призмы. В качестве материала призмы выбран высокоомный кремний – чистый, химически инертный материал с высоким показателем преломления ($n = 3.418$), что подтверждено нашими измерениями на эллипсометре [3.1]. На рис. 2, а. показано расчётное изменение фазового сдвига между р- и s- волнами на границе кремний-воздух при изменении угла падения. Видно, что критический угол (при котором происходит полное внутреннее отражение света) равен 17 градусам, ещё один важный угол – главный

угол, при котором фазовый сдвиг составляет 90 градусов, равен 42 градусам. Призма, выполненная в виде равнобедренного треугольника с углом при основании 45 градусов, может служить фазосдвигающим устройством с $\Delta=84.6^\circ$. Хотя расчётное значение фазового сдвига при такой геометрии отличается от 90° , прямоугольная призма более удобна при юстировке. Если требуется фазовый сдвиг 90° , нужно изготовить призму с углом у основания 42° .

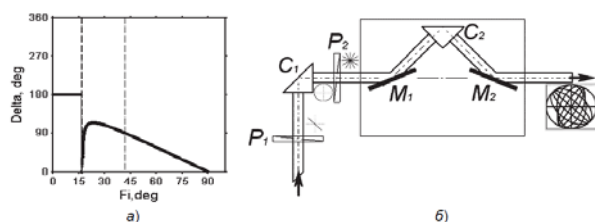


Рисунок 7. а) поведение фазового угла при изменении угла падения из кремния ($n=3.418$) в воздух ($n=1$); б) схема контроллера поляризации с кремниевыми призмами. P_1 -входной поляризатор, задающий поляризацию 45° относительно плоскости падения на рабочую грань кремниевой призмы C_1 , после которой поляризация становится круговой. P_2 – рабочий поляризатор; M_1, M_2 и C_2 – элементы узла компенсатора (два зеркала и кремниевая призма, соответственно). Узел компенсатора может вращаться относительно оси, совпадающей с осью пучка.

Нами были проведены измерения фазового сдвига при прохождении через призму в трёх вариантах: при падении излучения перпендикулярно короткой грани призмы, а также под углами ± 45 градусов относительно нормали к короткой грани. Результаты измерений во всех трёх случаях совпадают с расчётными, в которых учитываются коэффициенты Френеля для всех 3 граней. В случае использования призмы в качестве компенсатора, требования к настройке призмы довольно низкие в связи с сильным преломлением луча в кремнии, но требования к точности изготовления для достижения требуемых значений фазового сдвига достаточно строгие. Длина оптического пути в нашей призме с катетом 35 мм существенно больше длины когерентности (нужно учитывать показатель преломления кремния), что позволяет избавиться от многолучевой интерференции.

Призма-компенсатор имеет фиксированный фазовый сдвиг, но устройство из двух таких призм и набора поляризаторов позволяет задать произвольную требуемую поляризацию, изменяя азимуты элементов. На рис. 2, б. показано изменение поляризации вдоль хода пучка

терагерцового излучения. Поляризатор P_2 и узел компенсатора (C_2 совместно с зеркалами M_1 и M_2) могут занимать любое азимутальное положение. Комбинация азимутальных положений P_2 и узла компенсатора с призмой C_2 полностью определяет поляризацию на выходе устройства. Поляризация при этом может изменяться от линейной до циркулярно поляризованной с любой нужной ориентацией осей эллипса [3.4]. Так как дисперсия оптических констант кремния в терагерцовом диапазоне незначительна [3.5], то призма является ахроматическим компенсатором и может использоваться в диапазоне 0.1-10 ТГц.

Таким образом, в работе созданы и исследованы два различных устройства управления поляризацией. Проведён анализ факторов, влияющих на точность и стабильность их работы. Предложены способы использования данных устройств в различных измерительных схемах.

Список использованных источников

- [1] Азаров И.А., Швец В.А., Прокопьев В.Ю., Дулин С.А., Рыхлицкий С.В., Чопорова Ю.Ю., Князев Б.А., Кручинин В.Н., Кручинина М.В. Эллипсометр терагерцового диапазона. Приборы и техника эксперимента. 2015, № 3, с. 71–78.
- [2] Knyazev V.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. Meas. Sci. Technol., vol. 21, 054017, 13p. 2010.
- [3] Hasebroek H.F., Holscher A.A. Journ. Phys. E.: Sci. Instr., № 6, v. 822 (1973).
- [4] Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. - М.: Мир, 1981.
- [5] Adachi S. Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors. Numerical data and graphical information. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1999.

II.2II Комплексная программа СО РАН. Исследование особенностей формирования полупроводниковых и магнитных нанокompозитов с пространственно-упорядоченным расположением наночастиц, локализованных в калиброванных пористых матрицах, методами, использующими синхротронное излучение

Введение

В отчете представлены результаты выполненных экспериментальных работ по исследованию локальной структуры полупроводниковых и магнитных нанокompозитов методами синхротронного излучения, а также результаты моделирования локальной структуры исследованных систем. Полученные в 2016 году на экспериментальной станции ЦКП СЦСТИ новые данные и представленные в отчете результаты исследований локальной структуры показали перспективность использованного комплексного подхода для широкого ряда исследованных наносистем.

В течение 2016 года, проводилась систематическая работа над развитием комплексных методик тестирования магнитных и полупроводниковых нанокompозитов, на основе методов, использующих СИ, таких как XAFS-спектроскопия, рентгеновская дифракция. РФА СИ и др. Показана перспективность используемого подхода для совершенствования направленного синтеза (преимущественно методом термического испарения исходных соединений) магнитных и полупроводниковых нанокompозитов, полученных на основе пористых диэлектрических матриц (Al_2O_3), переходных металлов (Ni) и соединений изоэлектронного ряда германия ($ZnS(Se)$).

Всего за 2016 год, исследовано более 50 образцов, снято более 150 спектров и рентгенограмм, отработано более 40 смен на станциях ЦКП СЦСТИ.

1. Выполнение экспериментальных работ по исследованию локальной структуры полупроводниковых и магнитных нанокompозитов методами синхротронного излучения.

В течение 2016 года, проводилась систематическая работа над развитием комплексных

методик тестирования магнитных и полупроводниковых нанокompозитов, на основе методов, использующих СИ, таких как XAFS-спектроскопия, рентгеновская дифракция. РФА СИ и других опробированных ранее коллективом авторов в работах [1-6]

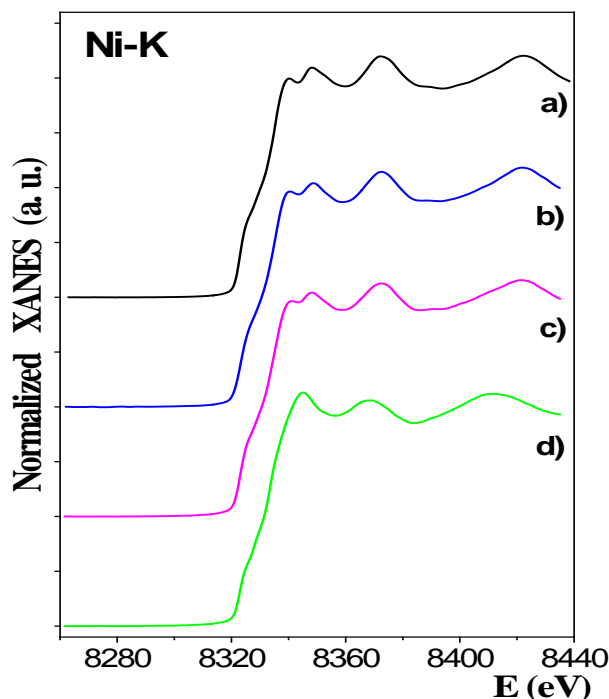


Рисунок 1.1 Экспериментальные спектры XANES, полученные при использовании многоэлементного детектора ППД для исследованных магнитных нанокompозитов $Ni_Al_2O_3$: а) никелевая фольга, б) образец 10, в) образец 12, г) образец 14.

Показана перспективность используемого подхода для совершенствования направленного синтеза (преимущественно методом термического испарения исходных соединений) магнитных и полупроводниковых нанокompозитов, полученных на основе пористых диэлектрических матриц (Al_2O_3), переходных металлов (Ni) и соединений изоэлектронного ряда германия ($ZnS(Se)$). На (рис. 1.1.) представлен пример экспериментальных данных полученных методом XAFS спектроскопии для магнитных нанокompозитов с различным диаметром пор 20-100 нм. При съемке была использована методика флуоресцентного выхода с использованием уникального 9-элементный Ge ППД детектора фирмы Canberra. Применение детектора и быстродействующей системы регистрации позволяет работать на предельных концентрациях с наноразмерными системами, нанесенными на "тяжелые" матрицы и открывает новые возможности для исследования локальной структуры.

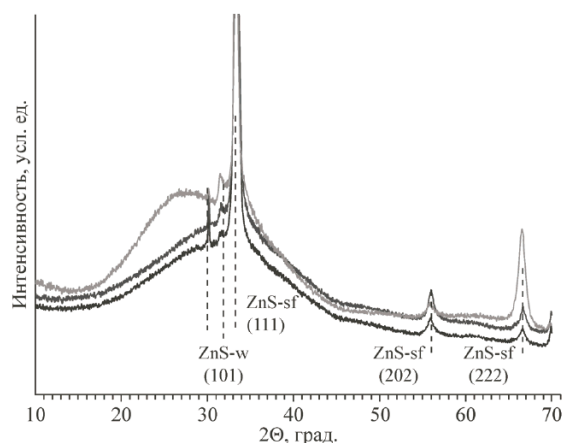


Рисунок 1.2 Экспериментальные данные – диффрактограммы РФА СИ, полученные для полупроводниковых наноконпозитов на основе сульфида цинка и пористых оксидных матриц.

На (рис. 1.2.) представлен пример экспериментальных данных, полученных методом РФА СИ для полупроводниковых наноконпозитов с на основе сульфида цинка и пористых оксидных матриц, при варьировании температур синтеза и доли модифицирующего элемента.

Всего за 2016 год, на установках ЦКП ЦСТИ выполнена серия измерений различными методами, исследовано более 50 образцов, снято более 150 спектров и рентгенограмм, отработано более 40 смен на станциях ЦКП ЦСТИ.

2. Создание модели пространственного размещения локализованных наночастиц

На основании полученных методами СИ экспериментальных данных для всех исследованных наноконпозитных систем рассчитаны структурные модели локализованных наночастиц, представленные в работах [7-11]. Также для всех исследованных наноконпозитных систем выполнено сравнительное исследование рентгеноспектральными и рентгенодифракционными методами EXAFS, XANES, рентгеновская дифракция, РФА СИ (как основными), а также РФЭС, АСМ, СЭМ, ПЭМ (как дополнительными).

Определены особенности формирования исследуемых магнитных и полупроводниковых наноконпозитов, полученных на основе пористых диэлектрических матриц (Al_2O_3), переходных металлов (Ni) и соединений изоэлектронного ряда германия ($ZnS(Se)$). На (рис. 2.1. и рис 2.2.) представлены примеры функций радиального распределения локального окружения для исследованных систем.

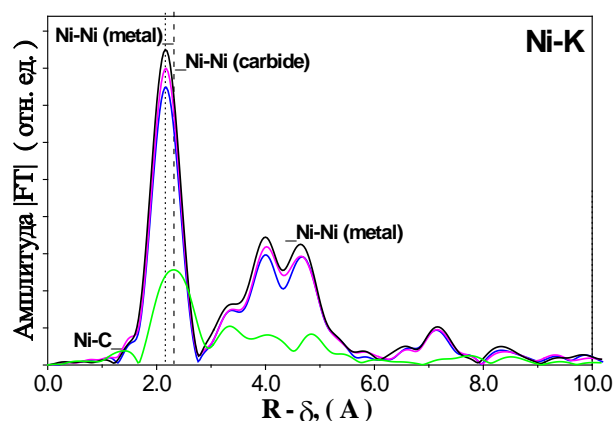


Рисунок 2.1 Функции РРА локального окружения, полученные для магнитных наноконпозитов на основе никеля и пористых оксидных матриц (20-100 нм)

Показано, наличие структурных искажений (вариации структурного и фазового состава, аморфно-кристаллического состояния) при изменении условий синтеза. Определены параметры кристаллической атомной структуры и локального окружения. Показано, что атомная локальная структура наночастиц (с размерами ~20-200нм), стабилизированных в матрице, отлична от таковой для сплошных пленок, локализованных на гладких подложках, поскольку различаются величины координационных чисел, причем, их значения более близки к кристаллографическим, для бинарных наносистем дополнительно показана нестехиометрия состава.

В ходе выполнения проекта получены новые фундаментальные научные сведения о строении, особенностях состояния, закономерностях формирования разнообразных наноконпозитов магнитных и полупроводниковых наноконпозитов, полученных на основе пористых диэлектрических матриц (Al_2O_3), переходных металлов (Ni) и соединений изоэлектронного ряда германия ($ZnS(Se)$), как с пространственно-упорядоченным расположением наночастиц в пористых диэлектрических матрицах, так и на гладких подложках различной природы.

Заключение

Получены новые сведения о закономерностях формирования пространственно-упорядоченных полупроводниковых и магнитных наноконпозитов различного состава, показаны корреляции между структурными свойствами, особенностями состояния, фазовыми параметрами и размерами пор и природой матрицы, используемого темплата. Накопленная информация позволит в дальнейшем проводить направленный синтез полупроводниковых и

магнитных нанокompозитов с оптимальными структурно-функциональными свойствами. Результаты проведенных исследований были представлены на российских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах.

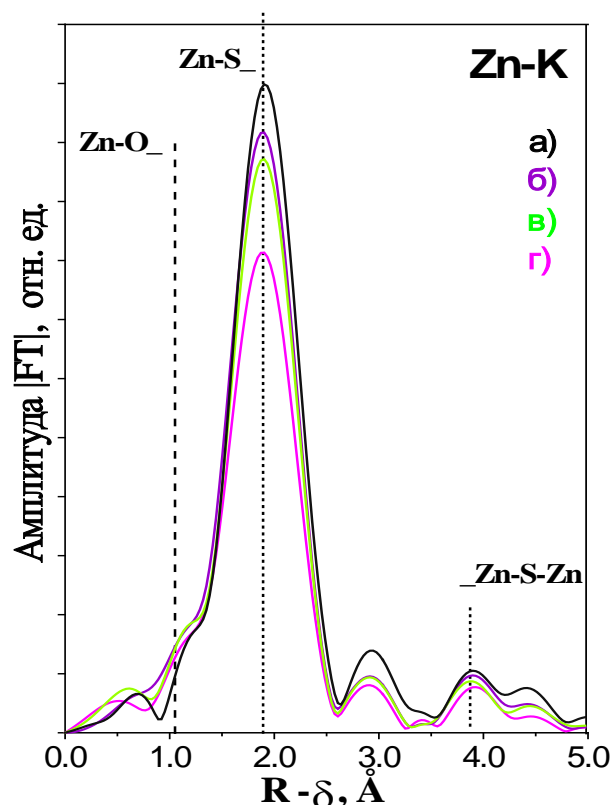


Рисунок 2.2 Функции РРА локального окружения, полученные для полупроводниковых нанокompозитов на основе сульфида цинка и пористых оксидных матриц (20-200 нм).

В 2017 году предполагается продолжение экспериментальных работ по исследованию локальной структуры полупроводниковых и магнитных нанокompозитов методами синхротронного излучения.

1) Предполагается, дальнейшее развитие новых комплексных методик тестирования, развиваемых на основе методов, использующих синхротронное излучение – XANES, EXAFS, РФА СИ и др., для оптимизации направленного синтеза полупроводниковых и магнитных нанокompозитов, локализованных на гладких подложках и в калиброванных каналах пористых диэлектрических матриц.

2) Планируется проведение регулярных комплексных исследований и накопление новых фундаментальных научных сведений об особенностях формирования нанокompозитов (их локальной структуры и состояния), содер-

жащих наночастицы ZnS(Se), Ni(Co), локализованные на гладких подложках и в калиброванных каналах пористых диэлектрических матриц, при варьировании условий приготовления, параметров синтеза, характеристик темплата.

В заключение представим дополнительную информацию о публикациях по результатам работ по теме Исследование особенностей формирования полупроводниковых и магнитных нанокompозитов с пространственно-упорядоченным расположением наночастиц, локализованных в калиброванных пористых матрицах, методами, использующими синхротронное излучение (№ 0305-2015-0018).

Список использованных источников

- [1] Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков, В.В. Кривенцов, Н.А. Мезенцев, В.М. Ветошкин. EXAFS- и РФЭС- исследование наноструктур германия и арсенида галлия в матрицах пористого оксида алюминия. "Известия Российской академии наук. Серия Физическая". 2015 Т.79(1), 2015, С.179-183).
- [2] Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков, В.В. Кривенцов, Н.А. Мезенцев, А.И. Чукавин. Локальное атомное строение и характер химических связей наноструктур сульфида и селенида цинка в матрицах пористого оксида алюминия. "Известия Российской академии наук. Серия Физическая". 2015, Т.79(1), 2015, С.184-188).
- [3] Р.Г. Валеев, В.В. Кривенцов, В.Ф. Кобзиев, Н.А. Мезенцев. Синтез и исследование структуры массивов наноструктур арсенида галлия. "Известия Российской академии наук. Серия Физическая". 2013, Т 77(9) 1323-1326.
- [4] Р.Г. Валеев, В.В. Кривенцов, Н.А. Мезенцев. EXAFS-исследование перспективного полупроводникового материала Ga₂Se₃. "Известия Российской академии наук. Серия Физическая". 2013, Т 77(9) 1320-1322.
- [5] Е.П. Якимчук, Р.Г. Валеев, В.В. Кривенцов, Н.А. Мезенцев. Структурное исследование перспективных полупроводниковых нанокompозитных материалов на диэлектрических матрицах различной природы. «XV Всероссийская молодежная научная конференция с элементами научной школы – «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение», Санкт-Петербург, 10-12 декабря 2014 г. Материалы конференции, С-32.

- [6] Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков, В.В. Кривенцов, Н.А. Мезенцев. Применение метода EXAFS-спектроскопии для определения локальной структуры полупроводниковых наночастиц, стабилизированных в диэлектрических матрицах. XX Национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения (СИ-2014), 7 - 10 июля 2014, Новосибирск, Материалы конференции. Стр. 106.
- [7] Beltukov A.N., Chukavin A.I., Valeev R.G., Trigub A.L., El'kin I.A., Kriventsov V.V., Mezentsev N.A. Structural study of light-emitting nanocomposites based on ZnS:Cu, obtained by explosive thermal evaporation method into porous matrix of anodic Al₂O₃. JSC, 2016, Vol. 57(7), P.1496 – 1500.
- [8] R.G. Valeev, V.V. Stashkova, A.I. Chukavin, V.A. Volkov, A.S. Alalykin, A.V. Syugaev, A.N. Beltiukov, F.Z. Gil'mutdinov, V.V. Kriventsov, N.A. Mezentsev. Ni nanostructures in porous anodic alumina matrices: structure and cathodic properties in hydrogen release reactions. Physics Procedia, 2016, 10.1016/j.phpro.2016.11.069.
- [9] A.I. Chukavin, R.G. Valeev, A.N. Beltiukov, Y.V. Zubavichus, A.L. Trigub, V.V. Kriventsov, N.A. Mezentsev. Structure and properties of ZnS_xSe_{1-x} alloy nanostructures embedded in anodic alumina membrane. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016), 04-07 July 2016, Novosibirsk, Book of Abstracts. P.40-41.
- [10] R.G. Valeev, A.N. Beltiukov, A.I. Chukavin, A.L. Trigub, V.V. Kriventsov, N.A. Mezentsev. EXAFS, XANES and XRD investigations of doped ZnS nanostructures. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016), 04-07 July 2016, Novosibirsk, Book of Abstracts. P.76-77.
- [11] R.G. Valeev, V.V. Stashkova, A.I. Chukavin, V.V. Kriventsov, N.A. Mezentsev. Structural investigations of Ni deposited on porous anodic alumina matrices. Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2016), 04-07 July 2016, Novosibirsk, Book of Abstracts. P.77-78.

II.2П Комплексная программа СО РАН. Лазерно-плазменное ускорение заряженных частиц до ультрарелятивистских энергий

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов кильватерного лазерно-плазменного ускорения коротких пучков заряженных частиц до ультрарелятивистских энергий. В 2016 году проедены теоретические исследования по разработке предложенных методов в применении к коротким сгусткам, а также экспериментально изучены возможности получения таких сгустков на в экспериментах на накопителе-охладителе Инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН.

1. Разработка методов лазерно-плазменного ускорения заряженных частиц до ультрарелятивистских энергий.

Основной целью данного этапа работы являлась оптимизация параметров лазер-плазменного взаимодействия с целью получения сгустка ускоренных электронов, пригодного для последующей генерации когерентного высокоэнергетичного γ -излучения фемтосекундной длительности при обратном комптоновском рассеянии на нем мощного фемтосекундного лазерного импульса. На основе сравнительного анализа различных схем лазерно-кильватерного ускорения электронов выбрана схема с использованием сверхзвуковой гелиевой струи, которая, в отличие от схем с использованием различного типа волноводов, позволяет осуществлять работу в частотном режиме. Это является принципиальным моментом для использования активных систем стабилизации параметров лазерных пучков, в том числе угловой нестабильности возбуждающего лазерного излучения. Анализ также показал, что в схеме с каналированием лазерного импульса по металлическому волноводу при данной мощности не достигается сильно нелинейный баббл-режим, при котором возможен самопроизвольный захват плазменных электронов в волну (рис.1.1). Численным моделированием определены оптимальные параметры взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с плазменной струей, обеспечивающие баббл-режим с релятивистскими энергиями плазменных электронов при использовании лазерных импульсов с длительностью 20-25 фс. Численной оптимизации предшество-

вала длительная работа по проверке корректности и определении наилучших режимов работы недавно разработанного для этой задачи численного кода. Код, выполненный в виде добавочного модуля к программному комплексу LCODE, позволяет в рамках квазистатического приближения отслеживать самосогласованную эволюцию лазерного импульса в возбуждаемых им же кильватерных полях и задавать произвольное продольное распределение профиля плазмы и произвольную начальную форму лазерного импульса.

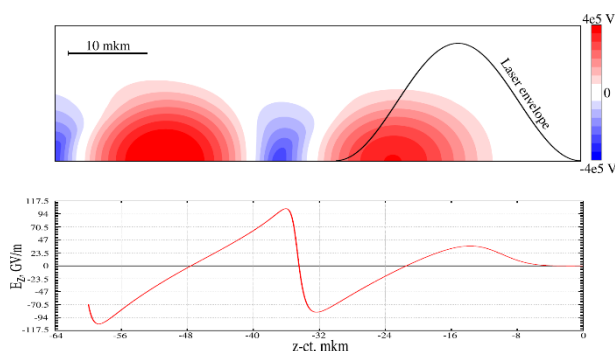


Рисунок 1.1. Кильватерный потенциал и ускоряющее поле E_z , возбуждаемое лазерным импульсом в режиме основной волноводной моды. Параметры лазера и плазмы: длительность лазерного импульса 100 фс, пиковая мощность 2.2 ТВт, поперечная структура соответствует моде R_{11} в круглом волноводе, плотность плазмы $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

2. Исследование возможности получения короткого сгустка в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Основной целью данного этапа работы является изучение возможностей существующего кольца накопителя-охладителя Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) [1,2] для получения коротких электронных или позитронных сгустков. Для исследования этих возможностей в 2016 году была проведена серия измерений длительности сгустков, накапливаемых в накопителе-охладителе на энергии 400 МэВ, с помощью фидиссектора – прибора, позволяющего изучать быстрые процессы методом электронно-оптической хронографии.

В результате профеденных исследований получены картины распределения пучков по сепаратрисам ВЧ системы накопителя-охладителя в зависимости от различных параметров [3]. Типичное распределение электронов в зависимости от времени представлено на рисунке 2.1.

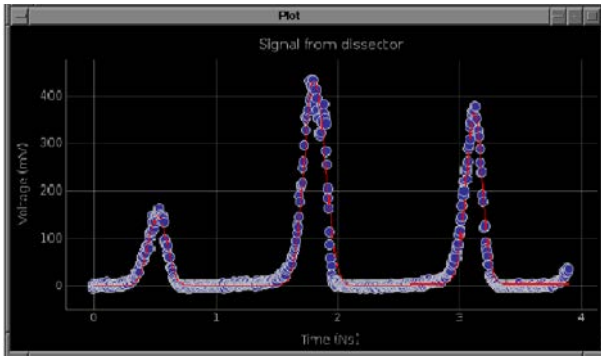


Рисунок 2.1. Распределение пучка электронов по сепаратрисам накопителя-охладителя и его фитирование гауссианами.

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены зависимости длительности пучка от его тока и от напряжения резонатора накопителя-охладителя соответственно.

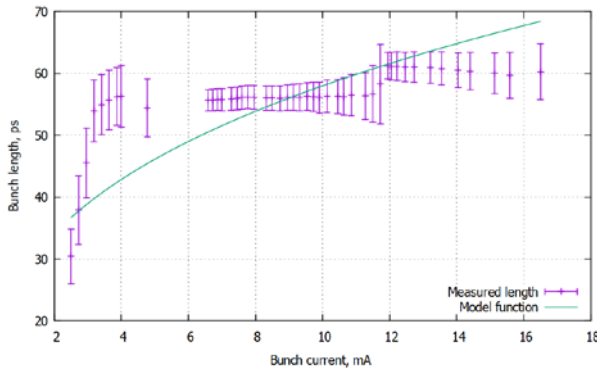


Рисунок 2.2. Зависимость длины пучка от тока пучка.

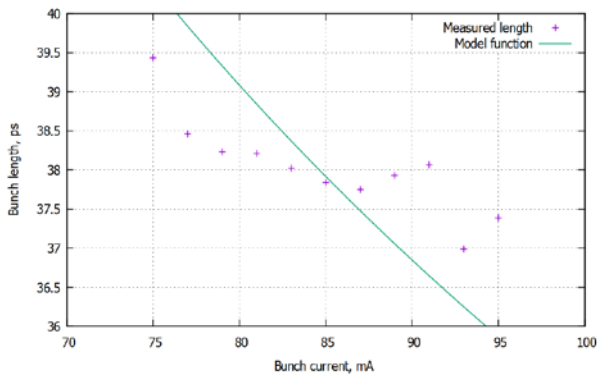


Рисунок 2.3. Зависимость длины пучка от напряжения на резонаторе накопителя-охладителя.

Полученные в экспериментах данные могут быть использованы для дальнейшего моделирования поведения выпущенного пучка в плазме. Дополнительным результатом проведенных исследований явилась возможность детектирования т.н. фазовых (продольных) колебаний пучка в накопителе-охладителе (см. рисунок 2.4). Для планируемых экспериментов на

выпущенном пучке таких режимов работы следует тщательно избегать.

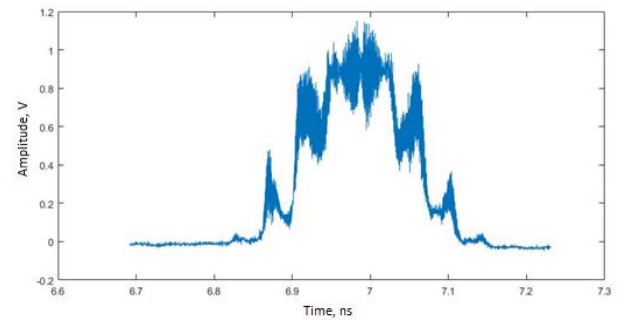


Рисунок 2.4. «Размытие» картинки означает наличие фазовых колебаний пучка.

На данном этапе работ также на накопителе-охладителе был установлен специальный модуль вывода пучка из вакуумной камеры через титановую фольгу в выпускном канале (см. рисунок 2.5). Данное устройство, оборудованное высоковакуумным шибером, в будущем позволит использовать выпускаемый из накопителя-охладителя пучок в различных применениях, в том числе и для экспериментов по плазменному кильватерному ускорению.



Рисунок 2.5. Выпускной канал накопителя-охладителя ВЭПП-5.

3. Изучение возможности применения коротких сгустков электронов в методах кильватерного ускорения.

Заранее приготовленная последовательность коротких сгустков заряженных частиц обещает стать самой перспективной схемой кильватерного ускорения, поскольку, в отличие от односгустковых методов возбуждения волны, может быть реализована при помощи современных протонных пучков высокой энергии. Было показано, что строго периодическая последовательность коротких сгустков не является оптимальной для возбуждения волны, а в оптимальной последовательности сгустки следуют неэквидистантно. Это связано со сдвигом

фазы в четверть периода между тормозящим и фокусирующим полупериодами линейной кильватерной волны. Поскольку превратить длинный протонный сгусток в неэквидистантную последовательность коротких сгустков технически сложно, был исследован вопрос об оптимальной последовательности сгустков с переменным зарядом сгустков. Показано, что в оптимальной эквидистантной последовательности заряд сгустков должен увеличиваться экспоненциально, причем показатель экспоненты однозначно связан со вкладом самого большого сгустка в волну и с отстройкой частоты следования сгустков от плазменной частоты (рис.3.1).

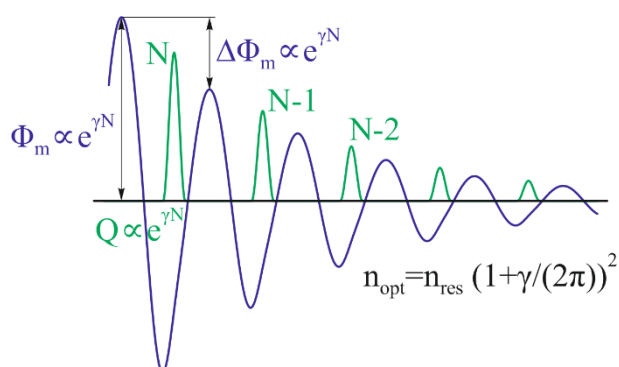


Рисунок 3.1. Иллюстрация оптимальной эквидистантной последовательности сгустков. Показана зависимость от продольной координаты тока сгустков (зеленым) и кильватерный потенциал на оси. Все свойства последовательности и волны определяются одним безразмерным параметром γ .

Заключение

В 2017 году предполагается:

1. Продолжение исследования последовательностей коротких сгустков как перспективного драйвера для будущих плазменных ускорителей высокой энергии.

2. Изучение либо физической, либо численной природы мелкомасштабных возмущений кильватерного потенциала, приводящего к росту эмиттанса ускоряемых частиц при численном моделировании плазменного кильватерного ускорения.

Список использованных источников

- [1] D.E. Berkaev et al. Commissioning of Upgraded VEPP-2000 Injection Chain. In Proc. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, May 2016, paper THPOR018, pp. 3811-3813, ISBN: 978-3-95450-147-2, doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-THPOR018, <http://jacow.org/ipac2016/papers/thpor018.pdf>
- [2] F.A. Emanov et al. Feeding BINP Colliders by the New VEPP-5 Injection Complex. In Proc. of XXV Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC'16), Saint-Petersburg, Russia, November 2016. Paper WEXMH01.
- [3] V.V. Balakin et al. Longitudinal Beam Distribution Measurements in Damping Ring of VEPP-5 Injection Complex. In Proc. of XXV Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC'16), Saint-Petersburg, Russia, November 2016. Paper THPSC074.

II.2II Комплексная программа СО РАН. Развитие методики регистрации космических мюонов в гамма-астрономии высоких энергий

Введение

В отчете представлены результаты работ по разработке детектора мюонов для гамма-астрономии высоких энергий. В ходе исследований 2016 года была подтверждена работоспособность предложенной конструкции детектора, определены ключевые технологические решения. Это позволит перейти к производству счетчиков площадью регистрации 1 м^2 и проверки их условиях реального эксперимента.

1. Разработка прототипа и оптимизация конструкции детектора мюонов

В ИЯФ СО РАН была предложена оригинальная конструкция сцинтилляционного детектора мюонов для нужд гамма-астрономии. Сбор сцинтилляционного света в детекторе производится с помощью переизлучающих пластин-световодов. Это позволяет использовать ФЭУ с малым размером фотокатода, что значительно удешевляет стоимость детектора. Схема детектора представлена на рисунке 1.

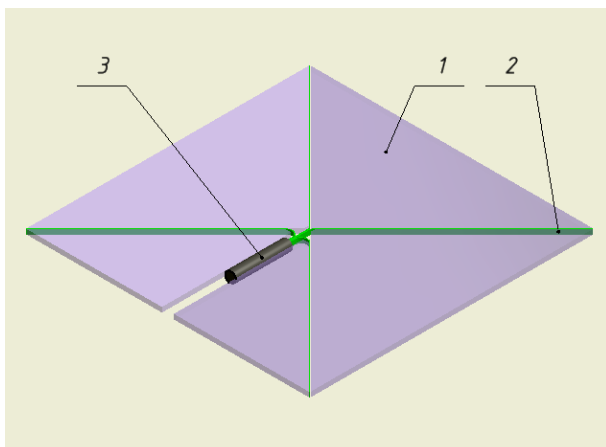


Рисунок 1. Схема сцинтилляционного детектора. 1 -- пластиковый сцинтиллятор, 2 -- переизлучающая пластина световода, 3 -- ФЭУ.

1.1 Тестирование ФЭУ разных производителей.

Максимум спектра излучения переизлучателя находится на длине волны 500 нм. В связи с этим были проведены сравнительные измерения ФЭУ с бищелочным и мультищелочным фотокатодами различных производителей. Были измерены приборы ФЭУ84, ФЭУ153,

ФЭУ176 производства завода “Экран” (г. Новосибирск), ФЭУ85, ФЭУ115 производства МЭЛЗ (г. Москва), ФЭУ143 “Электрон” (г. Санкт-Петербург), R11920 производства фирмы Hamamatsu (Япония), ET9902B производства фирмы Electron Tubes (Великобритания). Была измерена зависимость квантовой эффективности от длины волны для данных приборов (рис. 2). По результатам измерений был выбран ФЭУ85 для использования в разрабатываемом сцинтилляционном детекторе.

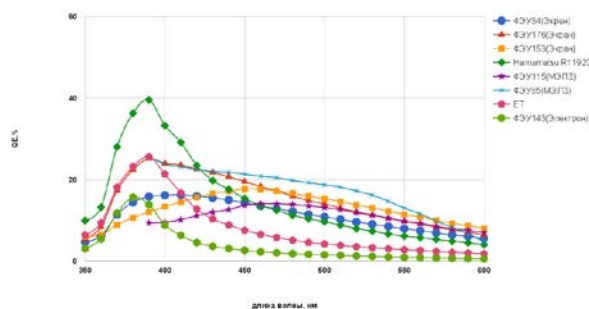


Рисунок 2. Зависимость квантовой эффективности от длины волны для разных типов ФЭУ.

1.2 Поиск оптимальной концентрации переизлучающей добавки ВВQ.

Были проведены исследования длины поглощения переизлученного света в образцах переизлучающих пластин с сечением $3 \times 17 \text{ мм}$. Исследовались пластины с концентрациями переизлучающей добавки ВВQ 90 и 150 мг/кг. По результатам измерений была определена оптимальная концентрация для переизлучающих пластин с сечением $5 \times 20 \text{ мм}$ равная 100 мг/кг. В ноябре 2016 года по заказу ИЯФ СО РАН в НИИ Полимеров им. ак. Каргина (г. Дзержинск) были произведены образцы органического стекла с добавкой ВВQ. В настоящее время проводятся измерения полученных образцов.

1.3 Сравнение работы счетчиков со сцинтилляторами разной толщины.

В ИЯФ СО РАН был разработан прототип сцинтилляционного счетчика площадью 0.25 м^2 (рисунок 3). В прототипе были протестированы сцинтилляционные пластины суммарной толщиной 20 и 10 мм. Была определена оптимальная конфигурация сцинтилляторов: дальний от ФЭУ сцинтиллятор представляет собой сборку из 2-х пластин толщиной 10 мм, в средней и ближней части прототипа используются одиночные пластины толщиной 10 мм.

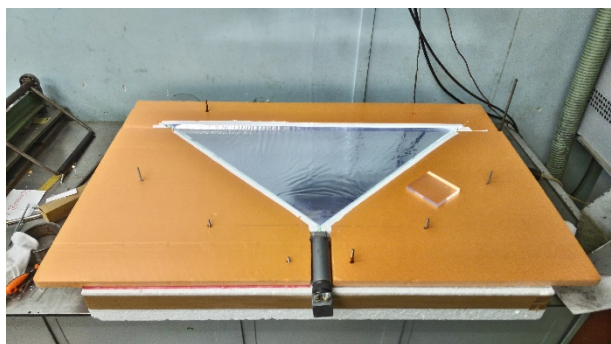


Рисунок 3. Фотография прототипа сцинтилляционного счетчика.

1.4 Тестирование прототипа в различных конфигурациях на космических мюонах и на пучке электронов.

В течение 2016 года были проведены серии измерений с прототипом на космических мюонах. Получены данные по зависимости амплитуды сигнала от качества полировки торцов сцинтилляционных пластин, от наличия или отсутствия оптического контакта между световодом и ФЭУ. В составе прототипа были протестированы ФЭУ84 и ФЭУ85. Прототип был протестирован на выведенном пучке электронов на ВЭПП-4М. Данные обрабатываются.

1.5 Измерение параметров счетчика.

По результатам предварительных исследований была выбрана оптимальная конфигурация детектора: ФЭУ85, сцинтиллятор из 2-х пластин суммарной толщиной 10 мм в дальней части детектора и по 1-ой пластине в центральной и ближней части детектора, торцы пластин отполированы, часть торца ближней пластины прикрыта черной бумагой для выравнивания амплитуды сигнала, оптический контакт между ФЭУ и световодом отсутствует. В данной конфигурации на космических мюонах была измерена неоднородность амплитуды по координате прохождения частицы через счетчик. Результаты измерений представлены на рисунке 4. Средняя амплитуда составила 23.1 фотоэлектрон, неоднородность $\pm 15\%$ (минимум-максимум). Временное разрешение детектора не превышает 5 нс.

Заключение

В 2017 г. запланировано:

1. Разработка полноразмерного счётчика регистрации космических мюонов.
2. Тестирование счётчика в лаборатор-

ных условиях и условиях реального эксперимента.

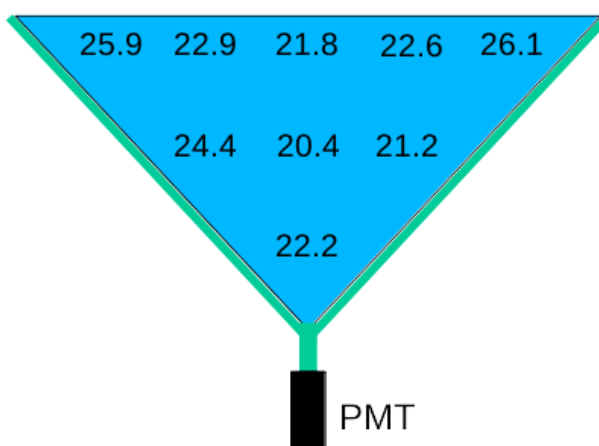


Рисунок 4. Схема детектора с средним числом зарегистрированных фотоэлектронов от космических мюонов в различных точках.

II.2II Комплексная программа СО РАН. Разработка методов диагностики для исследования плазмы в открытых ловушках

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов диагностики для исследования плазмы в открытых ловушках. В ходе исследований разработаны диагностики для определения параметров плазмы в газодинамической ловушке и бесконтактные диагностики для измерения параметров мощных атомарных пучков для нагрева плазмы.

Полученные в 2016 году результаты продемонстрировали значительный реальный прогресс в развитии методов диагностики для исследования плазмы в открытых ловушках.

1. Развитие комплекса диагностик для измерения параметров плазмы в расширителе

Для подробного изучения поведения плазмы в расширителе газодинамической ловушки (ГДЛ) [1,2] подготовлен модернизированный комплекс диагностик. При модернизации были введены в строй оптические диагностики, быстрые вакуумметры и набор датчиков на торцевом плазмоприемнике.

Оптические диагностики в расширителе состоят из двух систем: спектроскопической системы высокого разрешения для измерения продольной функции распределения ионов и узкополосной многоканальной системы регистрации интенсивности излучения для измерения пространственных профилей атомов водорода и дейтерия, находящихся в возбужденном состоянии уровня $n=3$. Спектральная диагностика высокого разрешения включает объектив сбора света, спектрометр на базе дифракционной решетки с дисперсией 0.09 нм/мм и разрешением ≈ 0.01 нм, и цифрового детектора с ПЗС-матрицей для регистрации излучения. Отдельный канал измерения интенсивности излучения $H\alpha$ и $D\alpha$ состоит из узкополосного интерференционного фильтра на диапазон 656-657 нм и линзы для построения изображения на детекторе. Система регистрации состоит из лавинного фотодиода HAMAMATSU S5343 с широкополосным трансимпедансным усилителем и АЦП с большим динамическим диапазоном и частотой дискретизации 10 МГц. Схема диагно-

стики и геометрия измерений спектров излучения плазмы в расширителе ГДЛ показана на Рис. 1,2. Были проведены измерения доплеровского сдвига линий излучения $H\alpha$ и $D\alpha$ атомов, образовавшихся в результате нейтрализации ионов плазмы. Пример измеренного спектра показан на Рис.3.

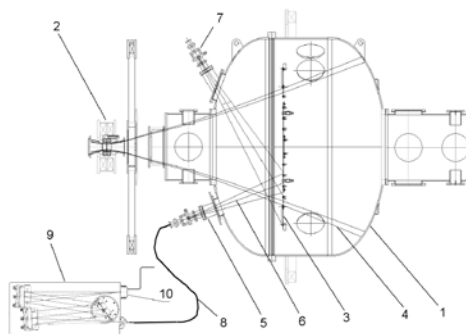


Рисунок 1. Схема диагностики и геометрия измерений спектров излучения плазмы в расширителе ГДЛ: 1 – вакуумная камера расширителя, 2 – пробочная магнитная катушка, 3 – приёмник плазмы, 4 – силовая линия магнитного поля, 5 – оптическая система спектральной диагностики, 6 – линия наблюдения, 7 – оптическая система наблюдения линий, 8 – световод, 9 – спектрометр, 10 – детектор.

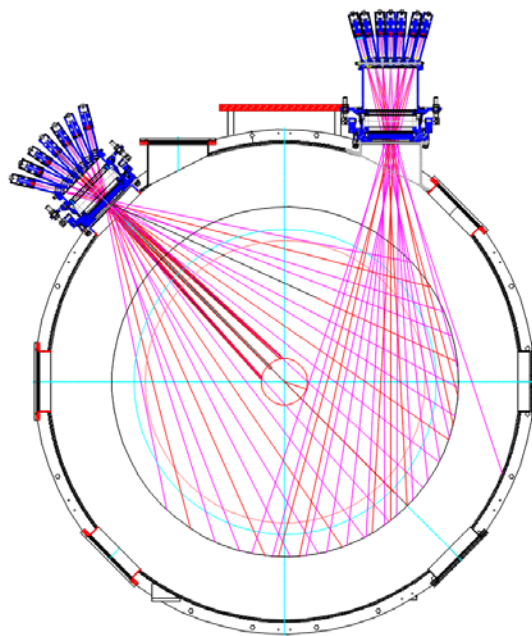


Рисунок 2. Зона просмотра многоканальной узкополосной системы регистрации.

Для динамических измерений давления водорода в расширителе во время импульса были подготовлены и установлены быстрые вакуумметры на основе обратных магнетронных

датчиков. Эти датчики устанавливаются в область магнитного поля расширителя с напряженностью ~ 2 кГс. Ионизация газа в датчике осуществляется холловскими электронами. Схема датчика приведена на Рис.4, результат измерений на Рис.5.

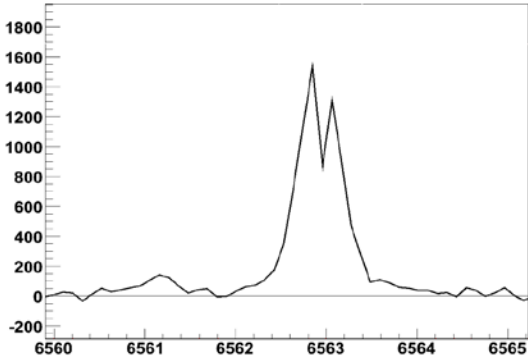


Рисунок 3. Измеренный доплеровский сдвиг линий излучения атомов Na и D α . Сдвоенный пик справа объясняется присутствием быстрых атомов, перезарядившихся на ионах плазмы.

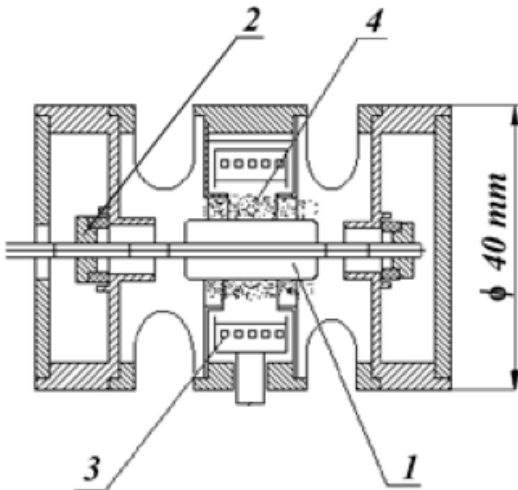


Рисунок 4. Вакуумметр с инверсным обратным магнетронным разрядом. 1- анод, 2-изолятор, 3- коллектор с встроенным проволочным нагревателем, 4- холловский слой.

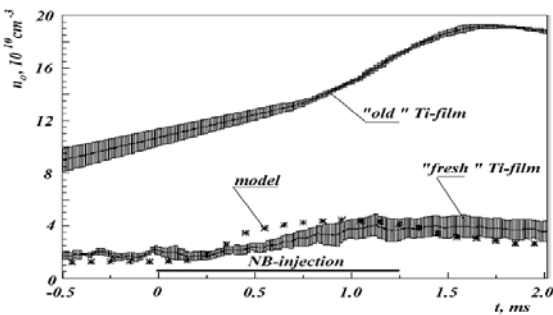


Рисунок 5. Измеренная плотность водорода в расширителе в зависимости от времени. Верхняя кривая соответствует старой титановой пленке, нижняя –свежей, звездочки данным из модельных расчетов.

Для определения величин потоков частиц и энергии в вытекающей плазме на торцевом плазмоприемнике был установлен набор датчиков, состоящий из датчиков плотности тока ионов, пирозлектрических болометров и плоских зондов. Подобные датчики использовались ранее на установке ГДЛ, схемы этих датчиков показаны на Рис.6 - 8.

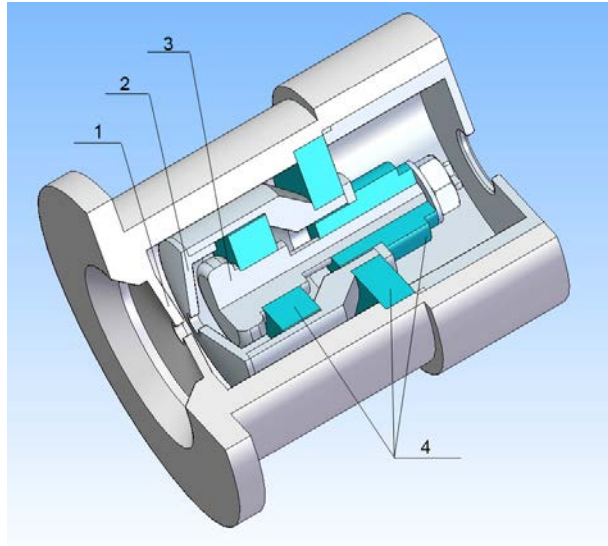


Рисунок 6. Датчик плотности тока ионов. 1- входная диафрагма, 2 – ускоряющий электрод, 3- коллектор, 4-изоляторы.

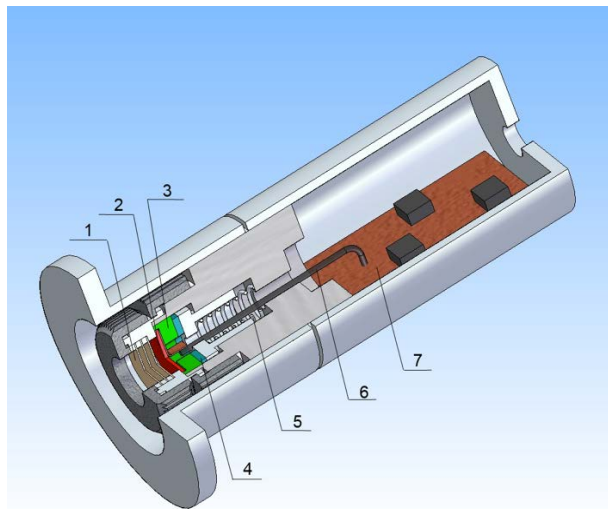


Рисунок 7. Пирозлектрический болометр. 1 – молибденовые фольги, 2- пирокерамика из LiNbO₃, 3-5 - упругие элементы, 6- проводник, 7- встроенный усилитель.

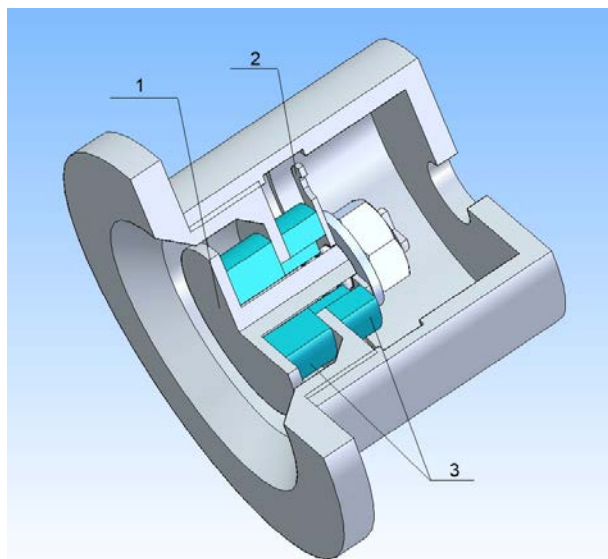


Рисунок 8. Плоский зонд. 1- коллектор, 2 - контакт, 3- изоляторы.

2. Измерение радиального профиля потенциала в ГДЛ с помощью пучка тяжелых ионов

Измерение пространственного распределения электрического потенциала в плазме является необходимым для проверки теоретических моделей, описывающих удержание плазмы в открытых ловушках. К настоящему моменту на установке ГДЛ потенциал измерялся ленгмюровскими зондами, либо восстанавливался по данным энергоанализатора ионов, покинувших ловушку вдоль силовых линий. Указанные методы имеют существенные недостатки. Уже при температурах плазмы около 50-100 эВ ленгмюровские зонды начинают разрушаться и существенно охлаждают плазму. Второй метод (энергоанализатор) позволяет определить потенциал только вблизи магнитных пробок. Поэтому для измерения потенциала в центре ловушки был предложен проект Измерителя Потенциала на основе Тяжелоионного Пучка (ИПТП). Принцип работы диагностики следующий. Инжектор пучка тяжелых однократно заряженных ионов создаёт «первичный» пучок, который вводится в установку поперёк магнитного поля. Проходя плазму часть первичного пучка ионизируется и превращается в набор «вторичных» пучков, которые покидают плазму. Эти пучки принимаются детектором, который измеряет энергию вторичных ионов. Разность энергий вторичных и первичных частиц определяет величину потенциала плазмы в месте ионизации. Маленький угловой разброс первичного пучка и высокая степень коллимации вторичных пучков при входе в детектор

позволяют определить координаты точки ионизации с необходимой точностью.

ИПТП был спроектирован для центрального сечения установки ГДЛ (Рис.9) по следующим причинам. Во-первых, в этой области магнитное поле минимально (для основной ячейки), что позволяет снизить энергию ионов в пучке. Во-вторых, поле в центральном сечении параллельно оси установки. Это обстоятельство делает задачу о расчётах траектории пучка двумерной и существенно упрощает конструкцию детектора частиц. Важным обстоятельством при проектировании ИПТП была необходимость совместить его с набором других диагностик, размещённых в центральном сечении, среди которых нужно особо подчеркнуть две спектроскопические диагностики: на основе томсоновского рассеяния (измеряет температуру и плотность плазмы) и на основе динамического эффекта Штарка (измеряет магнитное поле, возмущаемое плазмой). По этой причине расположение ИПТП было жёстко определено. Дополнительно требовалось удовлетворить следующим условиям:

- Для создания первичного пучка должен использоваться благородный газ. Это снимает проблемы, связанные с формированием молекулярных ионов и позволяет использовать уже готовые генераторы плазмы в инжекторе первичного пучка.
- Максимальное напряжение не должно превышать 100 кВ. Это существенно упрощает конструкцию системы питания и, кроме того, снимает ряд вопросов по электробезопасности.
- Коэффициент ослабления первичного пучка в плазме должен быть порядка единицы. Это необходимо, чтобы вторичные пучки были достаточно яркими и оставались такими вдоль всего диаметра плазмы.

Всем указанным требованиям удовлетворяет первичный пучок Xe^{+1} с энергией 60-77 кэВ. На Рис.10 представлен общий вид инжектора первичного пучка. Дуговой генератор создаёт плазму с ионами Xe^{+1} из которой четырёхэлектродная система «вытягивает» пучок с общим током до 7 мА. Апертуры в ускоряющих электродах имеют форму щелей и формируют пучок размером 2 мм x 2 см с угловой расходимостью 4 мрад поперёк щели. Параметры ускоряющей системы инжектора оптимизированы так, чтобы сделать размер и угловую расходимость пучка поперёк щели минимальными, поскольку они определяют пространственное разрешение диагностики.

8-канальный детектор вторичных пучков Xe^{+2} представлен на Рис.11. Поскольку углы входа вторичных пучков различаются от канала к каналу, для определения энергии используется схема 30-градусного электростатического анализатора, которая имеет слабую чувствительность к этому параметру. Для уменьшения размеров детектора на входе в анализатор вторичные пучки замедляются на 40% от начальной энергии ионов первичного пучка. В каждом канале ток вторичного пучка принимается четырьмя коллекторами и регистрируется 10-битным АЦП с частотой дискретизации 1 МГц. Для увеличения точности измерения потенциала потенциалы элементов детектора задаются пассивными делителями ускоряющего напряжения инжектора первичного пучка. Результирующая точность измерения потенциала ожидается на уровне около 50 В. Пространственное разрешение диагностики определяется параметрами первичного пучка и «углом зрения» коллиматора детектора вторичных пучков и по оценкам составляет около 2 см. Для сравнения радиус плазмы в центральном сечении составляет 10-15 см.

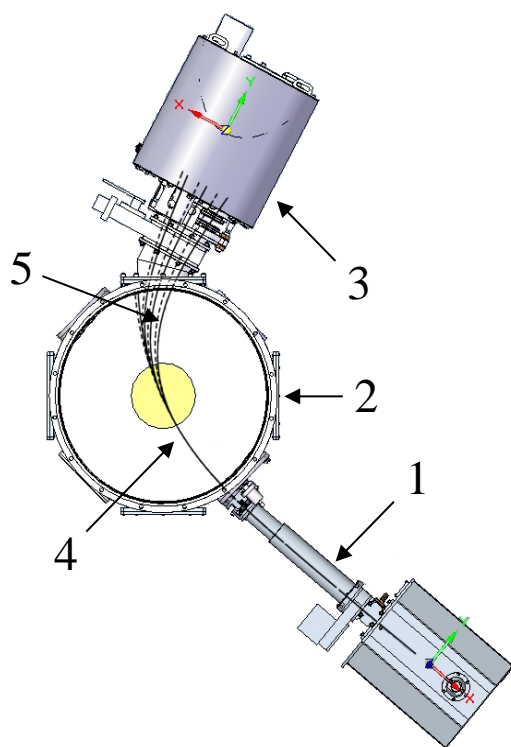


Рисунок 9. Центральное сечение ГДЛ: 1 — инжектор первичного пучка, 2 — камера ГДЛ, 3 — детектор вторичных пучков, 4 — первичный пучок, 5 — вторичные пучки.

В настоящее время детектор вторичных пучков находится в производстве. Инжектор первичного пучка изготовлен (Рис.12) и в бли-

жайшее время будет установлен на экспериментальный вакуумный объем для проверки характеристик пучка Xe^{+1} .

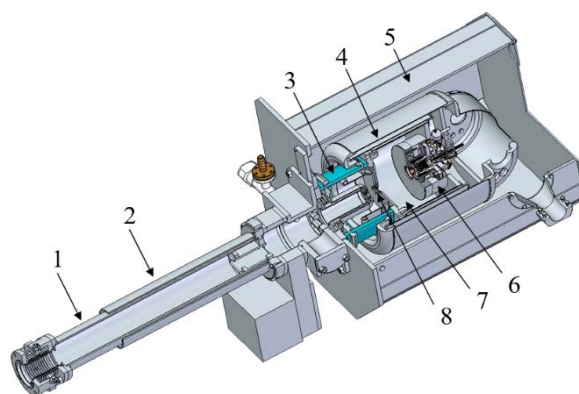


Рисунок 10. Инжектор первичного пучка: 1 — пучкопровод, 2 — магнитный экран пучкопровода, 3 — керамический изолятор, 4 — вакуумная камера под потенциалом 60-77 кВ, 5 — магнитный и электростатический экран, 6 — дуговой генератор плазмы Xe^+ , 7 — расширительный объем в котором плазма охлаждается и становится более однородной, 8 — ускоряющий зазор между 2 и 3 электродами.

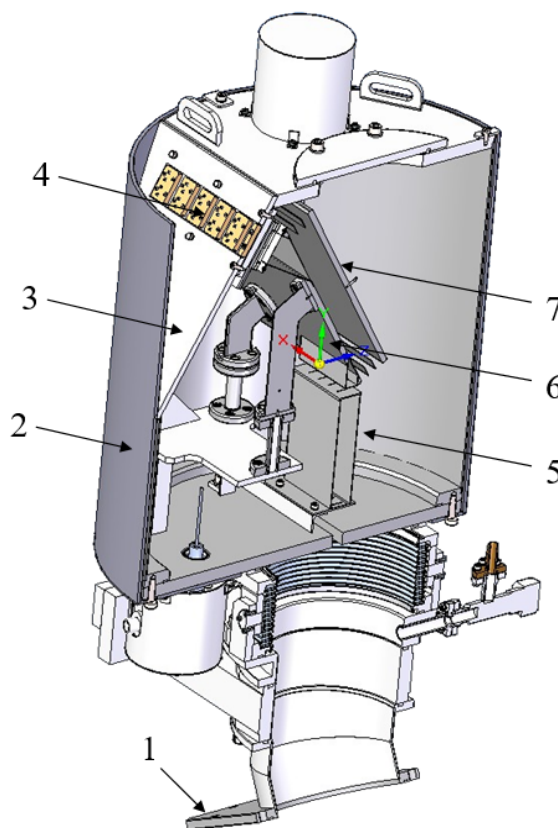


Рисунок 11. Детектор вторичных пучков: 1 — фланец ГДЛ, 2 — магнитный экран, 3 — стенка вакуумной камеры, 4 — место размещения токов усилителей, 5 — коллиматоры вторичных пучков, 6 и 7 — «нижняя» и «верхняя» пластины 30-градусного электростатического анализатора.



Рисунок 12. Элементы инжектора первичного пучка: вверху — магнитный экран инжектора (номер 5 на Рис.10), справа — вакуумная камера инжектора (большой цилиндр соответствует номеру 4 на Рис.10, полуцилиндр сверху — электростатический экран, закрывающий место разделки кабеля питания, внизу — керамический изолятор, соответствует номеру 3 на Рис.10).

3. Развитие бесконтактных диагностик для измерения параметров мощных атомарных пучков для нагрева плазмы

Доплеровская спектроскопия возбужденных атомов пучка быстрых атомов водорода позволяет бесконтактно и оперативно проводить измерения состава пучка. Ниже приведен пример измерений состава пучка атомов водорода мощного инжектора для нагрева плазмы.

Измерения проводились в направлении навстречу пучку с энергией 15 кэВ и длительностью 8 мс под углом 5° к оси пучка. Измеренный спектр показан на Рис.13.

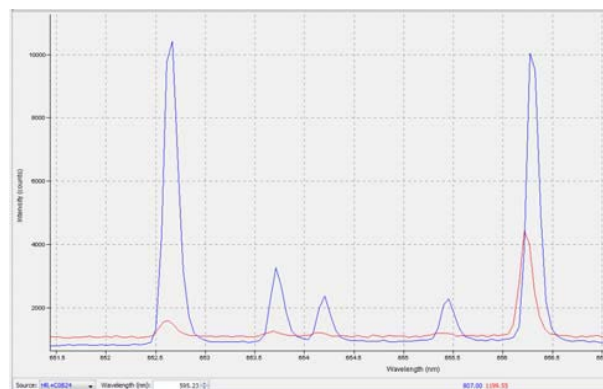


Рисунок 13. Доплеровский спектр излучения атомов водородного пучка.

По известным сечениям возбуждения атомов водорода в зависимости от энергии был определен состав пучка: $H^+ : H_2^+ : H_3^+ : H_2O^+ = 89.5\% : 8.1\% : 2.1\% : 0.3\%$ (по току ионов в сформированном ионном пучке), $H^+ : H_2^+ : H_3^+ : H_2O^+ = 84.5\% : 10.8\% : 3.4\% : 1.3\%$ (по плотности ионов в сформированном ионном пучке). Сформированный пучок отличается высоким содержанием протонов, что объясняется применением дуговых генераторов для создания плазменного эмиттера.

Измерения доплеровского спектра быстрых атомов выполнялись спектрометром Ocean Optics, управляемым персональным компьютером. Этот спектрометр имеет относительно небольшое разрешение ~ 0.2 нм и является одноканальным. Повышение разрешения спектрометра до 0.07 нм позволяет определить состав смешанного пучка атомов водорода и дейтерия, что показано на Рис.14.

Использование спектрометра с высоким разрешением на уровне 0.01 нм позволяет определить угловую расходимость атомов пучка при почти перпендикулярном измерении. Пример такого измерения, выполненного в совместных экспериментах со специалистами из Исследовательского центра Юлих, приведен на Рис.15.

Заключение

Выполнение пункта 1 “Развитие комплекса диагностик для измерения параметров плазмы в расширителе” является несомненным достижением. В продолжение работ на 2017 год по пункту 2 “Измерение радиального профиля потенциала в ГДЛ с помощью пучка тяжелых ионов” требуется запуск и отладка диагностики на установке. Пункт 3 “Развитие бесконтактных диагностик для измерения параметров мощных атомарных пучков для нагрева плазмы” полностью выполнен и применение таких диагностик на инжекторах и инжекторных стендах требует соответствующей регистрирующей аппаратуры высокого разрешения.

В 2017 г. запланирован тестовый запуск диагностики с помощью пучка тяжелых ионов.

Список использованных источников

- [1] Anikeev, A.V., Bagryansky, P.A., Beklemishev, A.D., Ivanov, A.A., Korobeinikova, O.A., Kovalenko, Yu.V., Lizunov, A.A., Maximov, V.V., Murakhtin, S.V., Pinzhenin, E.I., Prikhodko, V.V., Savkin, V.Ya., Soldatkina, E.I., Solomakhin, A.L., Yakovlev, D.V., and Zaytsev, K.V. The GDT Experiment: Status and Recent Progress in Plasma Parameters. FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY. Vol. 68, Issue 1, 2015, p. 1-7.
- [2] Anikeev, A.V., Bagryansky, P.A., Beklemishev, A.D., Korobeinikova, O.A., Lizunov, A.A., Maximov, V.V., Murakhtin, S.V., Prikhodko, V.V., Soldatkina, E.I., Solomakhin, A.L., Yakovlev, D.V., Zaytsev, K.V. Recent results and next steps in experimental study of plasma confinement in gas dynamic trap. FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY. Vol. 68, Issue 1, 2015, p. 15-20.

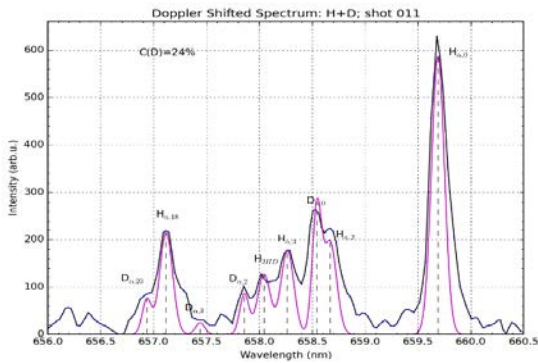


Рисунок 14. Доплеровский спектр излучения смешанного пучка атомов водорода и дейтерия.

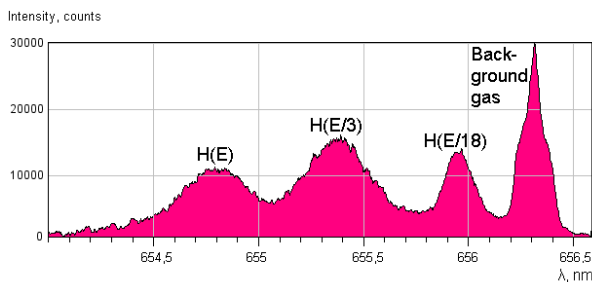


Рисунок 15. Доплеровский спектр излучения атомов водородного пучка в почти перпендикулярном направлении.

Для измерения параметров мощных пучков быстрых атомов кроме оптической спектроскопии может быть использована регистрация инфракрасного излучения с элементов инжекторного тракта, прогреваемых пучком. Временная динамика прогрева элементов может быть измерена стандартным тепловизором. Такой способ измерения температуры элементов несомненно удобнее установки массива термпар. На Рис.16 показан снятый тепловизором входной инжекционный порт токамака TCV.

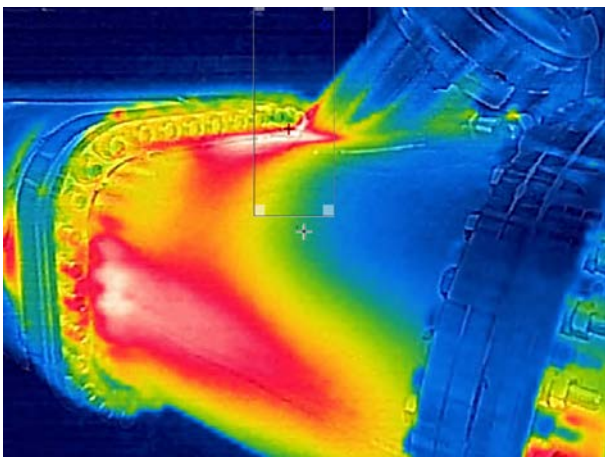


Рисунок 16. Прогрев под действием нагревающего пучка пучка быстрых атомов дейтерия входного инжекционного порта токамака TCV.

II.2II Комплексная программа СО РАН. Равновесие и устойчивость плазмы с большим бета в аксиально-симметричных магнитных ловушках

Введение

В отчете представлены результаты работ по исследованию равновесия и устойчивости плазмы с большим бета в Газодинамической ловушке. Экспериментально изучены колебания, возникающие в плазме ГДЛ, проведена подготовка к экспериментам по определению порога баллонной неустойчивости.

1. Исследование потерь быстрых ионов в ГДЛ при развитии альфвеновской-анізотропной неустойчивости в условиях основного и дополнительного нагрева плазмы.

Энергетический спектр ионов, покидающих центральную ячейку ГДЛ и движущихся вдоль оси в расширителе, измерялся пятиканальным энергоанализатором, установленным на торце бака расширителя (рисунок 1) [1]. Анализатор расположен в магнитном поле с коэффициентом расширения $K = 1500$. Столь большое значение степени расширения магнитного поля может приводить к нарушению адиабатичности движения заряженных частиц в области искривления силовых линий магнитного поля. Поэтому определение коэффициента пересчёта тока, измеренного энергоанализатором, в полный ток частиц, покидающих основную ячейку ГДЛ, рассчитывалось численным кодом на основе метода Монте-Карло.

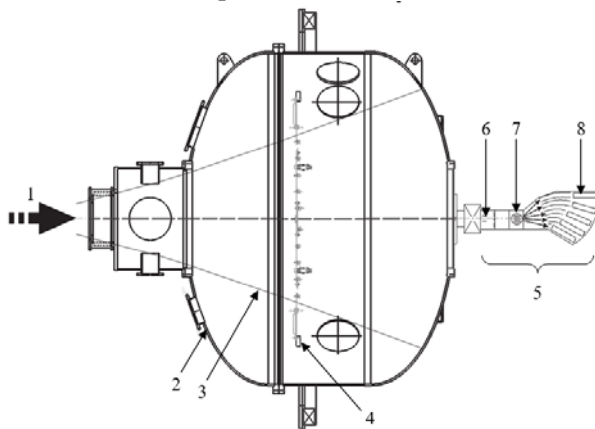


Рисунок 1. Расположение энергоанализатора: 1 — поток плазмы из основной ячейки ГДЛ, 2 — вакуумная камера расширителя, 3 — силовая линия магнитного поля,

4 — плазмоприёмник, 5 — энергоанализатор, 6 — ионизационная лампа, 7 — магнитный сепаратор, 8 — каналы регистрации.

Характерный вид сигнала диамагнитной петли и токов, зарегистрированных энергоанализатором в условиях основного нагрева плазмы, представлены на рисунке 2. Приведённые экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при развитии АИЦН наблюдается увеличение потока ионов, покинувших основную ячейку ГДЛ в диапазоне энергий 4-12 кэВ, который находится заметно ниже энергии инжектируемых дейтонов 22 кэВ. Этот результат говорит в пользу гипотезы о том, что резонансное рассеяние испытывают ионы с энергией, близкой к максимальной, которые, однако, выходят из области резонанса, не достигая конуса потерь. После этого они «тормозятся» за счёт кулоновских столкновений с частицами мишенной плазмы эффективно передавая ей большую часть своей энергии. Полная мощность продольных потерь при развитии АИЦН возрастает несущественно — на величину около 0.2-0.5% от мощности, захватываемой из нагревных атомарных пучков.

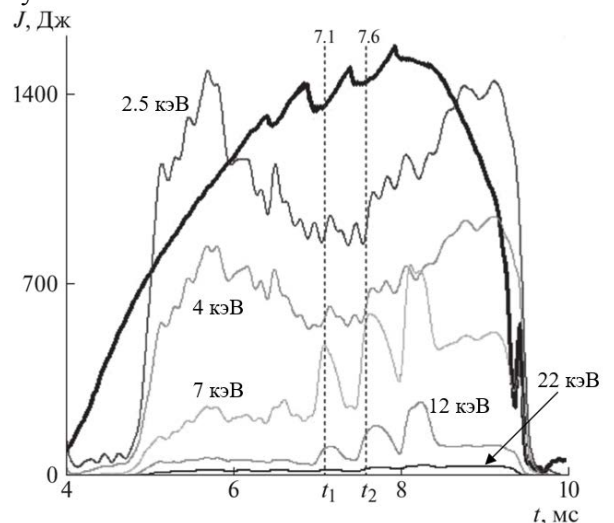


Рисунок 2. Энергосодержание в популяции быстрых ионов (жирная линия) и сигналы в каналах регистрации энергоанализатора (тонкие линии). Моменты времени t_1 и t_2 соответствуют временам развития АИЦН.

В условиях дополнительного ЭЦР нагрева плазмы, совмещённого с основным (инжекцией атомарных пучков) ситуация меняется слабо. В режимах с нагревом только за счёт ЭЦР и без инжекции атомарных пучков АИЦН не развивается.

2. Построение экспериментальных скейлингов для порогов развития микронеустойчивости относительно изменения базовых параметров плазмы и магнитного поля

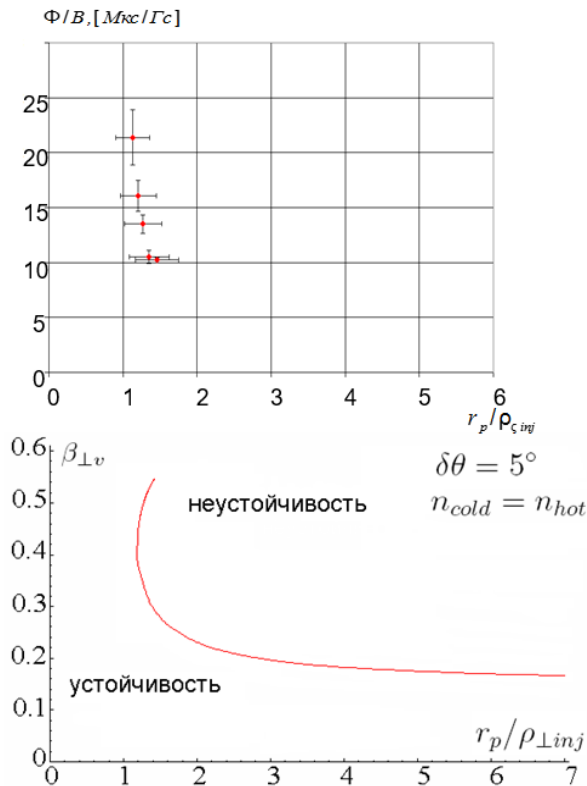


Рисунок 3. Зависимость порога возбуждения неустойчивости от отношения радиуса плазмы к ларморовскому радиусу ионов с энергией, равной энергии инжектируемых частиц: сверху — экспериментально измеренная величина диамагнитного потока к магнитному полю, снизу — рассчитанное значение относительного давления [2].

На установке ГДЛ в режимах с основным нагревом проведена серия экспериментов, в которой магнитное поле пропорционально изменялось в основной ячейке ГДЛ. При этом размер плазмы почти не менялся, а ларморовский радиус рос при уменьшении поля. Теоретическая оценка порога развития АИЦН по относительному поперечному давлению представлено на рисунке 3 (внизу). В экспериментах порог определялся по величине Φ/B , которая пропорциональна относительному давлению при его малых значениях (рисунок 3, сверху). Показано, что порог развития АИЦН уменьшается с ростом отношения размера плазмы к ларморовскому радиусу ионов с энергией, равной энергии частиц в инжектируемых атомарных пучках. Это качественно совпадает с теоретическими

оценками, а именно — с нижней ветвью кривой, представленной на рисунке 3 внизу.

Как уже было отмечено выше, в условиях дополнительного ЭЦР нагрева плазмы, совмещённого с основным (инжекцией атомарных пучков) ситуация не должна измениться, а в режимах с нагревом только за счёт ЭЦР и без инжекции атомарных пучков АИЦН не развивается.

3. Исследование удержания быстрых ионов в ГДЛ при развитии колебаний глобальной акустической моды в условиях дополнительного нагрева

На установке ГДЛ в режимах с основным нагревом обнаружено развитие колебаний на частоте около 100 кГц (рисунок 4). Отличительной особенностью этой моды является постоянная частота, которая не изменяется даже при существенном изменении параметров плазмы. Для описания этой моды предложена модель стоячей звуковой волны, отражающейся от продольных неоднородностей плазмы [3].

В условиях дополнительного ЭЦР нагрева плазмы, совмещённого с основным (инжекцией атомарных пучков) ситуация меняется слабо. В режимах с нагревом только за счёт ЭЦР и без инжекции атомарных пучков колебания с указанными выше параметрами не наблюдаются в течение нагрева; однако в процессе распада плазмы колебания на частотах около 100 кГц возникают на непродолжительное время.

4. Идентификация и определение порога устойчивости баллонных мод в ГДЛ при дополнительном нагреве плазмы

В настоящее время в режимах с дополнительным нагревом плазмы радиальный профиль энерговклада оказывается довольно узким и составляет, согласно расчётам [4] 2-4 см по уровню $1/e$. При таком нагреве область плазмы с горячими ионами имеет радиус сравнимый с ларморовским радиусом быстрых ионов. По этой причине среднее время торможения быстрых ионов на электронах плазмы увеличивается очень слабо и, как следствие, полное количество накопленных быстрых ионов почти не растёт. Другими словами, в режимах с «узким нагревом» не получается превысить величину относительного давления, равную $\beta_v = 0.6$, которая была достигнута в режимах без дополнительного ЭЦР нагрева.

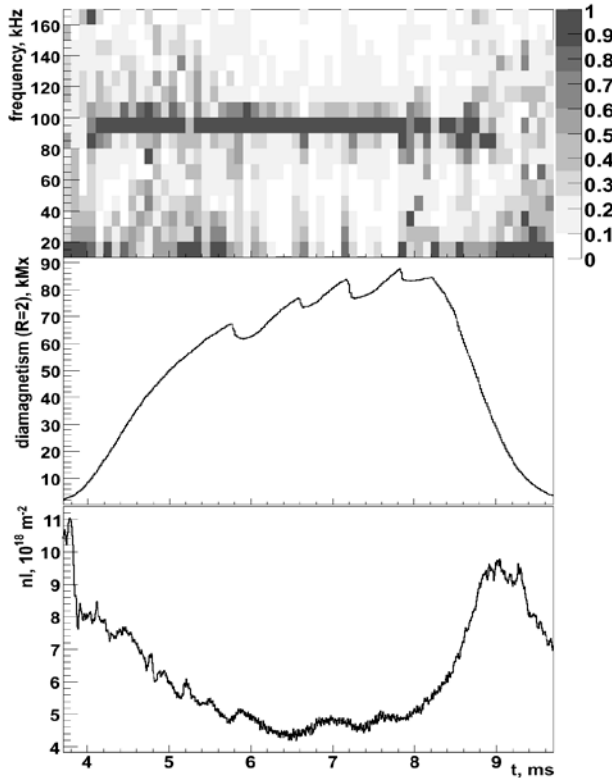


Рисунок 4. Временная эволюция параметров плазмы: сверху — спектр сигналов, зафиксированных магнитными зондами, по центру — диамагнетизм плазмы, внизу — линейная плотность электронов.

Поставленная цель — изучение порога развития баллонных мод — может быть достигнута при улучшении накопления быстрых ионов в ГДЛ. Для этого было предложено перейти к режиму с широким профилем энерговклада, радиус которого должен быть порядка радиуса плазмы. Параметры, необходимые для режима с «широким» нагревом, подбирались с помощью моделирования распространения волн в плазме и их резонансного поглощения электронами (рисунок 5). Экспериментальная реализация этого режима требует изменить профиль магнитного поля вблизи области резонанса, для этого в настоящее время проводится модернизация пробочной катушки магнитной системы ГДЛ.

Заключение

В 2017 году предполагается:

Продолжение исследований, направленных на идентификацию и определение порога устойчивости баллонных мод в ГДЛ при дополнительном нагреве плазмы.

Продолжение исследований удержания быстрых ионов в ГДЛ при развитии колебаний альфвеновской и глобальной акустической моды в условиях дополнительного нагрева.

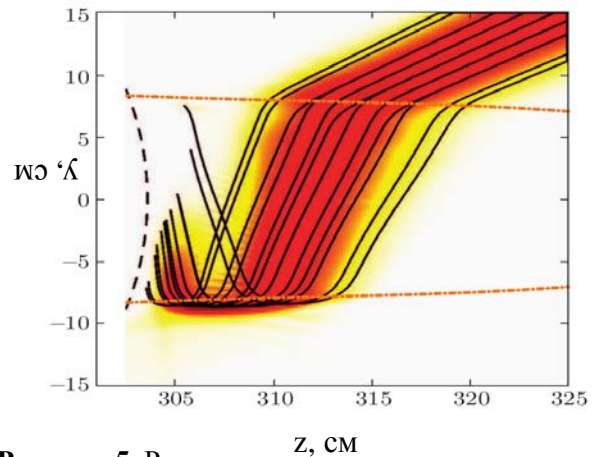


Рисунок 5. Распределение интенсивности поля в пучке в режиме с «широким профилем энерговклада» в состоянии до нагрева, ось z совпадает с геометрической осью установки. Сплошными линиями на рис. а показаны геометрооптические лучи, штриховой и штрихпунктирными — соответственно область ЭЦ-резонанса и граница плазмы. Эффективность поглощения близка к 100 %.

Список использованных источников

- [1] А.В.Аникеев, П.А.Багрянский, К.В.Зайцев, О.А.Коробейникова, С.В.Мурахтин, Д.И.Сковородин, Д.В.Юров. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДЛ при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости. *Физика плазмы*, т. 41, в. 10, 839-849, (2015).
- [2] Ю.А.Цидулко, И.С.Черноштанов. Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в аксиально-симметричной ловушке с наклонной инжекцией быстрых атомов. *Физика плазмы*, т. 40, № 12, с. 1074–1083, (2014).
- [3] Skovorodin D.I., Zaytsev K.V. and Beklemishev A.D. Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure. *Phys. Plasmas*, v. 20, p. 102123, (2013).
- [4] А.Г.Шалашов, А.А.Балакин, Т.А.Хусаинов, Е.Д.Господчиков, А.Л.Соломахин. Квазиоптическое моделирование электронного циклотронного нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке. *ЖЭТФ*, т. 151, в. 1, с. 1–17, (2017).

Ц.31П Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Установка персонального досмотра для выявления наркокурьеров

Введение

В отчете представлены анализ ситуации в стране с наркоманией и предложен действенный метод для пресечения одного из видов наркотрафика – транспортировка наркоконтейнеров в ЖКТ человека (наркокурьера). Использование для этой цели наиболее эффективного способа выявления таких наркокурьеров – рентгенографии – требует снижения доз облучения подозреваемых до уровня, разрешенного действующим законодательством. В ходе выполнения работы выбран оптимальный вариант досмотровой системы и разработана наиболее совершенная система регистрации на основе детектора прямого счета квантов. Проведены исследования и сделаны необходимые расчеты, которые подтверждены экспериментально.

1. Разработка конструкции детектора прямого счета квантов

В ходе выполнения проекта был предложен новый метод регистрации рентгеновских квантов методом прямого счета, на который в 2015 году был получен патент РФ № 2545338. Работа детектора основана на применении микропиксельных лавинных фотодиодов KETEK (PM1125NS –SBO) и сцинтиллятора LFS-3. Метод прямого счета обладает двумя достоинствами, которые имеют важное значение при наблюдении слабоконтрастных объектов: полное отсутствие собственных шумов детектора и способность разделять кванты по их энергии, что дает возможность применить взвешивающие коэффициенты для квантов разных энергий и этим улучшить снимок. Конструкция детектора предусматривает защиту от света и от рассеянного излучения. Длина входной диафрагмы 800 мм, высота – 3 мм, шаг пикселей – 1,6 мм, расчетная эффективность – 90%. При выполнении проекта были сделаны расчеты с целью оценки возможности видения на снимке слабоконтрастных объектов (наркоконтейнеров) внутри тела человека при дозах, разрешенных СанПиН 2.6.1.3106 -13.



Рисунок 1. Видны проглоченные наркоконтейнеры в ЖКТ, но нечетко. Доза — 0,45 мкЗв.

Для расчетов были взяты следующие исходные данные: химический состав героина примерно тот же, что и у тела человека; доза облучения (эффективная) – 0,3 мкЗв; плотность героина – 1,35г/см³; вес наркотика в контейнере – 10г; размеры содержимого контейнера 50x12x12 мм³; положение контейнера внутри тела – наклон 45° к направлению луча; толщина сплошной ткани в районе ЖКТ – 20см; напряжение на трубке – 100кВ; эффективность детектора – 90%. Результаты расчетов: сигнал от контейнера в вышеупомянутом положении (отклонение от окружающего фона) – 2,9%, δ шума от

статистики (в пикселе) – 7%; δ шума от статистики на изображении контейнера – 0,54%. По формуле Rose, объект можно наблюдать на экране, если сигнал от него как минимум в 5 раз превышает δ шума на его изображении. В нашем случае, имеем превышение: $2,9 / 0,54 = 5,4$ раза, что позволит уверенно наблюдать «удачно» расположенные контейнеры. Результат расчетов подтвержден выявлением наркокурьеров на таможенных аэропортов Новосибирска и Иркутска с помощью прототипов установки (рис.1). Задача создания специализированной системы с более высоким качеством снимка и пониженной дозой облучения вполне реальна.

2. Выполнение измерений характеристик фрагмента детектора прямого счёта квантов.

Проведено сравнительное исследование характеристик многоканальной ионизационной камеры (МИС) и 32-канального прототипа счетного детектора на основе микропиксельных лавинных фотодиодов КЕТЕК (PM1125NS-SB0) и сцинтиллятора LFS-3. Одной из наиболее иллюстративных характеристик детектора является квантовый выход детектора, определяемый как $DQE = SNR_{out}^2 / SNR_{in}^2$, где SNR – отношения сигнал-шум на входе и выходе системы. На рисунке 2 представлены измеренные значения для МИС (слева) и счетного детектора (справа).

Из представленных данных видно, что счетный детектор позволяет получить более высокое соотношение сигнал шум, особенно в области низких нагрузок. Для иллюстрации разницы между этими двумя типами детекторов на следующем рисунке представлен снимок тест-объекта для измерения проникающей способности по стали. Тест-объект представляет собой ступенчатый стальной клин, на задней стороне которого расположена полоска из свинца шириной 1 см и толщиной 1 мм.

Фотографии результатов исследований представлены на рис. 3. Как и ожидалось, счетный детектор с высокой эффективностью регистрации (~ 90%) и, практически, нулевыми собственными шумами позволяет получить более высокое качество снимков при той же дозе облучения. Цифры на ступеньках стального клина означают толщину этих ступенек (мм).

Результаты измерений свидетельствуют, что и МИС и детектор прямого счета могут быть использованы для обнаружения слабоконтрастных объектов. Аппаратный шум МИС составляет $\delta \sim 1,5$ кванта, и, практически, не ухудшает изображение, а в основном детекторе

он вообще отсутствует. Эффективность МИС ниже, чем у основного детектора, и составляет ~ 65%, но все равно достаточна для использования в установках для выявления наркокурьеров. Доза при применении такого детектора, конечно, будет выше ~ на 15 %, чем при использовании детектора прямого счета квантов, и составит ~ 0,5 мкЗв. Для соблюдения основного требования СанПиН 2.6.1.3106 -13 – не превышать годовую эффективную дозу в 300 мкЗв – даже такая доза позволяет обследовать человека до 600 раз в год.

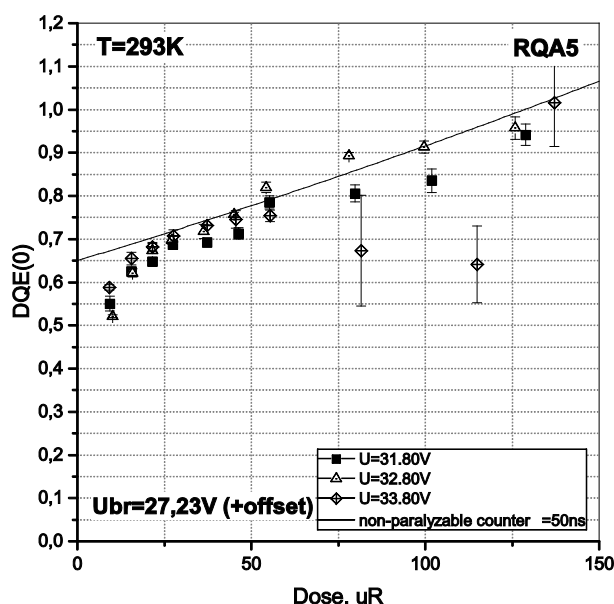
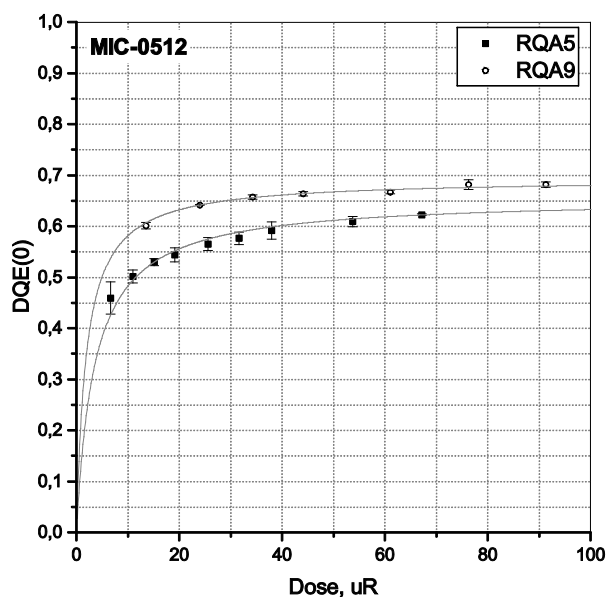


Рисунок 2. Результаты измерения. RQA5, RQA9 – стандартные спектры тестового излучения (вверху), U_{br} – напряжение начала лавинного усиления (внизу).

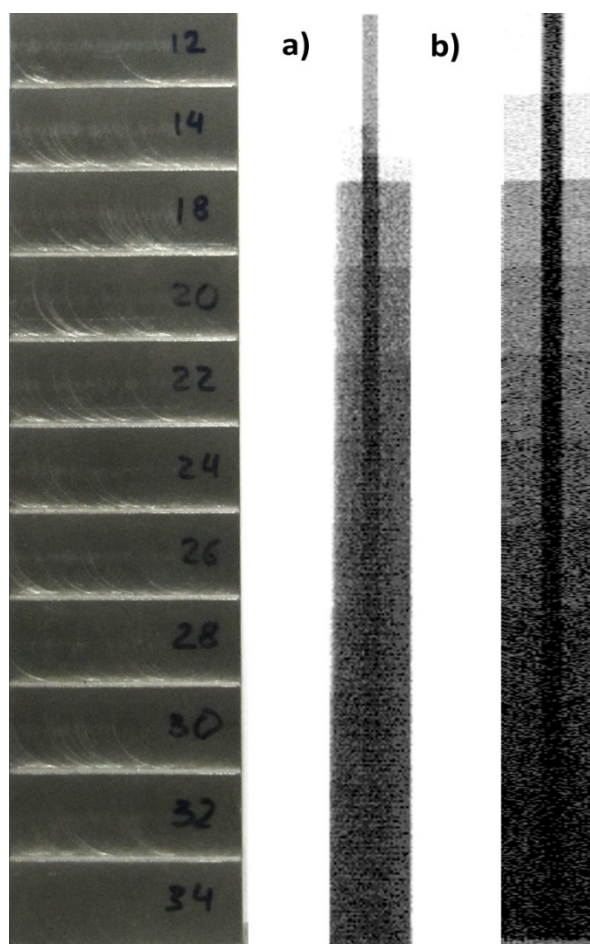


Рисунок 3. Результаты исследований: фотография тест-объекта (слева), снимок, полученный на установке, оборудованной МИС-детектором (в центре), снимок, полученный на установке с прототипом счетного детектора (справа).

3. Разработка конструкции упрощённого варианта детектора на базе многоканальной ионизационной камеры

В ходе выполнения проекта был также разработан более простой и дешевый вариант детектора на базе многоканальной газовой ионизационной камеры (МИС), на который получен патент РФ № 2530903. Внешний вид этого детектора показан на рис. 4. Детектор помещен в прочный корпус (труба из сплава D16T), заполненный ксеноном под давлением 20 атм. В трубу помещены две плоскости – анодная, представляющая собой сплошную поверхность, на которую подано напряжение 1 кВ, и низковольтную катодную, разделенную на полоски (стрипы). К каждому стрипу подключен электронный тракт, измеряющий заряд, накопленный на полоске за время одной строки изображения. Детектор на базе МИС имеет внешние параметры, одинаковые с параметрами детектора прямого счета квантов: размеры входного окна

и шаг пикселей. Различия: МИС является детектором аккумулирующего типа с наличием собственных шумов, хотя и очень незначительных; эффективность МИС ниже, чем у основного детектора, и составляет ~ 65%; электроника обработки аналоговой информации, чтения и передачи данных в компьютер вынесена за пределы корпуса МИС-детектора и размещена в отдельном металлическом корпусе. Сравнение измеренных характеристик МИС-детектора приведено в следующем разделе отчета.



Рисунок 4. Вид детектора на базе МИС. Сверху – внешняя электроника.

4. Разработка принципиальных электрических и электромонтажных схем установки

Разработанная в ходе выполнения проекта рентгенографическая установка представляет собой сложное устройство, полностью управляемое и контролируемое от компьютера. Его электронику и электромеханику можно разделить на следующие части:

- Управление источником рентгена и контроль его параметров;
- Управление сканирующей механикой и контроль ее положения;
- Чтение данных с детекторов;
- Управление полуавтоматической дверью;
- Аудио- и видеосвязь с обследуемым.

Необходимые схемы разработаны, монтаж коммуникаций между элементами системы будет реализован в начале 2017 года. При разработке схемы управления установкой мы старались максимально использовать стандартизованные изделия (привод двери, щит с узлами управления сканирующей механикой, инвертор редуктора и т.п.).

Заключение

Проверена правильность выбранных решений, принятых при разработке сканера; создан и испытан фрагмент детектора прямого счета квантов, а также разработан детектор на базе МИС; экспериментально измерены параметры детектора прямого счета квантов и МИС-детектора; проведено сравнение параметров

этих детекторов. Намечена программа работ на 2017 год, в котором должен быть завершен этот проект:

1. Сборка пилотного образца установки персонального досмотра.
2. Выполнение дозиметрических исследований.
3. Испытания пилотного образца установки персонального досмотра.

Учитывая важность и актуальность решаемой задачи, в конце 2017 года пилотный образец будет подготовлен для демонстрации соответствующим заинтересованным государственным структурам.

Список использованных источников

- [1] J.Beutel, H.L.Kundei, R.L.Van Metter. Handbook of Medical Imaging. //Vol.1. Physics and Psychophysics. SPIE Press, USA, (2000), p.p. 43-45.
- [2] Baru S.E., Makarov I.R., Savinov G.A. at al. Digital X-ray imaging installation for medical diagnostics. //Nucl. Instr. and Meth., A238, (1985), p.p.165-169.
- [3] Samei E., Lo J.Y., Yoshizumi T.T., Jesneck J.L., Dobbins J.T., Floyd C.E., McAdams H.P., Ravin C.E. Comparative scatter and dose performance of slot-scan and full-field digital chest radiography systems. // Radiology. 2005; V.235, №3, p.p. 940-949.
- [4] Baru S.E., Khabakhpashev A.G., Shekhtman L.I.. Multiwire proportional chamber for a digital radiographic installation.// Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A 283 (1989) p.p. 431-435.
- [5] Babichev E.A., Baru S.E., Khabakhpashev A.G. et al. Digital radiographic device based on MWPC with improved spatial resolution. // Nucl. Instr. and Meth., A323(1992), p.p.49-53.
- [6] Babichev E.A.,Baru S.E., Groshev V.R., Khabakhpashev A.G. et al. The new effective detector for digital scanning radiography. //Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A513 (2003), p.p. 57-60.
- [7] Белова И.Б., Китаев В.М. Малодозовая цифровая рентгенография (малодозовая рентгенографическая установка «Сибирь»). Орел, 2001, 159 с.
- [8] Бару С.Е. Эффективный персональный досмотр – гарантия безопасности полетов» // Аэрокосмическое обозрение, №4, 2007, с. 210-211.
- [9] Бару С.Е. Установка персонального досмотра для предотвращения терактов на стратегически важных объектах // Бергколлегия, 7 (58), 2009, с.44-45.
- [10] Бару С.Е. Системы сплошного и выборочного досмотров людей и багажа для предотвращения терактов. //Труды VIII Международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам», СПб, 2012 , с. 293-298.

II.2П Комплексная программа СО РАН. Создание специализированных приборов и устройств для экспериментов с использованием мощного терагерцового излучения Новосибирского ЛСЭ

Введение

В ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН создан мощный лазер на свободных электронах, длина волны которого может изменяться в широких пределах в терагерцовой и инфракрасной областях спектра. В качестве источника электронов в нем используется многооборотный ускоритель с рекуперацией энергии, который имеет пять прямолинейных промежутков. В трёх из них установлены ЛСЭ, работающие в разных диапазонах длин волн (90-240 мкм для первого, 37 – 80 мкм для второго и 5 – 20 мкм для третьего).

Первый и второй лазеры на свободных электронах были запущены соответственно в 2004 и 2009 годах, и в настоящее время работают на пользователей. Они являются самыми мощными в мире источниками узкополосного излучения в своих диапазонах. Излучение первых двух лазеров на свободных электронах применяется для экспериментов по биологии, физике и химии. Запуск третьего лазера на свободных электронах существенно и вывод его излучения на пользовательские станции расширяет диапазон, доступный для научных пользователей.

1. Разработка узлов оптического коммутатора для вывода излучения из ЛСЭ третьей очереди

В соответствии с планом работ были сконструированы и изготовлены основные узлы оптического коммутатора для вывода излучения из ЛСЭ третьей очереди.

Канал вывода излучения предназначен для вывода излучения из ускорительного зала в помещения для пользователей. Из-за сильного поглощения излучения в воздухе необходимо передавать излучение по трубам, заполненным сухим азотом, или откачанным до низкого давления. Первый вариант предпочтительнее вследствие простоты вывода широких пучков излучения на пользовательские станции через тонкие полипропиленовые окна.

Для потребителей удобно иметь излучение ЛСЭ третьей очереди (длины волн 8 – 20

микрон) на уже существующих пользовательских станциях, работающих с излучением ЛСЭ первой и второй очереди (длины волн 40 – 240 микрон). Поэтому канал вывода излучения ЛСЭ третьей очереди должен вводить излучение в существующую систему распределения излучения. Оптическая схема нового канала изображена на рисунке 1. При выведенном зеркале 7 на станции подается излучение ЛСЭ первой очереди, а при введенном - излучение ЛСЭ третьей очереди. Тороидальное зеркало 5 переводит сильно расходящийся пучок излучения в почти параллельный (с большими поперечными размерами и малой дифракционной расходимостью).

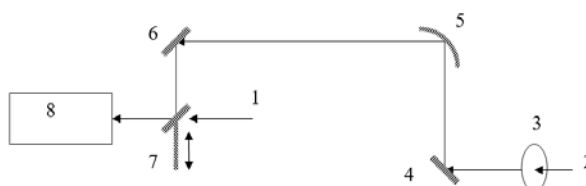


Рисунок 1. Оптическая схема канала вывода излучения. 1 – излучение ЛСЭ первой очереди, 2 - излучение ЛСЭ третьей очереди, 3 – алмазное окно, 4 и 6 – неподвижные плоские зеркала, 5 – тороидальное зеркало, 7 – вводящееся плоское зеркало, 8 – система распределения излучения по станциям.

2. Разработка новых экспериментальных станций для исследования взаимодействия терагерцового излучения с веществом

Продолжались разработка и создание новых пользовательских станций. Субмиллиметровое и инфракрасное излучение сильно поглощается парами воды. Поэтому для вывода излучения лазера на свободных электронах используется канал, заполненный сухим азотом. В местах поворота направления канала расположены цилиндрические объёмы с зеркалами. Вывод излучения в помещение, где будут расположены новые станции, показан на рисунке 3.

3. Выполнение экспериментальных исследований на станциях ЛСЭ

Продолжалось выполнение экспериментальных исследований на станциях ЛСЭ. В 2016 г. установка работала на пользователей около 1000 часов. Эксперименты выполняли 18 научных групп.



Рисунок 2. Зал новых пользовательских станций с системой вывода излучения.

Заключение

Работы, проделанные в 2016 г., позволят существенно расширить возможности проведения экспериментов с использованием мощного субмиллиметрового и инфракрасного излучения. Состояние работ на установке описано в статье (см. приложение). В 2017 г. запланированы:

1. Испытание нового оптического коммутатора.
2. Начало регулярной работы с коротковолновым (7-20 микрон) излучением на пользовательских станциях.

Соглашения о сотрудничестве между ИЯФ и зарубежными лабораториями

Название лаборатории		Область сотрудничества	Год	Координатор(ы)
1	Daresbury Англия	Генерация и использование СИ.	1977	Г. Кулипанов (ИЯФ); И. Мунро (Daresbury)
2	BESSY Германия	Создание вигглеров для BESSY-2.	1993	А. Скринский, Н. Мезенцев (ИЯФ); Э. Яшке (BESSY)
3	Иссл. центр Россендорф (Германия)	Физические исследования источника нейтронов на базе магнитной ловушки.	1994	А. Иванов (ИЯФ); К. Ноак (Германия)
4	Ядерный центр "Карлсруэ" (Германия)	Разработка концептуального проекта и базы данных для нейтронного источника на ГДЛ. 2. Моделирование процессов в диверторе ИТЕР.	1994	А. Иванов, А. Бурдаков (ИЯФ); Г. Кесслер (Германия)
5	GSI (Германия)	Сотрудничество в области физики ускорителей: электронное охлаждение, электрон-ионные коллайдеры.	1995	Ю. Шатунов, В. Пархомчук (ИЯФ); Х. Эйкхоф (GSI)
6	DESY (Германия)	Физика элементарных частиц, синхротронное излучение, физика и технология ускорителей, электроника и экспериментальное оборудование.	1995	А. Скринский, Г. Кулипанов (ИЯФ); А. Вагнер, К. Шерф (DESY)
7	SIEMAT (Испания)	Ускорительные технологии и физика плазмы.	2007	Е. Левичев (ИЯФ); Ж. Рубио (SIEMAT)
8	CELLS (Испания)	Сотрудничество в области использования нового оборудования для источников СИ.	2008	Е. Левичев (ИЯФ); Джоан Бордас и Орпинелл (CELLS)
9	INFN (Италия)	Разработка интенсивного источника радиоактивных ионных пучков для экспериментов по физике ядра.	1984	П. Логачев (ИЯФ); Л. Теккио (INFN)
10	Унив. Милана (Италия)	Теоретические и численные исследования динамического хаоса в классической и квантовой механике.	1991	А. Скринский (ИЯФ); Т. Монтегацца, Дж. Казати (Италия)
11	INFN-LNF (Италия)	Разработка проекта коллайдера DAFNE-II	2004	Е. Левичев (ИЯФ); С. Бискари (INFN-LNF)
12	Унив. Падуи (Италия)	Разработка криогенных детекторов для экспериментов по физике нейтрино.	2008	А. Бондарь (ИЯФ); А. Гудлиelmi (Италия)
13	Национальный ядерный центр. Парк ядерных технологий (Казахстан)	Разработка и использование промышленных ускорителей, генерация и использование нейтронных пучков, разработка источников СИ, ВЧ-генераторов.	2007	Г. Кулипанов (ИЯФ); К. Кадыржанов, А. Кусаинов (Казахстан)
14	Национальный университет им. Аль-Фараби (Казахстан)	Создание и развитие многоцелевого научно-исследовательского комплекса радиационных технологий и терагерцового излучения.	2009	Г. Кулипанов (ИЯФ); К. Кадыржанов, Б. Жумагулов (Казахстан)
15	Институт современной физики, Ланчжоу (КНР)	Сотрудничество в области физики ускорителей: электронное охлаждение, ВЧ-системы.	2000	В. Пархомчук (ИЯФ); С. Янг (КНР)
16	Компания Воер, г. Шеньжень (КНР)	Использование электронного ускорителя ИЛУ-10, обмен специалистами, информацией и экспериментальным оборудованием.	2005	А. Брызгин (ИЯФ); Лео Ли (КНР)

17	SINAP (КНР)	Исследования в области промышленных электронных ускорителей.	2006	А. Брызгин (ИЯФ); Ху Хонкью (КНР)
18	ИНЕР (КНР)	Работа китайских учёных на установках ИЯФ, работа учёных из ИЯФ на установках ИНЕР.	2007	А. Скринский (ИЯФ); Х. Чен (ИНЕР)
19	Центр кооперации с Россией и Белоруссией (КНР)	Обмен информацией о разработках ИЯФ и потребностях китайских предприятий в технологиях и продукции.	2009	Д. Григорьев (ИЯФ); Чжан Хун-Вей (КНР)
20	POSTECH (Корея)	Создание ускорителей пучков, дополнительных устройств, эксперименты по СИ.	1992	А. Скринский, Н. Мезенцев (ИЯФ); Х. Ким (POSTECH)
21	KAERI (Корея)	Создание ЛСЭ и ускорителя-рекуператора.	1999	Н. Винокуров (ИЯФ); Б.С. Ли (KAERI)
22	BNL, Брукхевен (США)	1. Измерение магнитной аномалии мюона. 2. Совместные работы по спину.	1991	Дж. Банс, С. Озаки (BNL); Ю. Шатунов (ИЯФ)
23	ANL, Аргонн (США)	1. Эксперименты с поляризованной газовой мишенью. 2. Аппаратура для синхротронного излучения (СИ).	1988 1993	Р. Холт (ANL); Г. Кулипанов, А. Скринский (ИЯФ);
24	Унив. Питтсбурга (США)	Эксперименты на ВЭПП-2М и ϕ -фабрика.	1989	С. Эйдельман, Е. Солодов (ИЯФ); В. Савинов (США)
25	Унив. Дюка (США)	Лазеры на свободных электронах.	1992	Н. Винокуров (ИЯФ); Й. Ву (Duke)
26	BNL, Брукхевен (США)	Сотрудничество по электрон-ионным коллайдерам.	1993	В. Пархомчук (ИЯФ); И. Бен-Зви (США)
27	FERMILAB (США)	Сотрудничество в области физики ускорителей: охлаждение, системы конверсии.	1993	В. Пархомчук (ИЯФ); О. Финли (FERMILAB)

Научное руководство ИЯФ СО РАН

Члены Российской академии наук

Академики РАН:

*Диканский Николай Сергеевич
Кулипанов Геннадий Николаевич
Логачев Павел Владимирович
Пархомчук Василий Васильевич
Скринский Александр Николаевич*

Члены-корреспонденты РАН:

*Бондарь Александр Евгеньевич
Винокуров Николай Александрович
Тихонов Юрий Анатольевич
Фадин Виктор Сергеевич
Шатунов Юрий Михайлович*

Дирекция

Директор:

Научный руководитель:

Советник РАН:

Учёный секретарь:

Заместители директора по научной работе:

Логачев Павел Владимирович

Скринский Александр Николаевич

Кулипанов Геннадий Николаевич

Ракшун Яков Валерьевич

Бондарь Александр Евгеньевич

Бурдаков Александр Владимирович

Иванов Александр Александрович

Левичев Евгений Борисович

Мезенцев Николай Александрович

Тихонов Юрий Анатольевич

Ученый совет

Академик РАН Логачев П.В. – председатель

Член-корр. РАН Бондарь А.Е. – зам. председателя

Доктор физ.-мат. наук Бурдаков А.В. – зам. председателя

Доктор физ.-мат. наук Иванов А.А. – зам. председателя

Доктор физ.-мат. наук Левичев Е.Б. – зам. председателя

Доктор физ.-мат. наук Мезенцев Н.А. – зам. председателя

Академик РАН Скринский А.Н. – зам. председателя

Член-корр. РАН Тихонов Ю.А. – зам. председателя

Кандидат физ.-мат. наук Ракшун Я.В. – ученый секретарь

Кандидат технических наук Брызгин А.А. – председатель профкома

Сурин И.В. – председатель Совета молодых ученых

Доктор физ.-мат. наук Багрянский П.А.

Доктор технических наук Батраков А.М.

Доктор физ.-мат. наук Беклемишев А.Д.

Доктор физ.-мат. наук Блинов В.Е.

Кандидат физ.-мат. наук Васильев А.В.

Член-корр. РАН Винокуров Н.А.

Доктор физ.-мат. наук Григорьев Д.Н.

Академик РАН Диканский Н.С.

Доктор физ.-мат. наук Дружинин В.П.

Кандидат физ.-мат. наук Золотарев К.В.

Доктор физ.-мат. наук Иванов И.А.

Доктор технических наук Колмогоров В.В.

Доктор физ.-мат. наук Кооп И.А.

Кандидат физ.-мат. наук Краснов А.А.

Доктор технических наук Куксанов Н.К.

Академик РАН Кулипанов Г.Н.

Доктор физ.-мат. наук Логашенко И.Б.

Доктор физ.-мат. наук Лотов К.В.

Доктор физ.-мат. наук Мешков О.И.

Доктор физ.-мат. наук Мильштейн А.И.

Академик РАН Пархомчук В.В.

Кандидат физ.-мат. наук Пиминов П.А.

Кандидат физ.-мат. наук Полосаткин С.В.

Доктор физ.-мат. наук Середняков С.И.

Кандидат физ.-мат. наук Старостенко А.А.

Член-корр. РАН Фадин В.С.

Член-корр. РАН Шатунов Ю.М.

Кандидат физ.-мат. наук Шварц Д.Б.

Кандидат физ.-мат. наук Шевченко О.А.

Кандидат технических наук Шиянков С.В.

Доктор физ.-мат. наук Эйдельман С.И.

ФАНО России
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ГODOVOЙ ОТЧЕТ ИЯФ СО РАН
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПО ГОСУДАРСТВЕННОМУ ЗАДАНИЮ
за 2016 год

Ответственный за выпуск М.В. Кузин
Работа поступила 20.03.2017 г.

Сдано в набор 25.03.2017 г.

Подписано в печать 30.03.2017 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 14,5 печ.л., 11,6 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 2

Обработано на РС и отпечатано
