

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 2015 год

Новосибирск 2016

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	7
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 многопробочном магнитном поле	19
14.1.4 Создание первой очереди плазменной ловушки нового поколения ГДМЛ	28
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	33
15.1.2 Поиск новой физики в экспериментах при высоких энергиях	36
15.1.3 Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах и редких распадах	44
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	51
15.2.2 Изучение процессов рождения и распадов адронов на встречных электрон-позитронных пучках	53
15.2.3 Исследования электромагнитной структуры легких адронов и ядер	60
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	65
15.3.2 Развитие методов получения высокой интенсивности электронных и позитронных пучков ускорительного комплекса ВЭПП-4 для экспериментов по ФВЭ, ядерной физике и СИ	70
15.3.3 Развитие метода круглых пучков при работе коллайдера ВЭПП-2000 для экспериментов по физике высоких энергий в широком диапазоне энергий	73
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	78
15.4.2 Исследование и оптимизация эффективности инжекции электронов и позитронов инжекционного комплекса ВЭПП-5	79
15.4.3 Исследование новых методов ускорения заряженных частиц	82
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,	86

медико-биологических исследований и терапии рака	
15.5.2 Развитие методов электронного охлаждения в установках мегавольтного диапазона	89
15.5.3 Электронные пучки большой мощности для фундаментальных и технологических применений	93
15.5.4 Разработка нейтронного источника на базе сильноточного ускорителя – тандема	98
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	104
15.6.2 Разработка и изготовление специализированных генераторов синхротронного излучения с использованием сверхпроводящих или постоянных магнитов	107
15.6.3 Разработка оптимальных вариантов создания источников рентгеновского излучения нового поколения	109
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	113
15.7.2 Исследования быстропротекающих процессов с наносекундным разрешением с использованием рентгеновского СИ	123
15.7.3 Развитие методов нанодиагностики на базе Новосибирского ЛСЭ	127
Участие ИЯФ в международных программах и проектах	133
Научное руководство ИЯФ СО РАН	136

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 Логачев Павел Владимирович.

В настоящее время ИЯФ СО РАН – самый крупный академический институт страны (более 2800 сотрудников). Среди 426 научных сотрудников Института – 9 академиков и членов-корреспондентов РАН, 63 доктора и 168 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 2015 года Учёный Совет ИЯФ признал следующие результаты:

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

1. В ИЯФ СО РАН с лучшей в мире точностью измерено сечение электрон-позитронной аннигиляции в адроны области энергии 3,12-3,72 ГэВ с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М.

2. В ИЯФ СО РАН разработаны аэрогелевые черенковские счетчики со сбором света с помощью переизлучателей спектра с высоким ка-

чеством идентификации частиц, на уровне лучших систем, используемых в экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах.

3. В ИЯФ СО РАН в серии прецизионных экспериментов с детектором КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с лучшей в мире точностью измерены массы J/ψ - и $\psi(2S)$ - мезонов.

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

5. В ИЯФ СО РАН в эксперименте с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с наилучшей статистической точностью измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$, изучены промежуточные состояния.

6. В эксперименте ВаВаг с наилучшей в мире точностью измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ при рекордно высоких энергиях - от 2,6 до 7,5 ГэВ. Обнаружено свидетельство распада $\psi(3770) \rightarrow K^+K^-$.

7. Обнаружен эффект усиления пропорциональной электролюминесценции в аргоне двухфазных детекторах – прототипах детекторов темной материи.

8. Впервые вычислена аномальная размерность излома на Вильсоновской линии в трёхпетлевом приближении.

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

1. На первом и единственном в мире четырёхдорожечном ускорителе-рекуператоре ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН запущен третий лазер на свободных электронах, что позволило расширить диапазон (6 - 240 микрон) длин волн, доступный для пользователей излучения

2. В ИЯФ СО РАН разработан и создан сверхпроводящий многополюсный вигглер для генерации мощного синхротронного излучения с косвенным охлаждением магнита с использованием криогенных кулеров

3. В ИЯФ СО РАН на Новосибирском ЛСЭ впервые в терагерцовом диапазоне получены вращающиеся бесселевы пучки. Впервые обнаружена зависимость эффективности генерации поверхностных плазмон-поляритонов от направления вектора Пойнтинга пучка на границе метал-диэлектрик (совместная работа ИЯФ СО РАН, Самарского государственного аэрокосмического университета, НГУ, ИХКиГ СО РАН).

4. В ИЯФ СО РАН на пучках синхротронного излучения коллайдера ВЭПП-4 реализован метод малоуглового рентгеновского рассеяния с временем экспозиции одной дифрактограммы в 70 пикосекунд, позволивший впервые наблюдать динамику развития неустойчивости Рэля-Тейлора и процесс образования металлических наночастиц над оловом и танталом при ударном воздействии (совместная работа ИЯФ СО РАН, ИГИЛ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, РФЯЦ ВНИИТФ).

В области физики плазмы:

1. В ИЯФ СО РАН разработана и создана принципиально новая нерезонансная фотонная ловушка, с помощью которой получена конверсия пучка отрицательных ионов в нейтралы с эффективностью, близкой к 100%.

2. Создан уникальный стенд для испытания материалов стенки вакуумной камеры экспериментальных термоядерных реакторов при мощном импульсном тепловом воздействии. На стенде впервые получены результаты по динамике образования микрочастиц в процессе эрозии вольфрамовых пластин при импульсном нагреве, моделирующем тепловые нагрузки в диверторе токамака ИТЭР.

3. Впервые в мире создан ионный источник с извлекаемым током пучка протонов до 175 А, что превосходит почти вдвое известные аналоги. На базе ионного источника создан уникальный инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов водорода с энергией 15 кэВ и мощностью 2 МВт для нагрева плазмы в магнитных ловушках.

4. Впервые разработан и успешно опробован в эксперименте метод создания мишенной плазмы в открытой магнитной ловушке путем СВЧ пробоя при импульсном напуске рабочего газа.

В 2015 году доктору физико-математических наук, член-корреспонденту РАН Василию Васильевичу Пархомчуку была присуждена премия Вильсона 2016 года за ключевой вклад в экспериментальную и теоретическую разработку метода электронного охлаждения.

Международная премия им. И.Я. Померанчука 2015 года была присуждена доктору физико-математических наук, профессору Виктору Сергеевичу Фадину за результаты, посвященные высокоэнергетичным процессам в КЭД и КХД.

За достижения в области пучков заряженных частиц был награжден Медалью ЦЕРН 2015 года им. Дитера Мёля научный руководитель ИЯФ СО РАН, доктор физико-

математических наук, академик РАН Александр Николаевич Скринский. Премия ЦЕРН для молодых ученых 2015 года им. Дитера Мёля была присуждена кандидату физико-математических наук Максиму Игоревичу Брызгунову.

Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых в 2015 году была присуждена Дмитрию Анатольевичу Старостенко.

В отчетном году в Институте продолжали работу три диссертационных Совета с правом приема докторских (кандидатских) диссертаций. Всего проведено 12 заседаний, на которых были защищены 1 докторская и 11 кандидатских диссертаций.

Для учащихся, студентов, преподавателей школ и вузов, сотрудников других организаций и гостей Института было проведено более 30 экскурсий по установкам ИЯФ, которые посетило около 1000 человек, проведены выездные лекции в Новосибирских школах.

№ 14.1.1 Осесимметричные открытые ловушки с улучшенным продольным удержанием

Введение

В отчете представлены результаты работ по развитию методов диагностики плазмы, а также результаты экспериментальных исследований 2015 года на установке ГДЛ. Полученные в 2015 году на ГДЛ и представленные в отчете результаты исследований 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.

1 Разработка проекта новых диагностик: томографической системы измерения профиля плотности плазмы по многохордовому ослаблению атомарных пучков и системы анализа энергетических спектров ионов, покидающих ловушку через пробки

1.1 Разработка томографической системы для измерения профиля плотности плазмы

Для контроля параметров инжектируемых нейтральных пучков, восстановления линейного профиля плотности плазмы и положения центра плазменного шнура разработан проект и создана измерительная система, использующая томографический метод. Система регистрации (рис. 1) состоит из набора вторично-эмиссионных датчиков (1) с коллиматорами (2), совмещёнными с проволочным калориметром (3) необходимым для измерения ослабления прошедшего пучка.

Томографическая система реализована на основе метода многохордового зондирования плазменного столба атомарными пучками от восьми инжекторов, которые предназначены для нагрева плазмы. С противоположной стороны от инжекторов (рис. 2) в баках приёмников пучков расположены системы регистрации.

Регистрируя сигналы с вторично-эмиссионных датчиков в разрядах без плазмы и с плазмой, можно измерить ослабление каждого пучка по восьми разнесённым в простран-

стве хордам, вычислить линейную плотность плазмы, а затем, используя адекватный алгоритм решения обратной задачи, восстановить плотность плазмы $n(r)$ в плоскости зондирования. Рисунок 3 поясняет принцип измерений.

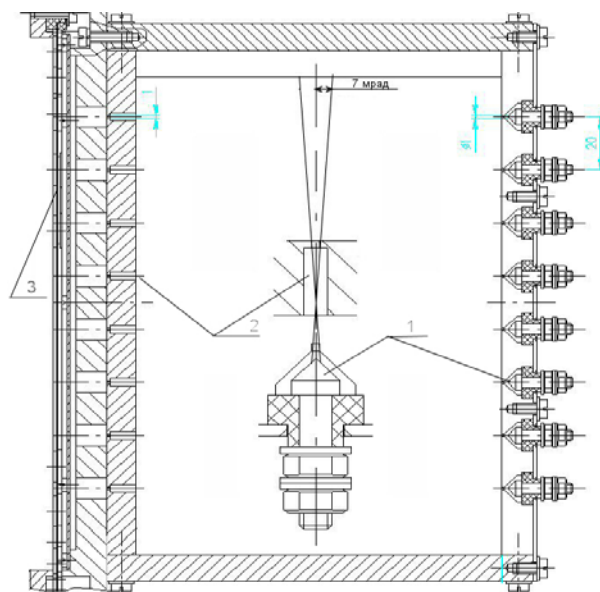


Рисунок 1. Система регистрации прошедшего пучка: 1 – вторично-эмиссионный датчик, 2 – коллиматор, 3 – проволочный калориметр.

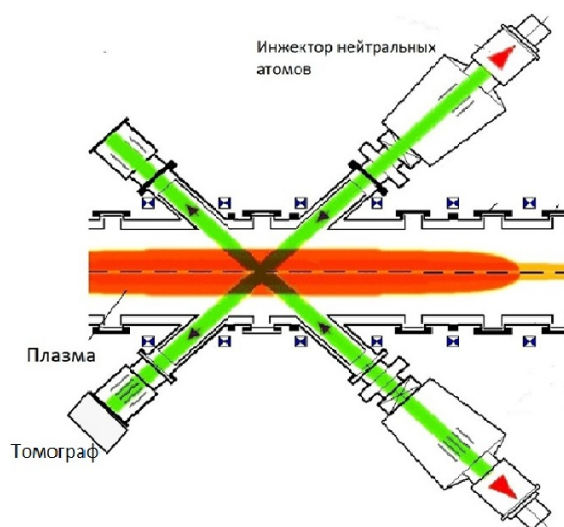


Рисунок 2. Расположение детекторов ослабления атомарных пучков на установке ГДЛ

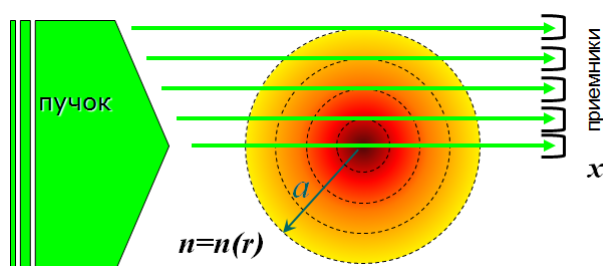


Рисунок 3. Многохордовое ослабление пучка.

$$\tau(y) = \int_{-\sqrt{a^2-y^2}}^{\sqrt{a^2-y^2}} n(\sqrt{x^2+y^2}) dx - \text{ослабление}$$

$$n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^a \frac{\tau'(y)}{\sqrt{y^2-r^2}} dy - \text{уравнение Абеля}$$

На рис. 4 показана фотография одного из измерительных модулей, который установлен в баке-приёмнике одного из пучков.

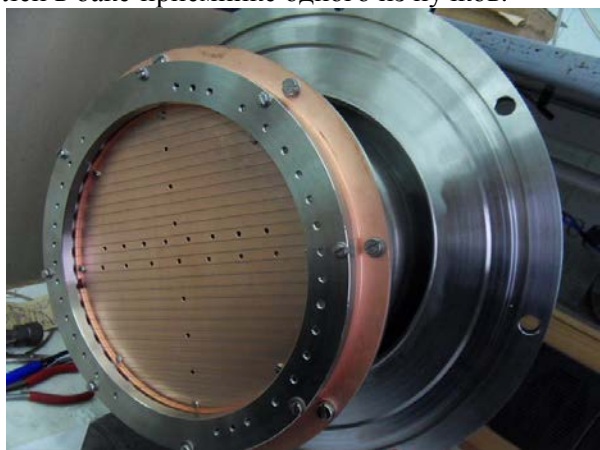


Рисунок 4. Блок приёмника пучка одного из атомарных инжекторов с установленными в нём датчиками для многоордových измерений и проволоочным калориметром.

Следует отметить, что наблюдаемая в эксперименте нестабильность углового распределения частиц в пучке нагревного инжектора заметно осложняет использование томографического метода для восстановления линейной плотности плазмы на установке ГДЛ. Тем не менее, использование реализованной системы регистрации прошедших пучков с помощью двухкоординатной линейки вторично-эмиссионных датчиков и проволоочного калориметра, позволяет с высокой точностью производить измерения захватываемой в плазму мощности и контролировать в каждом рабочем выстреле установки параметры атомарных инжекторов.

1.2 Система анализа энергетических спектров ионов

Разработан проект анализатора энергетических спектров ионов, покидающих магнитную ловушку через пробки. По результатам проектирования создана, отлажена и введена в строй на установке ГДЛ соответствующая диагностика. Прототипом диагностики является пятиканальный энергоанализатор, изначально разработанный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Прибор был существенно модернизирован и адаптирован для работы на установке ГДЛ. Данный анализатор предназначен для измерения энер-

гетического спектра заряженных либо нейтральных частиц, покидающих экспериментальную установку. Также в приборе имеется ионный источник (4 на рис. 5), предназначенный для энергетической калибровки каналов. Пройдя вакуумный затвор (5 на рис. 5) и коллимирующие входные диафрагмы, поток частиц, покинувших ловушку вдоль силовых линий магнитного поля, проходит через сепаратор (6 на рис. 5). В данной работе в качестве сепаратора использовался электромагнит, так как он позволяет получить большее отношение энергий: $E_{\max}/E_{\min} = 7.5$. Прибор позволяет анализировать ионы с энергиями в диапазоне от нескольких эВ до энергии инжектируемых атомарных пучков в ГДЛ (25кэВ). После прохождения сепаратора плазменный поток очищался от электронной составляющей, и ионы попадали в один из пяти детекторов (7 на рис. 5), в зависимости от их энергии. За сепаратором установлены щели, определяющие энергетическую светосилу каналов регистрации.

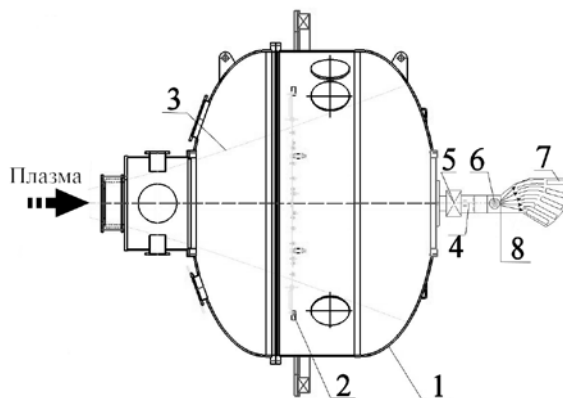


Рисунок 5. Схема эксперимента по изучению энергетических распределений ионов, покидающих ловушку:

1 – бак расширителя, 2 – плазмоприемник, 3 – силовые линии магнитного поля, 4 – ионизационная лампа, 5 – вакуумный затвор, 6 – магнитный сепаратор, 7 – каналы регистрации, 8 – энергоанализатор.

На рис. 6 в качестве примера результатов измерений приведены энергетические спектры ионов, покинувших центральную часть установки во время развития альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости (АИЦН). Экспериментальные данные на рисунке 6 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 подтверждает

предсказание теории о том, что в резонансе с волной находится группа ионов с энергией близкой к максимальной и угловым разбросом близким к разбросу инжектируемых атомарных пучков. В процессе торможения и рассеяния частицы выходят из области резонанса, не достигая конуса потерь, и эффективно отдают свою энергию электронам мишенной плазмы, тем самым нагревая ее. Оценка относительной мощности потерь дает для разных моментов времени значения 0.2% и 0.5% соответственно. Этот экспериментальный факт позволяет сделать исключительно важный вывод о том, что потери энергии из ловушки во время развития неустойчивости малы по сравнению с мощностью, захватываемой мишенной плазмой во время ее нагрева мощными атомарными пучками.

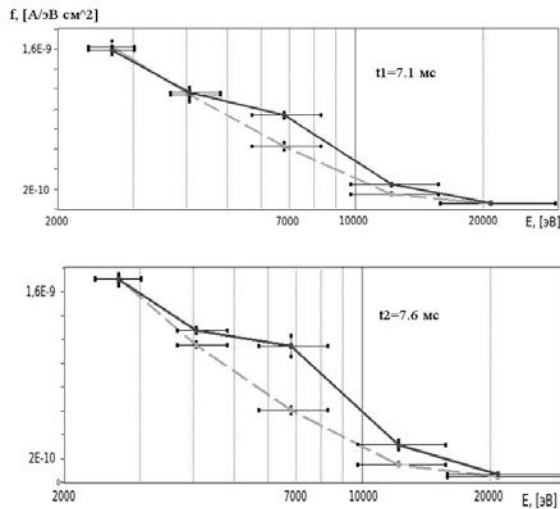


Рисунок 6. Распределение частиц по энергиям в моменты, соответствующие максимальным амплитудам электромагнитных колебаний при развитии АИЦН (сплошная линия), и в момент, предшествующий развитию неустойчивости (пунктир), для различных времен возникновения и для различного энергосодержания в популяции быстрых ионов, соответственно.

Кроме того, анализ спектров для быстрых ионов, покидающих ловушку в продольном направлении, показывает, что мощность продольных потерь, связанная с быстрыми ионами, не превышает одного процента от захваченной мощности атомарных пучков. Этот результат хорошо соответствует данным численного моделирования, основанного на теории кулоновских столкновений, что в свою очередь позволяет сделать вывод об отсутствии аномалий в скорости рассеяния горячих ионов. Аномалии рассеяния могут быть связаны как с развитием микронеустойчивостей, так и с

нарушением адиабатичности движения ионов вследствие несовершенства магнитной системы. Более подробное описание диагностики для анализа спектра ионов, покидающих ловушку, а также результатов исследований, проведенных с использованием данной диагностики, можно найти в [1].

2 Измерение радиальных профилей относительного давления, электронной температуры и плотности плазмы в зависимости от условий дополнительного ЭЦР нагрева плазмы в ГДЛ. Оптимизация условий дополнительного ЭЦР нагрева

На установке ГДЛ проведена серия измерений радиальных профилей относительного давления, электронной температуры и плотности плазмы. Измерения проведены в условиях дополнительного ЭЦР нагрева в двух режимах:

- 1) В режиме с поглощением СВЧ мощности в относительно узкой приосевой области плазменного столба. В этом режиме удается достичь максимальных значений электронной температуры;
- 2) С поглощением микроволнового излучения в области, характерный радиус которой сравним с радиусом плазмы. В этом режиме регистрируется увеличение времени жизни горячих ионов с ростом электронной температуры, что является главной целью экспериментов с дополнительным нагревом.

Данные режимы ЭЦР нагрева реализуются при различных положениях поверхности циклотронного резонанса относительно точки пересечения оси пучка СВЧ излучения с границей плазмы. В случае, если поверхность резонанса приближена к области входа пучка в плазму, реализуется нагрев относительно широкой области. При удалении резонансной поверхности происходит переход к нагреву узкой приосевой области плазмы.

Рисунок 7 в качестве примера демонстрирует результаты измерения радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы в режиме 1 (поглощение СВЧ мощности в узкой области). Измерения радиальных профилей плотности и электронной температуры в условиях дополнительного ЭЦР нагрева были проведены с помощью системы томсоновского рассеяния [2].

Оптимизация условий ЭЦР нагрева в данном режиме позволила достичь рекордных значений электронной температуры ($T_e \approx 0.7$ keV) [3] в ловушках открытого типа, работающих в квазистационарном режиме. Кроме того, по результатам этих измерений удалось сде-

лать очень важный вывод о том, что прирост электронной температуре при дополнительном нагреве хорошо соответствует скейлингу газодинамического удержания плазмы в ловушке [3,4,5]. Эти результаты вместе с рядом предыдущих доказывают перспективность использования магнитных ловушек открытого типа с осесимметричной конфигурацией в качестве нейтронных источников для различных приложений, включая гибридные термоядерно-ядерные реакторы для производства электроэнергии, наработки ядерного топлива и уничтожения радиоактивных отходов [6,7].

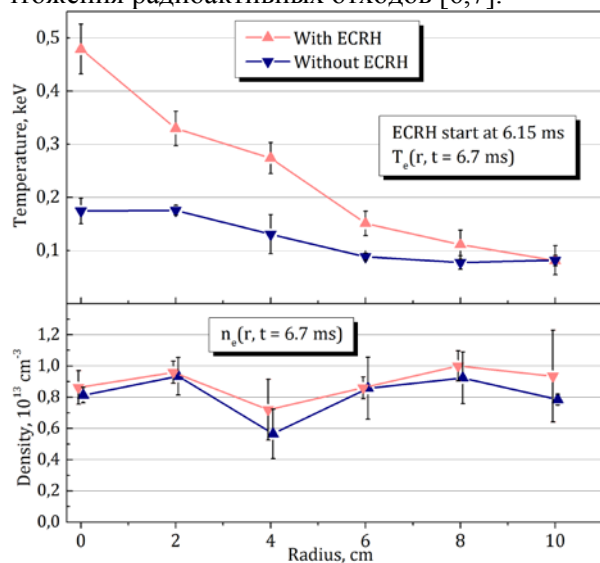


Рисунок 7. Радиальные профили электронной температуры и плотности плазмы в режиме с поглощением СВЧ мощности в относительно узкой приосевой области плазменного столба (точки и линии красного цвета). Для сравнения показаны результаты соответствующих измерений в режиме без дополнительного ЭЦР нагрева (синий цвет).

Измерение радиальных профилей относительного давления плазмы (отношение поперечного давления плазмы к давлению вакуумного магнитного поля $\beta = 8\pi R_{\perp} / B^2$) в условиях дополнительного нагрева мотивировано рассмотрением проблемы МГД устойчивости плазмы при ЭЦР нагреве. Рисунок 8 демонстрирует один из результатов таких измерений, которые были выполнены при помощи пучково-спектроскопической диагностики на основе динамического эффекта Штарка в режиме 2 (поглощение СВЧ мощности в широкой области), где достигался максимальный диамагнетизм в условиях ЭЦР нагрева.

Представленное на рисунке 8 относительное изменение магнитного поля, связанное с диамагнетизмом плазмы, легко пересчитать в относительное давление $\beta = 8\pi R_{\perp} / B^2$ с помощью

уравнения параксиального равновесия, которое для малых значений $\Delta B/B$ с хорошей точностью дает $\beta = 2 \cdot \Delta B/B$. Таким образом, из результатов измерений (рис. 8) следует, что в исследуемом режиме относительное давление не превышало значения $\beta \approx 0,3$. Эта величина далеко не достигает максимальных значений, достигнутых в прежних экспериментах на ГДЛ ($\beta = 0,6$). Следовательно, возможная потеря устойчивости плазмы в данном режиме не может быть связана со слишком большим значением относительного давления. Это обстоятельство оказывается очень полезным для реализации МГД устойчивого удержания плазмы при дополнительном нагреве.

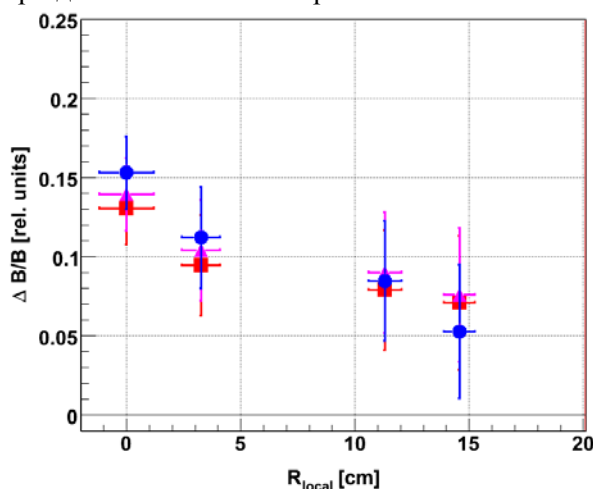


Рисунок 8. Радиальные профили локального диамагнитного возмущения магнитного поля для нескольких плазменных разрядов в режиме 2 с поглощением СВЧ мощности в широкой области. Диамагнитное возмущение нормировано на значение вакуумного магнитного поля.

3 Измерение радиальных профилей относительного давления, электронной температуры и плотности в зависимости от условий инжекции электронного пучка в ГДЛ, оптимизация режимов инжекции пучка

В 2015 г. планировались эксперименты по инжекции электронного пучка в ГДЛ. Для этих целей ранее была создана электронная пушка (рис. 9) со сферически выпуклым термокатодом из LaB₆ 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. Это позволит адиабатически сжимать электронный пучок магнитным полем и пропускать его через пробки ГДЛ с полями ~ 10 Тл. Подобная геометрия электронной пушки успешно используется на установке для получения высоко-зарядных ионов для ускорительного комплекса RHIC [Beebe, E. et al., "Status of the Brookhaven National Laboratory high current electron beam ion source test stand", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, pp. 893-895, February 2000].

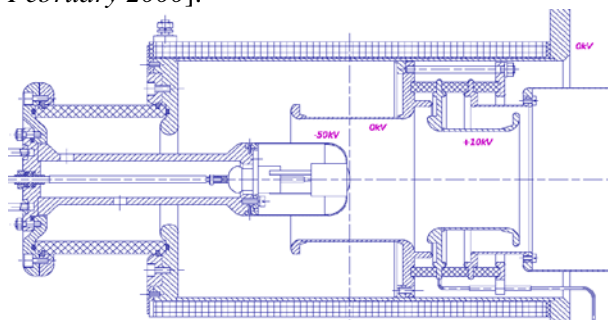


Рисунок 9. Схема электронной пушки. Стрелками показаны возможные пути развития разрядов в магнитном поле приводящих к пробое. Магнитное поле направлено вдоль оси симметрии. 1-катушка, формирующая продольное магнитное поле, 2-катодный электрод, 3- анодная труба, 4-тормозящий электрод.

Новым элементом в электронной пушке является тормозящий электрод, для остановки потока плазмы из ГДЛ, он располагается на кольцевых изоляторах за анодным электродом. Пока неясно, какое напряжение следует подавать на этот электрод и будет ли он работать при столь больших плазменных нагрузках. Стоит отметить, что еще одним новым и мало отработанным элементом стало импульсное питание электронной пушки (высоковольтный модулятор) с управляемым IGBT ключом на полное рабочее напряжение 50 кВ. С одной стороны, это экономит затраты на зарядку 50 мкФ емкости на 50 кВ, так как при рабочем импульсе происходит только ее частичная разрядка. С другой стороны, это приводит к чисто техническим сложностям: необходимости динамического разноса потенциала по отдельным транзисторам ключа во время включения и выключения, необходимости подавления помех в цепях запуска транзисторов при переходных процессах. Наиболее сложным событием для работы ключа является пробой электронной пушки, так как в цепи возникает элемент с

быстроменяющимся импедансом. В период проводимых тестов электронной пушки высоковольтный ключ дважды выходил из строя вследствие пробоев высокого напряжения.

Для стендовых испытаний и отработки различных режимов работы электронной пушки она была размещена на вакуумном стенде с остаточным вакуумом 10^{-3} Па. Такой вакуум значительно отличается от условий на ускорительном комплексе RHIC, где подобная пушка работала при вакууме 10^{-6} - 10^{-8} Па, однако он близок к вакуумным условиям в плазменной установке, работа которой сопровождается газо-напуском, конверсией плазменного потока в газ и т.д.

К настоящему времени были проведены следующие мероприятия:

Мероприятие	Результат
Высоковольтные испытания модулятора на резистивную нагрузку	Полностью успешно, но на напряжение 45 кВ,
Высоковольтные испытания конструкции электронной пушки с холодным катодом (без нагрева катода)	Выяснено что в широком диапазоне напряжений (10-39 кВ) на катоде и различных магнитных полях (от 0,075 до 0,16 Тл) возникает кольцевой разряд, который группируется между катодным электродом и анодной трубой (более подробно далее по тексту)
Высоковольтные испытания конструкции электронной пушки с холодным катодом (без нагрева катода) с применением диэлектрического барьера на катоде	Частично успешно напряжение до 38 кВ, и магнитного поля до 0,16 Тл во время испытаний сгорел высоковольтный ключ
Генерация пучка и его сброс на стенку на расстоянии 1 м, при этом пучок расширятся в продольном магнитном поле до диаметра 400 мм.	Частично успешно, получен пучок длительностью до 10 мс, током 12.5 А, при ускоряющем напряжении 35 кВ, при продольном поле 0,075 Тл, во время работы повторно сгорел высоковольтный ключ модулятора (более подробно далее по тексту)

Как видно из таблицы, реализации программы по инъекции электронного пучка в ГДЛ воспрепятствовали два фактора. Первый фактор чисто технический: несовершенство конструкции высоковольтного ключа, что не позволило поднять ускоряющее напряжение до проектных 50 кВ и получить надежную работу при отработке источника на стенде. Второй фактор физический: возникновение кольцевого высоковольтного разряда в скрещенных полях между катодным электродом и анодной трубой. Визуально он наблюдался как диффузное свечение между катодом и анодом. По осциллограммам определено характерное время зажигания разряда, оно составляет от 150 мкс до нескольких миллисекунд в зависимости от параметров. Простейшим критерием зажигания магнетронного разряда считается равенство высоковольтного зазора и шага циклоиды, по которой движется электрон с катода, в поперечном магнитном поле. Поэтому для разряда в скрещенных полях характерна квадратичная зависимость между напряжением зажигания $U_{\text{зажигания}}$ и магнитным полем B , как для напряжения отсечки в магнетроне, т. е. $U_{\text{зажигания}} \sim B^2$. Экспериментально установлено, что напряжение зажигания разряда приводящего к пробоем электронной пушки растет при увеличении магнитного поля, например для рабочего напряжения 39 кВ критическое продольное магнитное поле будет 0,12 Тл, а для 30 кВ только 0,075 Тл. Конечно, критерий зажигания магнетронного разряда не выполняется строго, так как в нашем случае, возможно, играет роль еще и пеннинговский механизм горения разряда, из-за продольных колебаний электронов между фланцем на изоляторе и катодным электродом, а фланец крепления изолятора к «земле» служит анодом разряда (см. рис. 9). Также все зависимости напряжения пробоя от внешнего магнитного поля меняются при нагреве катода или существенном изменении остаточного давления в камере стенда. В специальном эксперименте, катодный электрод был покрыт диэлектриком, что привело к увеличению высоковольтной прочности, а кольцевой разряд не наблюдался. Поэтому возможное решение проблемы покрытие высоковольтного электрода керамикой. Другим возможным решением будет повышение рабочего напряжения пушки, что увеличит значение критического магнитного поля для зажигания разряда, для чего требуется улучшения качества высоковольтного ключа модулятора, т.е. при увеличении напряжения высоковольтная прочность в данном случае растет(!).

Несмотря на вышеуказанные сложности, в серии опытов найдены устойчивые режимы работы пушки. Пучок генерировался в диоде и выходил вдоль магнитного поля на стенку камеры стенда. Для экспериментов было выбрано магнитное поле 0,075 Тл при котором не наблюдалось зажигания разрядов, приводящих к пробоем пушки, при нагретом катоде. Это поле меньше необходимого расчетного поля в 0,12 Тл, когда реализуется минимальный угловой разброс пучка. Зато это позволяло работать при сравнительно небольших ускоряющих напряжениях в 30-35 кВ, которые допускал имеющийся высоковольтный ключ. При мощности нагрева LaB6 катода электронной пушки составляет 450 Вт, при этом полученный ток пучка был 12,5 А, для ускоряющего напряжения 35 кВ (см левую осциллограмму на рис. 10), что близко к расчетному первеансу пушки в $18 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2}. Размер визуально наблюдаемой вспышки на стенке камеры, диаметром около 40 см, примерно соответствует ходу силовых линий магнитного поля вдоль вакуумной камеры стенда. Путем увеличения длительности отпирающего ключ светового сигнала были получены пучки с длительностью до 10 мс (см правую осциллограмму на рис.10), что перекрывает все потребности для ГДЛ по длительности пучка.

В заключение, отметим, что возникшие в тестовых экспериментах проблемы, преодолимы. Однако требуется более тщательная отработка данного изделия на стенде, как со стороны модулятора, так и получения расчетных – проектных параметров пушки.

4 Изучение равновесных пространственных профилей горячих ионов в режимах с высоким значением β

На установке ГДЛ были проведены эксперименты по исследованию равновесных пространственных профилей давления горячих ионов в режимах с высоким относительным давлением плазмы (отношение поперечного давления плазмы к давлению вакуумного магнитного поля $\beta = 8\pi P_{\perp} / B^2$). 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.

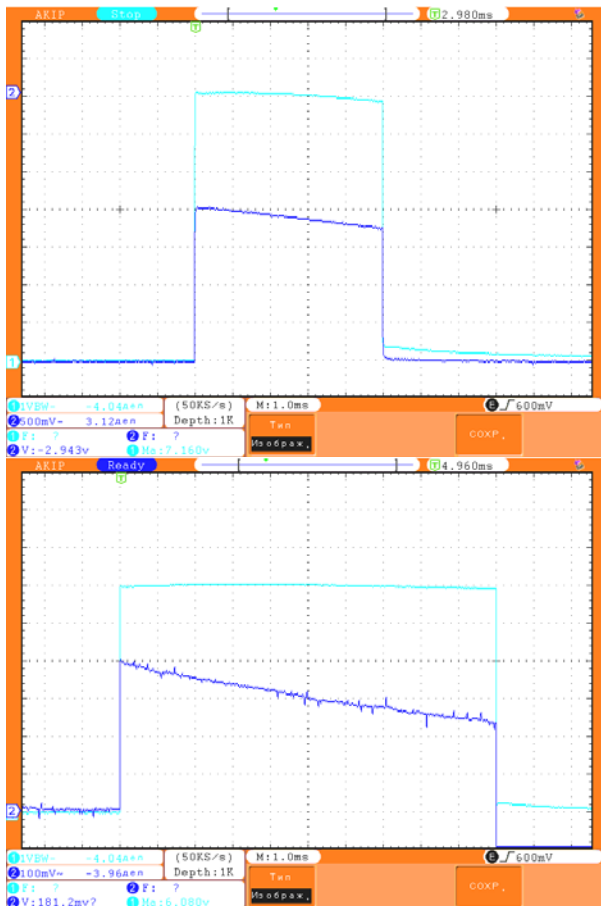


Рисунок 10. Осциллограммы ускоряющего напряжения и тока пучка (тока в цепи высоковольтного модулятора), желтый сигнал - ток пучка 6,25 А/В, красный сигнал – ускоряющее напряжение 5 кВ/В. Продольное поле 0,075 Тл.

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. Этот код включает в себя различные модули, которые используют теорию парных кулоновских столкновений и уравнения классической магнитной гидродинамики. В настоящее время код MCFIT наиболее полно описывает транспорт быстрых ионов, является основным инструментом для 3D-моделирования удержания быстрых ионов в открытой магнитной ловушке с атомарной инжекцией. Результатом численного расчета являлся набор интересующих нас величин в виде дискретного распределения на сетке фазового пространства, определенного пользователем через последовательность временных интервалов. Основные из них: энергосодержание быстрых ионов, захваченная мощность нейтральных пучков, мощность перезарядных потерь, мощность торможения электронов, распределение термоядерных нейтронов, поток нейтронов в заданные участки про-

странства (“детекторы”), функции распределения быстрых ионов по энергиям и питч-углам в магнитной силовой трубке, определяемой радиальным разбиением в центральной плоскости ГДЛ.

Для прямого сравнения результатов численного исследования с данными MSE диагностики код MCFIT вычислял также пространственное распределение азимутальных токов горячих ионов в ловушке, из которого при помощи модуля BiotSavart рассчитывалось диамагнитное возмущение магнитного поля в плазме.

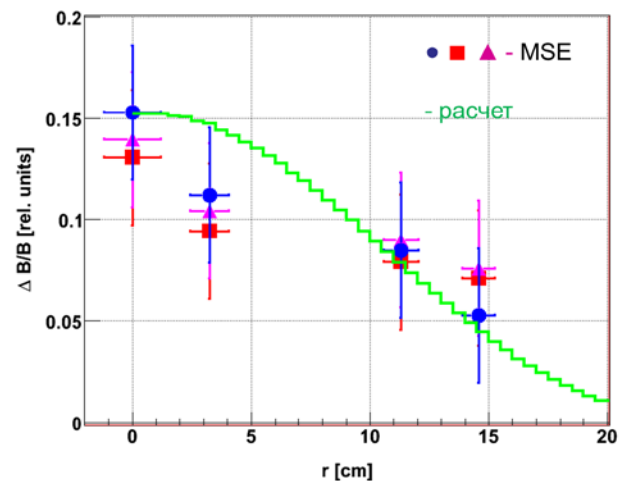


Рисунок 11. Радиальный профиль диамагнитного возмущения $\Delta B/B$ вблизи точки остановки горячих ионов в ГДЛ.

На рис. 11 приведен радиальный профиль диамагнитного возмущения $\Delta B/B$ для сечения плазмы ГДЛ вблизи точки остановки горячих ионов, полученный в эксперименте с помощью MSE диагностики (фигурные точки). На этом же рисунке приведено сравнение экспериментальных данных с данными численного моделирования (сплошная кривая). Как видно, 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.

Заключение

Суммируя результаты проделанной работы, следует сделать вывод, что программа запланированных на 2015 год работ теме № 14.1.1 «Осесимметричные открытые ловушки с улучшенным продольным удержанием» (№ 0305-2014-0001) в основном выполнена. Ис-

ключение составляет пункт 3 программы «Измерение радиальных профилей относительного давления, электронной температуры и плотности в зависимости от условий инжекции электронного пучка в ГДЛ, оптимизация режимов инжекции пучка». Реализация этой части программы натолкнулась на ряд трудностей технического и физического характера. Вместе с тем результаты проведенных стендовых испытаний позволили выявить возникшие проблемы и наметить пути их решения. В настоящий момент спроектирована новая версия высоковольтного модулятора для электронной пушки, приобретены и изготовлены в производстве необходимые механические и радиокомпоненты, начаты работы по сборке. Эксперименты с инжекцией электронного пучка на установке ГДЛ запланированы на 2016 год.

В заключение представим дополнительную информацию о публикациях по результатам работ по теме № 14.1.1.

Программа работ, результаты которых представлены в публикациях 3, 4 и 6 (см. список использованных источников) была частично реализована в рамках проекта Министерства образования и науки РФ для развития комплекса уникальных установок «ДОЛ» (проект RFMEFI61914X0003). Однако, важно заметить, что упомянутый проект касался только развития инфраструктуры экспериментальных установок и не предусматривал проведения экспериментальных исследований. Публикация 1 из сборника трудов конференции Европейского физического общества по физике плазмы в настоящее время еще не включена в базу данных РИНЦ, однако, труды этой весьма престижной конференции в течение срока масштаба одного года входят в базу данных SCOPUS и, соответственно, в РИНЦ.

Список использованных источников

- [1] Anikeev, A.V., Bagryansky, P.A., Korobeinikova, O.A., Murakhtin, S.V., Zaytsev, K.V., Yurov, D.V. Experimental observation of axial ion loss during the Alfvén ion-cyclotron instability in the GDT mirror. In Proceedings of 42nd EPS Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 22-26 June 2015, EUROPHYSICS CONFERENCE ABSTRACTS. Vol. 39E ISBN 2-914771-98-3, Contrib. Index: P5.124 (<http://ocs.ciemat.es/EPS2015PAP/html/author.html>).
- [2] Максимов В.В., Солдаткина Е.И., Соломахин А.Л., Яковлев Д.В. Измерения электронной температуры в экспериментах по резонансному циклотронному нагреву плазмы на установке ГДЛ. В Книге: XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 90.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Багрянский П.А., Анিকেев А.В., Беклемишев А.Д., Господчиков Е.Д., Зайцев К.В., Иванов А.А., Коваленко Ю.В., Колесников Е.Ю., Коробейникова О.А., Лизунов А.А., Максимов В.В., Мурахтин С.В., Пинженин Е.И., Приходько В.В., Савкин В.Я., Солдаткина Е.И., Соломахин А.Л., Шалашов А.Г., Юров Д.В., Яковлев Д.В. Термоядерный источник нейтронов на основе осесимметричного пробкотрона: ключевые физические проблемы и пути их решения. В КНИГЕ: XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 53.
- [6] Anikeev, A.V., Prikhodko, V.V., Yurov, D.V. Parameters of a fusion neutron source based on the recent GDT experimental data and possible applications. FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY. Vol. 68, Issue 1, 2015, p. 70-75.
- [7] Анিকেев А.В., Аржанников А.В., Багрянский П.А., Беклемишев А.Д., Иванов А.А., Приходько В.В., Цидулко Ю.А., Юров Д.В. Проект нейтронного источника на основе открытой ловушки с учетом последних экспериментальных достижений в ИЯФ СО РАН. В КНИГЕ: XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 75.

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

Введение

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 нагревательный 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 отдельном 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.

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

1 Выбор ионно-оптической системы формирования пучка большой длительности с интенсивным водяным охлаждением

В результате ионно-оптических и термодинамических расчетов выбраны варианты трехэлектродной и четырехэлектродной многоцелевых ионно-оптических систем для формирования мощных ионных пучков большой длительности. Электроды этих систем имеют внутренние каналы для интенсивного водяного охлаждения. На рис.1 показано сечение электродов трехэлектродной ионно-оптической системы с внутренними водяными каналами. Во-

дяные каналы сначала фрезеруются, а затем заправляются пластинами.

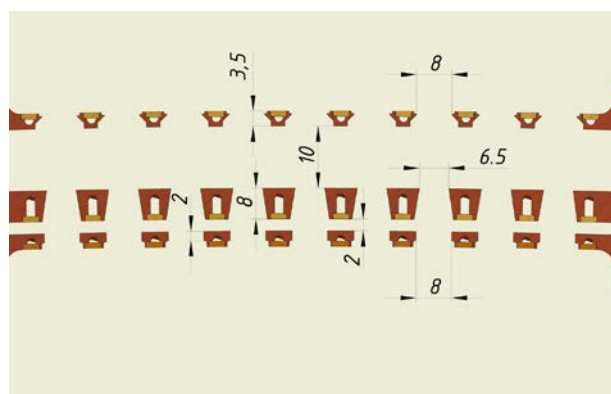


Рисунок 1. Поперечное сечение электродов трехэлектродной ионно-оптической системы с внутренними водяными каналами.

2 Исследование термомеханического поведения 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. На рис.2 приведены рассчитанное распределение температуры в электроде ионно-оптической системы. Максимальная температура прогрева электрода составляет 78 °С. На рис.3 показано распределение тепловых деформаций электрода. Полученные величины деформаций являются приемлемыми для аккуратного формирования ионного пучка.

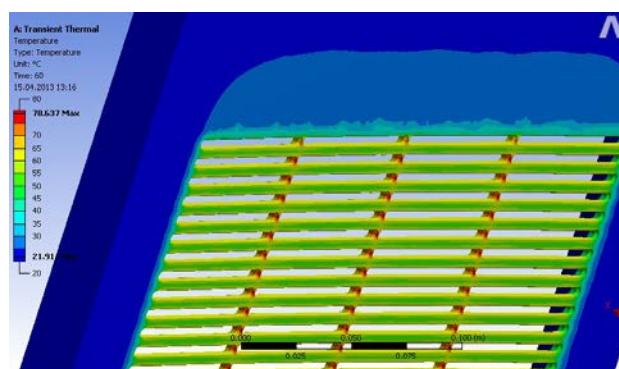


Рисунок 2. Распределение температуры электрода.

Также рассмотрено термомеханическое поведение фарадеевского экрана высокочастотного плазменного эмиттера. Для снятия тепловой нагрузки с экрана требуется прокачка воды по тонкостенным продольным каналам.

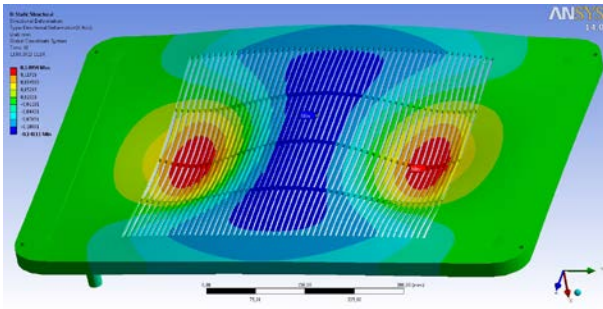


Рисунок 3. Профиль поперечных деформаций электрода.

3 Разработка наиболее критичных систем элементов питания мощного ионного источника

Наиболее критичными системами мощного ионного источника являются 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.

4 Исследование термомеханического поведения элементов атомного драйвера для интенсивных источников ионов Н-

Исследовано термомеханическое поведение элементов атомного драйвера для интенсивных источников ионов Н- с помощью компьютерного кода ANSYS. На рис.4-6 показаны расчетные распределения температуры и напряжений для разрядного канала, анода и прикатодной вставки, соответственно. В соответствии с расчетами наибольший нагрев испытывает прикатодная вставка. Для окончательного уточнения термомеханического поведения элементов атомарного драйвера требуется экспериментальное определение тепловых нагрузок на элементы атомарного драйвера.

5 Оптимизация катодного узла атомного драйвера

В оптимизированном варианте катодного узла атомарного драйвера, показанном на рис.7, эмиттирующие борид лантановые диски нагреваются за счет непосредственного теплового контакта шайбами из терморасширенного гра-

фита (граффлекса), расположенными между дисками. Граффлексовые шайбы нагреваются за протекания тока в поперечном направлении. Такая конструкция катода вследствие исключения перегрева элементов является надежной.

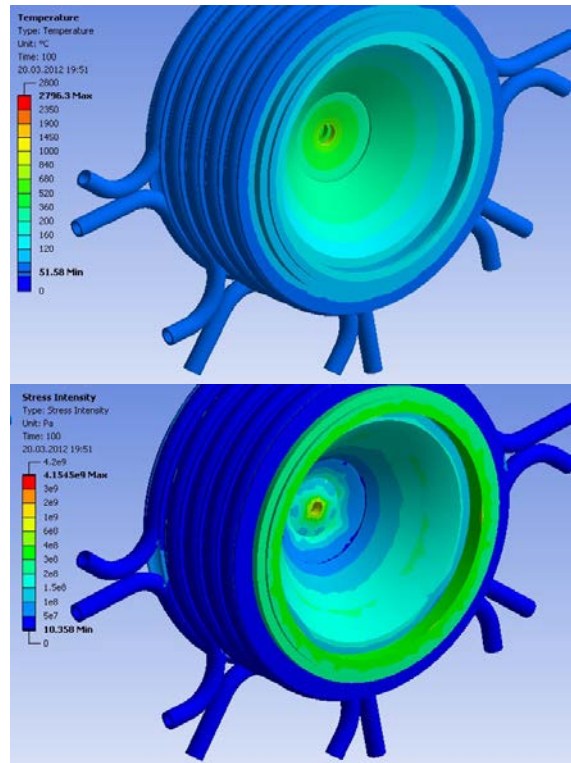


Рисунок 4. Распределения температуры и напряжений в шайбах разрядного канала.

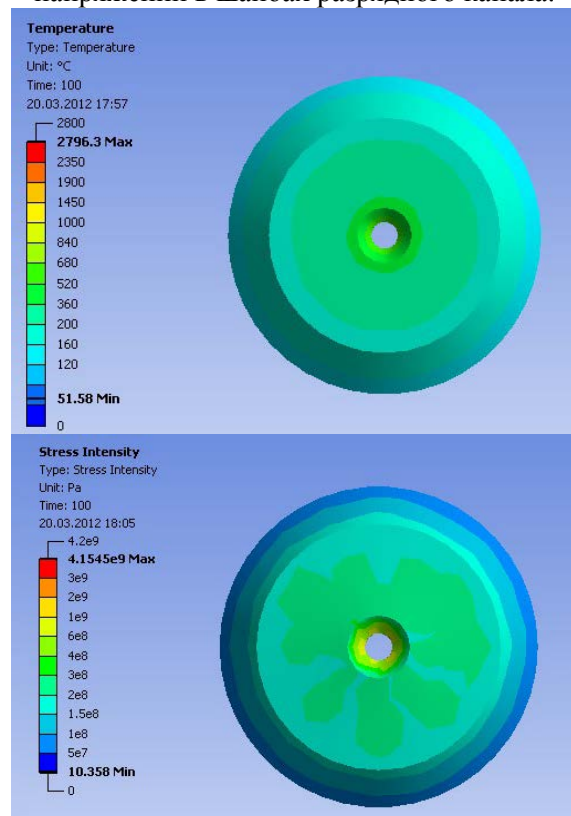


Рисунок 5. Распределения температуры и напряжений в аноде

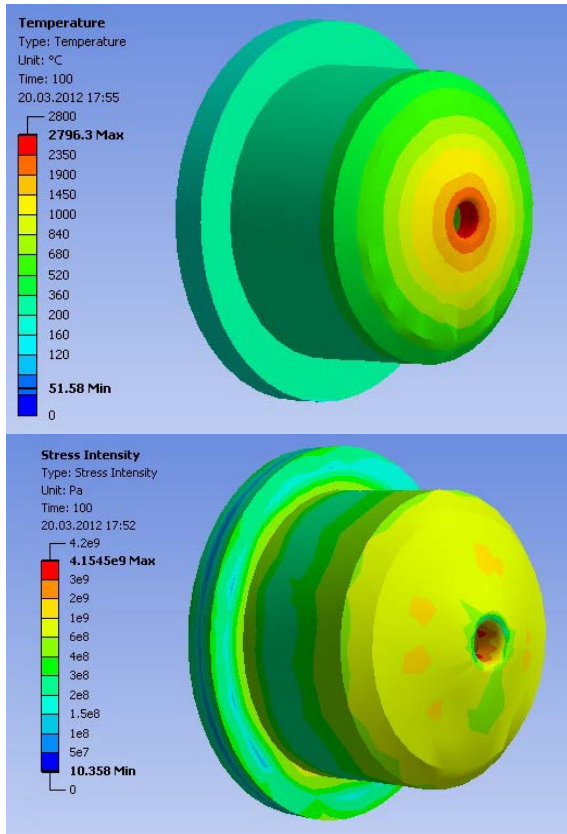


Рисунок 6. Распределения температуры и напряжений в прикатодной вставке.

6 Выбор варианта конвертора драйвера

В выбранном варианте атомарного драйвера, представленном на рис.8, поток водородной плазмы из дугового генератора отклоняется магнитным полем и попадает на поверхность наклоненного конвертора. Конвертор находится под отрицательным потенциалом $\sim 20-50$ В, поэтому ионы ускоряются в ленгмюровском слое вблизи поверхности конвертора. Образовавшийся в результате нейтрализации ионного потока на поверхности поток атомов направляется на поверхность плазменного электрода, покрытого тонким слоем цезия. После столкновения с поверхностью электрода заметная часть атомов отражается в виде отрицательных ионов.

7 Расчеты траекторий заторможенных ионов в рекуператоре ионных пучков

Проведены расчеты траекторий заторможенных ионов в рекуператоре. Результаты расчетов показаны на рис.9. 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.

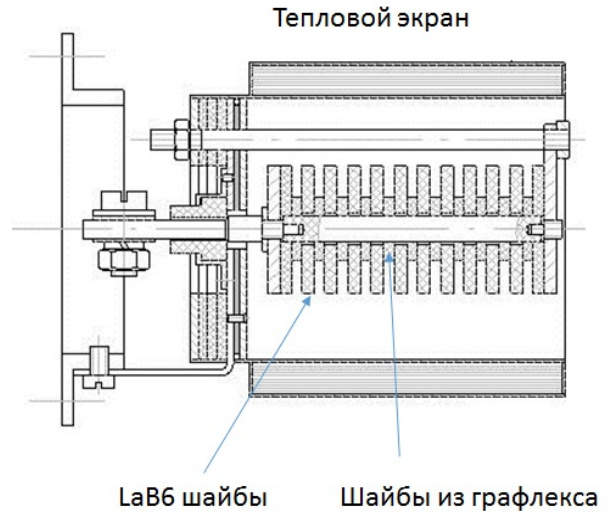


Рисунок 7. Схема катодного узла атомарного драйвера.

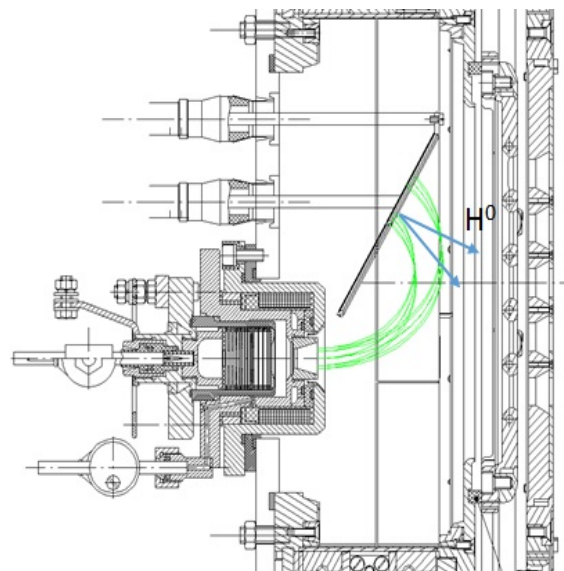


Рисунок 8. Схема атомарного драйвера.

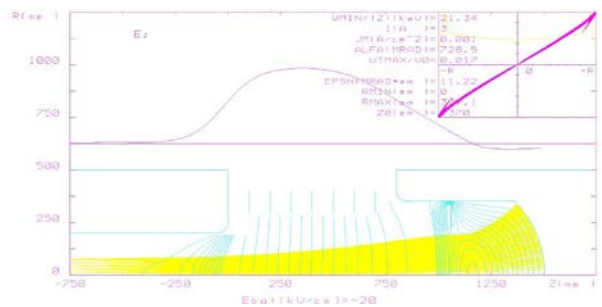


Рисунок 9. Расчетные траектории ионов в рекуператоре. Верхняя кривая - продольное распределение электрического поля в рекуператоре. В правом верхнем углу - фазовый портрет заторможенного ионного пучка.

8 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. Для крепления электродов рекуператора используется надежный вакуумноплотный металлокерамический узел. Внутренний диаметр кольцевых электродов является достаточно большим для вакуумной откачки водорода, нейтрализованного на коллекторе.

Заключение

Работы, успешно выполненные в 2015 г. являются принципиально важными для создания мощного перезарядного инжектора пучков быстрых атомов водорода для нагрева плазмы с большой длительностью импульса и для разработки инжектора атомов высокой энергии на основе интенсивного пучка отрицательных ионов. Результаты, имеющие самостоятельное научное значение, опубликованы в статьях [1 – 5].

Список использованных источников

- [1] Abdrashitov, G.; Belchenko, Yu.; Dranichnikov, A.; Ivanov, A.; Gorbovsky, A.; Kapitonov, V.; Kolmogorov, V.; Kondakov, A.; Konstantinov, S.; Sanin, A.; Selivanov, A.; Selivanov, P.; Shikhovtsev, I.; Sotnikov, O.; Stupishin, N.; Tiunov, M.; Binderbauer, M.; Putvinski, S.; Smirnov, A.; Sevier, L. Negative Ion Production in the RF Multiaperture Surface-Plasma Source, AIP Conference Proceedings, Volume 1655, Article number 40002.
- [2] Fasel, D., Dubray, J., Karpushov, A.N., Kolmogorov, V.V., Perez, A., Siravo, U., Sorokin, A.V. Supply equipment to the new NBH system for the TCV tokamak. Fusion Engineering and Design. Volume 96-97, 1 October 2015, Pages 447-451.
- [3] Karpushov, A.N., Alberti, S., Chavan, R., Davydenko, V.I., Duval, B.P., Ivanov, A.A., Fasel, D., Fasoli, A., Gorbovsky, A.I., Goodman, T., Kolmogorov, V.V., Martin, Y., Sauter, O., Sorokin, A.V., Toussaint, M. Upgrade of the TCV tokamak, first phase: Neutral beam heating system. Fusion Engineering and Design. Volume 96-97, 1 October 2015, Pages 493-497.
- [4] Ivanov A.A., Abdrashitov G.F., Anashin V.V., Belchenko Yu.I., Burdakov A.V., Davydenko V.I., Deichuli P.P., Dimov G.I., Dranichnikov A.N., Kapitonov V.A., Kolmogorov V.V., Kondakov A.A., Sanin A.L., Shikhovtsev I.V., Stupishin N.V., Sorokin A.V., Popov S.S., Tiunov M.A., Belov V.P., Gorbovsky A.I. et al. Development of a negative ion-based neutral injector

in Novosibirsk. Review of Scientific Instruments. 2015. Volume 85. N 2. Article number 02B102.

- [5] Belchenko Yu., Gorbovsky A., Sanin A., Savkin V. The 25 mA continuous-wave surface-plasma source of H⁻ ions. Review of Scientific Instruments. 2015. Volume 85. N 2. Article number 02B108.

№ 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.

Установка ГОЛ-3 обладает развитой инфраструктурой, уникальные особенности которой позволяют проводить фундаментальные и прикладные исследования в нескольких смежных областях знаний, включая 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 2015 году исследования проводились по пяти отдельным научным направлениям. Первым направлением является моделирование и разработка нового поколения инжектора электронного пучка с плазменным эмиттером в импульсно-периодическом режиме. Вторым направлением является подготовка новой экспериментальной базы для проведения экспериментов по исследованию плазмы при инъекции атомарных пучков с мощностью порядка 1 МВт в многопробочную ловушку ГОЛ-3. Третьим направлением работ является исследование импульсного пучкового воздействия большой мощности на перспективные конструкционные материалы первой стенки и плазмоприёмников будущих термоядерных реакторов. Четвёртое направление связано с разработкой проекта генератора терагерцового излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия с высоким уровнем турбулентности. Пятое

направление работ в рамках данной НИР включает в себя проведение экспериментов по изучению планарного мазера на свободных электронах с замыканием поперечных волновых потоков для улучшения стабильности генерации излучения.

Результаты работ по каждому из направлений приведены в соответствующих разделах Основной части отчёта, итоги выполнения работ подведены в Заключение.

1 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.

Было проведено двумерное численное моделирование формирования отдельного элементарного пучка в диоде с плазменными электродами. Также был проведен выбор оптимальной конфигурации электродов и анализ допустимого диапазона параметров катодной и анодной плазмы.

Рассмотрим требования к параметрам электронного пучка и плазмы в ловушке. Для того, чтобы избежать разрушения источника мощным потоком энергии плазмы, выходящей из ловушки, источник размещается в области низкого ($0,03 - 0,04$ Тл), по сравнению с полем 7 Тл в солениде ловушки, магнитного поля. Параметры дейтериевой плазмы в ловушке предполагаются следующими: плотность до 10^{14} см⁻³, температура $1 - 10$ эВ, диаметр $2 - 4$ см. Поток плазмы в ловушке должен обеспечивать стационарную плотность мощности 1 кВт/см² и поток частиц 10^{20} см⁻²с⁻¹ на мишень,

расположенную в магнитном поле ~ 5 Тл. Площадь мишени должна быть, по крайней мере, 5 см^2 (диаметр более 2,5 см). Стационарную плазму предполагается создавать ВЧ-разрядом. Импульсная инжекция электронного пучка с энергией 100 кэВ и средней плотностью тока 1 А/см^2 увеличит в 100 раз (до 100 кВт/см^2) мощность, падающую на мишень, на временах около 1 мс. Такое импульсное увеличение мощности должно имитировать события, связанные с неустойчивостью на краю (ELM) в будущем термоядерном реакторе.

Тем самым определяются параметры источника пучка. Диаметр пучка в магнитном поле $B_{\text{max}} = 7$ Тл в ловушке должен быть $2 \cdot R = 3$ см (соответствующая площадь 7 см^2) и $2R_0 = 42$ см (площадь 1400 см^2) в поле $B_0 = 0,035$ Тл в источнике (коэффициент компрессии пучка $B_{\text{max}}/B_0 \sim 200$); источник пучка с энергией электронов 100 кэВ должен работать в режиме с длительностью импульса ~ 1 мс со средним током пучка ~ 7 А и плотностью тока 1 А/см^2 на мишени. Еще одно требование следует из экспериментов по нагреву плазмы электронным пучком. Для эффективной релаксации энергии пучка необходимо достичь локальной плотности пучка в ловушке $j \sim 1 \text{ кА/см}^2$. Таким образом, условия на средний ток и, главным образом, на плотность тока, входят в противоречие с величиной плотности тока 1 А/см^2 , необходимой для облучения мишени. Возникшее противоречие устраняется выбором многоструйной (пространственно-модулированной) структуры пучка и частотно-импульсным режимом работы.

Выбрана следующая структура источника пучка. На плоском катодном электроде диаметром 40 см проделано 361 эмиссионное отверстие. Они распределены в 19 групп по 19 отверстий в каждой (см. рисунок 1а).

По результатам ранее выполненных экспериментов с плазмэмиссионным диодом и результатам численного моделирования, элементарный пучок может быть экстрагирован через апертуру диаметром 3 мм в плоском катодном электроде, ускорен в диодном зазоре и выведен через апертуру диаметром 3,6 мм в плоском анодном электроде. Апертуры каждой группы расположены в гексагональном порядке внутри окружности диаметром 2 см (см. рисунок 1б) внутри цилиндрического катодного узла диаметром 8 см. (см. рисунок 2)

Такая структура диода была выбрана по следующим причинам:

- Диаметры отдельных апертур выбраны близкими к испытанным в эксперименте;

- Один дуговой генератор плазмы обеспечивает необходимую однородность эмиссионного тока внутри площади 2 см в диаметре. При гексагональном размещении это соответствует 19 апертурам в группе;
- Минимальное расстояние между группами определяется размерами катодного узла и их гексагональным размещением на катодном электроде;
- Полное число узлов выбрано таким, чтобы избежать крупномасштабных возмущений плотности плазмы, нагреваемой пучком.

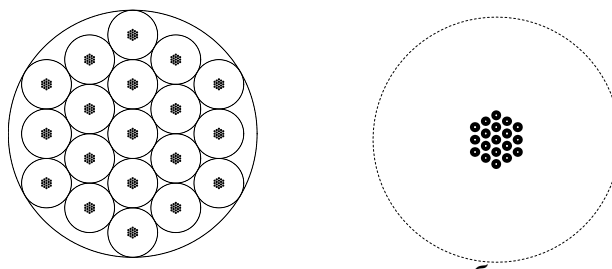


Рисунок 1 – Схема расположения эмиссионных отверстий: а) поверхность катода с 19 группами апертур, наружный диаметр катода равен 40 см; б) увеличенный фрагмент одной группы (один катодный узел) с 19 эмиссионными апертурами. Диаметр узла 8 см, диаметр описанной окружности группы 2 см.

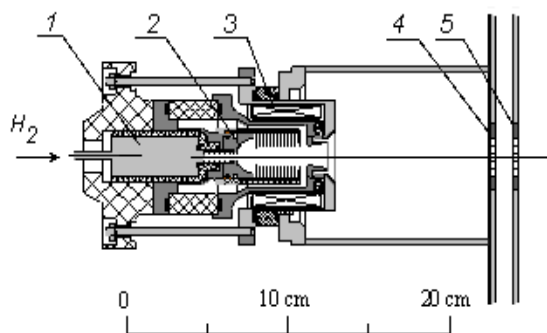


Рисунок 2 – Схема катодного узла. Цифрами обозначены: 1 – газовый клапан, 2 – дуговой канал, 3 – катушка магнитной изоляции дуги, 4 – катодные отверстия, 5 – анодные отверстия.

Тем самым обеспечивается 35,6-кратное увеличение локальной плотности тока (равное отношению площади окружности, охватывающей все апертуры, к площади всех катодных апертур. На следующем шаге мы используем временную модуляцию тока пучка, чтобы получить требуемую мгновенную плотность тока при сохранении ее среднего значе-

ния. Для этого будут использоваться короткие (5 – 10 мкс) импульсы на частоте 8 – 4 кГц, соответственно, со скважностью $\sim 27,8$ и с локальной плотностью тока в ловушке до $j \sim 1$ кА/см² в импульсах. Соответствующий максимальный ток пучка равен $I_B \sim 200$ А.

Итак, электронный пучок с энергией электронов 100 кэВ, сжатый в пространстве и во времени, с максимальным значением импульса тока 200 А, и локальной плотностью тока 1 кА/см² может быть использован для испытания термоядерных материалов. Предположительно, для исследования нагрева плазмы ток пучка должен быть увеличен, по меньшей мере, до 1 кА.

Чтобы пройти через входную магнитную пробку в открытую ловушку, электроны пучка, сформированные его источником, должны иметь питч-углы меньше, чем $\theta_0 \sim (B_0/B_{\max})^{1/2} \sim 0,07$ рад.

Окончательно, отметим основные черты предлагаемой концепции:

- Использование расходящегося магнитного поля для ослабления выходящего из открытой магнитной ловушки потока плазмы до величин, безопасных для работы диода;
- Использование дугового плазменного эмиттера для получения высокой плотности тока в течение большого времени (миллисекунда или больше);
- Использование многоструйной структуры пучка для генерации электронного пучка с высокой локальной и умеренной средней плотностью тока;
- Выбор такой геометрии диода и его режима работы, которая исключает попадание потоков заряженных частиц на электроды и одновременно обеспечивает малые питч-углы электронов пучка;
- Рассмотрение катодной и анодной плазмы в диоде как важной составной части его оптической системы, существенно влияющей на формирование пучка;
- Использование специализированного вычислительного кода для моделирования формирования элементарных пучков в диоде с плазменными электродами, учитывающего характеристики плазмы. Концепция предполагает возможность оптимизации геометрии диода с помощью этого кода.

Рассмотрим результаты численного моделирования. Для моделирования диода с плазменными эмитирующими используется двумерный вычислительный код POISSON-2. Численная оптимизация проведена с одной ячейкой диода, формирующей один элемен-

тарный пучок, с аппроксимацией окружающих электронных пучков граничным условием симметрии на потенциал на боковой стороне системы.

Оптимизированная геометрия источника элементарного пучка и траектории электронов приведены на рисунке 3.

Напряжение на диоде 100 кВ, расстояние катод-анод 1,5 см. Температура электронов катодной плазмы принята равной 5 эВ. На рисунке 3 показаны траектории электронов в диоде без анодной плазмы. Средняя плотность тока через катодную апертуру 40 А/см², ток 2,8 А, питч-углы ускоренных электронов не превышают 0,045 рад. Во втором случае (рисунок 4) в диод втекает анодная плазма с направленной энергией ионов 800 эВ и средней плотностью ионного тока 1 А/см².



Рисунок 3 – Траектории электронов в отсутствие анодной плазмы.

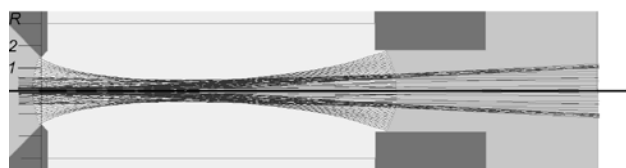


Рисунок 4 – Траектории электронов и ионов в диоде с анодным плазменным потоком.

Электронная температура анодной плазмы задана равной 100 эВ. Как видно, ионный заряд в диоде деформирует поверхность катодной плазмы. При этом максимальный питч-угол электронов увеличивается до 0,052 рад. Средняя плотность эмиссии электронного тока из катодной апертуры ~ 45 А/см², величина тока 3,2 А. В обоих случаях углы допускают 200-кратное сжатие пучка, то есть, для плотности ионного тока меньшей, чем 1 А/см². Оптимальная требуемая плотность эмиссии электронов составляет 40 – 45 А/см² и может задаваться током дугового разряда.

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 загрузкой поверхности диода. Полученное техническое решение

позволяет получить электронный пучок с требуемыми параметрами.

2 Эксперименты по исследованию плазмы при инжекции атомарных пучков с мощностью порядка 1 МВт в многопробочную ловушку ГОЛ-3

Современное понимание физики удержания плазмы в открытых магнитных ловушках реализовано в проекте открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ, который разрабатывается в ИЯФ СО РАН (см. промежуточный отчет по НИР по теме № 14.1.4 “Создание первой очереди плазменной ловушки нового поколения ГДМЛ”, рег. № 0305-2014-0004). В этом проекте предполагается, что поток плазмы, который вытекает из зоны удержания через магнитные пробки, будет дополнительно тормозиться в секциях с многопробочным (гофрированным) магнитным полем.

Экспериментально удержание высокотемпературной плазмы в многопробочной ловушке ранее исследовалось только на установке ГОЛ-3, где плазма нагревалась сильноточным релятивистским электронным пучком до субтермоядерных температур. Нагрев и удержание плазмы в ГОЛ-3 полностью определяются несколькими связанными коллективными процессами, что сильно отличает физику, реализованную в ГОЛ-3, от ожидаемых закономерностей удержания плазмы в ГДМЛ. Помимо этого, важной научной задачей является существенное увеличение длительности эксперимента с удержанием плазмы в многопробочной ловушке и переход от длительности нагрева масштаба 10 мкс, как в предыдущих экспериментах, к длительностям миллисекундного диапазона.

Такие длительности нагрева уже могут быть обеспечены методом инжекции пучков нейтрального водорода поперёк магнитного поля. Технология генерации нейтральных пучков развита в ИЯФ СО РАН на мировом уровне. Однако методика нейтральной инжекции предъявляет к экспериментальной установке ряд специфических требований (в частности, повышенные требования к минимизации давления остаточного газа, наличие окон вакуумной камеры с достаточной апертурой, наличие специализированной центральной ловушки для накопления быстрых ионов и т.п.), которые не могли быть реализованы без изменений конструкции установки ГОЛ-3. Поэтому 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.

Установка ГОЛ-NB будет состоять из центральной пробочной ловушки, двух секций с многопробочным магнитным полем и концевых баков расширителей плазменного потока – см. рисунок 5. Нагрев плазмы в установке будет осуществляться методом инжекции нейтрального пучка (отсюда происхождение индекса NB в названии). Инжекция нейтрального пучка будет производиться в центральную ловушку, представляющую собой классическую аксиально-симметричную открытую ловушку, работающую в режиме газодинамического удержания. В центральной ловушке будет происходить перезарядный захват нейтральных пучков и их торможение в плазме (главным образом за счёт силы трения об электроны). Основные потери плазмы будут происходить вдоль магнитного поля, секции с многопробочным магнитным полем предназначены для подавления продольных потерь частиц и энергии, концевые расширители магнитного потока предназначены для предотвращения потока в плазму холодных электронов с поверхностей плазмприёмников.

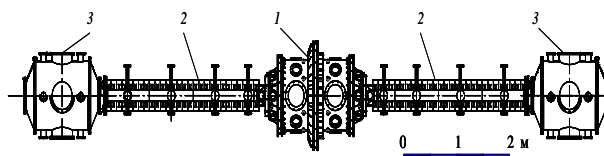


Рисунок 5 – Общий вид проектируемой установки ГОЛ-NB. Обозначения: 1 – центральная ловушка, 2 – секции с многопробочным магнитным полем, 3 – баки концевых расширителей.

Для установки ГОЛ-NB подготавливается система нейтральной инжекции, которая включает в себя два инжектора со следующими паспортными параметрами: энергия до 25 кэВ, ток до 30 А, длительность до 5 мс. Работа по созданию инжекторов и систем питания к ним

проводится по другим источникам финансирования и в данном отчёте не обсуждается.

В отчётный период был завершён физический проект центральной ловушки. В качестве основных рассматривается две конфигурации магнитного поля в центральной ловушке: с минимумом 0,3 Тл и пробочным отношением 15 (левая часть рисунка 6) и с минимумом 0,6 Тл и пробочным отношением 7,5 (правая часть рисунка 6). Произведён расчет магнитной системы, выполнены расчёты механических деформаций центральной ловушки в разных режимах работы (пример расчёта приведён на рисунке 7), завершено рабочее проектирование вакуумного бака центральной ловушки. Проводились работы по созданию вспомогательных систем и узлов.

В целом по данной задаче работы ведутся в соответствии с календарным планом.

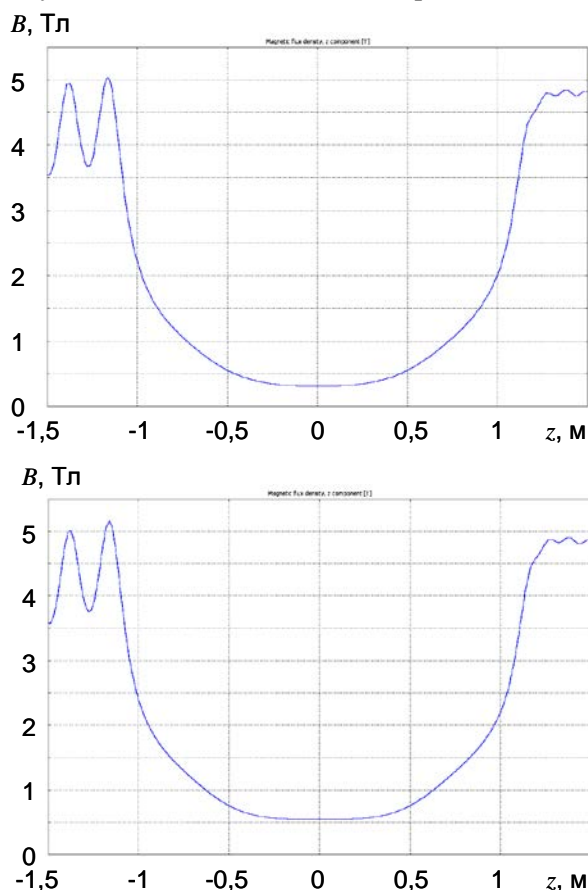


Рисунок 6 – Профиль магнитного поля вдоль оси установки в области центральной ловушки для конфигураций с минимумом 0,3 Тл (слева) и 0,6 Тл (справа). Нейтральная инжекция ведётся на координатах +0,4 м и -0,4 м. На каждой части рисунка левый соленоид показан в конфигурации многопробочного поля, правый – в конфигурации простого соленоида.

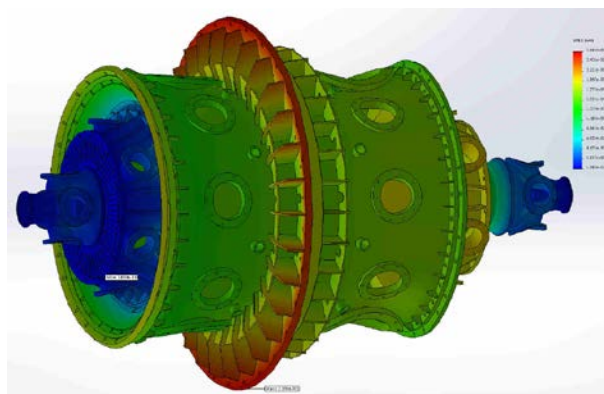


Рисунок 7 – Пример расчёта механических деформаций вакуумного бака центральной ловушки при сценарии аварийного прекращения протекания тока в одной из катушек, создающих магнитное поле. Максимальная деформация составляет 0,3 мм. Масштаб смещений многократно преувеличен для лучшей визуализации.

3 Исследование импульсного пучкового воздействия большой мощности на конструкционные материалы

В 2015 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. Настоящая работа лежит в русле приоритетного направления развития науки РФ «энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и особенно актуальна сейчас, когда эрозия металлической стенки при импульсном тепловом воздействии на неё плазмы является одной из ключевых проблем в строящемся международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР. Ряд особенностей настоящего стенда позволят экспериментально промоделировать условия в ИТЭР и исследовать механизмы эрозии металла точнее, чем это было возможно на имеющихся в мире экспериментальных установках.

Схема экспериментов и расположение основных диагностик показаны на рисунке 8.

Импульсное тепловое воздействие на конструкционные материалы экспериментальных термоядерных реакторов моделируется воздействием мощного электронного пучка на металлическую мишень. Основные параметры электронного пучка на мишени: плотность мощности 10 – 20 ГВт/м² на размере 1 – 2 см² и при длительности воздействия 0,1 – 0,2 мс. Параметр нагрева мишени (heat flux parameter)

при этом достигает величины $F_{HF} \approx (1 - 3) \times 10^2$ МДж·м⁻²·с^{-1/2}. Использование электронного пучка рекордной мощности позволяет избежать излишнего давления потока частиц на расплавленные слои, а также эффекта экранирования потока эрозийным факелом, что приближает условия моделирования на стенде к условиям в диверторе токамака-реактора ИТЕР.

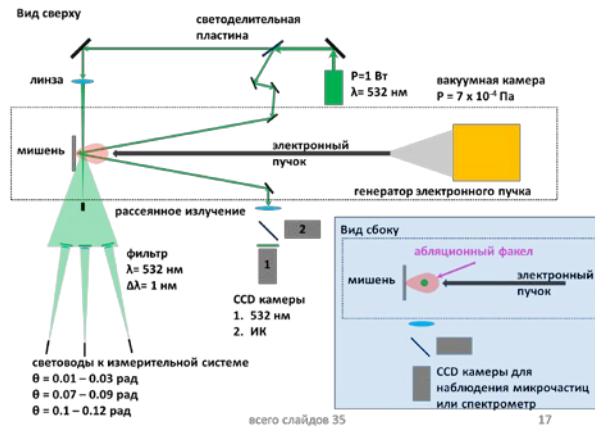


Рисунок 8 – Схема экспериментов и расположение основных диагностик стенда

Кроме того, отсутствие плотной плазмы, характерной для методов моделирования импульсного воздействия на материалы с помощью плазменных ускорителей, позволяет проводить наблюдения поверхности мишени во время нагрева мишени. Это обстоятельство существенно для выяснения механизмов эрозии поверхности при её импульсном нагреве. Динамика изменения поверхности мишени при импульсном пучковом воздействии исследуется с помощью быстрой (минимальное время экспозиции 7 мкс) цифровой фотосъёмки теплового излучения мишени в области 900 – 1000 нм и в свете рассеянного мишенью излучения мощного непрерывного лазера (1 Вт, 532 нм). Продукты эрозии мишени во время и после пучкового воздействия анализируются по результатам измерений с помощью следующих диагностических методик: состав плазменно-газовой фракции эрозийного факела по его спектроскопии с временным и пространственным разрешением, а характерные размеры и скорости микрочастиц в абляционном факеле по рассеянию на малые углы излучения мощного непрерывного лазера (532 нм) и по скоростной фотографии микрочастиц.

Проведены первые эксперименты по пучковому воздействию на мишени из нержавеющей стали и вольфрама при различных интенсивностях пучкового воздействия. Все перечисленные выше диагностические методики продемонстрировали свою работоспособность.

Предварительный анализ результатов показал, что режимы эрозии выбранных материалов пороговым образом зависят от уровня пучкового воздействия (параметра нагрева F_{HF}). При F_{HF} , вблизи порога плавления материала, разрушение поверхности происходит преимущественно за счёт образования трещин, а при существенно более интенсивном воздействии эрозия материала сопровождается образованием и разлётом микрочастиц, которые уносят значительную часть материала с поверхности мишени.

4 Разработка проекта генератора терагерцового излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия с высоким уровнем турбулентности

Разработка проекта генератора терагерцового излучения, базирующегося на пучково-плазменном взаимодействии, должна начинаться с выявления фундаментальных закономерностей, которые определяют процессы накачки электронных плазменных колебаний мощным релятивистским пучком и трансформации этих плазменных волн в электромагнитные. В ходе исследований необходимо установить закономерности выхода электромагнитных волн из плотной плазмы и способы трансформации состава мод в потоке излучения, применительно к выводу его в свободное пространство. Исходя из указанных задач, 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 ГГц, и сопоставлении результатов этих измерений с предсказаниями теоретического рассмотрения генерации излучения в пучково-плазменной системе с соответствующими параметрами.

На рисунке 9 представлена динамика эмиссии терагерцового излучения на частотах выше 0,3 ТГц в поперечном и продольном направлении по отношению к оси плазменного столба при различной плотности плазмы. Из представленного на рисунке результата видно, что эмиссия вдоль плазменного столба реализуется при плотности плазмы около $n_e \approx 5 \times 10^{14}$ см⁻³ и выше. Исходя из этого, спектральный состав излучения, выходящего вдоль плазменного столба, был измерен в условиях высокой ($n_e \approx 1,5 \times 10^{15}$ см⁻³) плотности плазмы. Результат этих измерений с помощью 8-канального полихроматора представлен на рисунке 10 для выстрела пучком #472. В спектре излучения, представленном на рисунке 2 для двух моментов времени, отсчитываемых от начала инжек-

ции пучка, наблюдается три локальных максимума: первый находится чуть ниже 100 ГГц, второй – в диапазоне от 140 до 220 ГГц и третий – в интервале частот 380 – 480 ГГц.

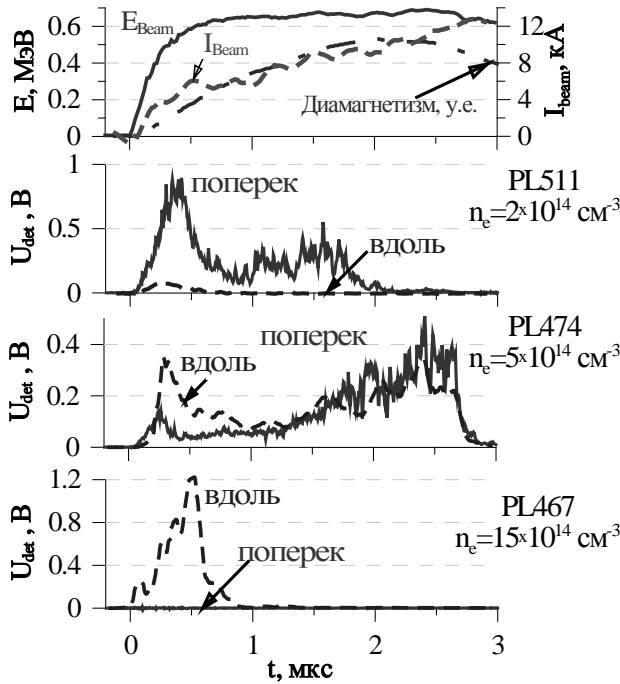


Рисунок 9 – Динамика эмиссии терагерцового излучения на частотах выше 0,3 ТГц в поперечном и продольном направлении по отношению к оси плазменного столба при трех значениях плотности плазмы. Верх рисунка представляет типичную для этой серии экспериментов эволюцию во времени параметров электронного пучка и диамагнетизма плазмы.

Отметим, что спектральный состав эмиссии электромагнитных волн поперек плазменного столба, которая имеет максимум при плотности плазмы $n_e \approx 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, был измерен в предшествующих экспериментах. В спектре эмиссии поперек плазменного столба также наблюдались три области с высокой спектральной плотностью излучения. Исходя из результатов проведенных экспериментов, мы определяем основные процессы, приводящие к генерации излучения, в следующем виде. Для низкочастотной ($f_1 \approx 200 \text{ ГГц}$) области спектра механизмом генерации излучения является прямая трансформация верхне-гибридных плазменных колебаний в электромагнитные волны на градиентах плотности плазмы. Для высокочастотной ($f_2 \approx 400 \text{ ГГц}$) области спектра механизмом генерации излучения служит нелинейное слияние в электромагнитную волну двух верхне-гибридных волн и/или ленгмюровских колебаний при развитой плазменной турбулентности, накачиваемой сильноточным пучком.

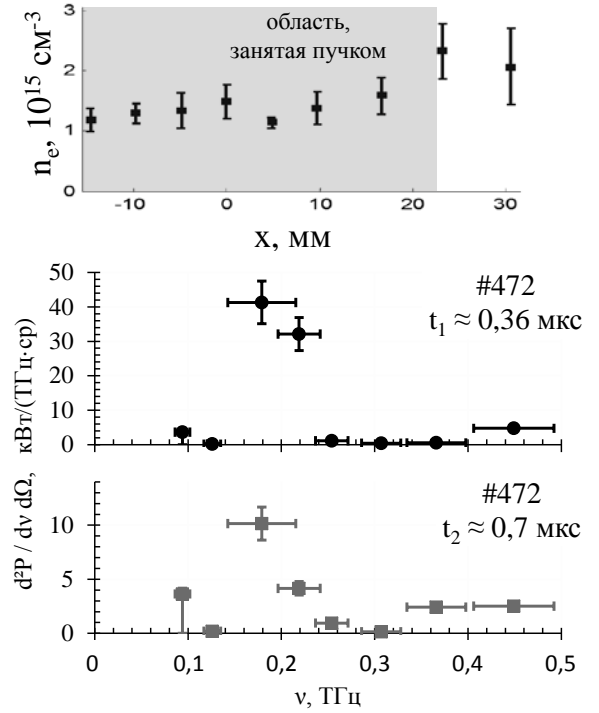


Рисунок 10 – Спектры суб-терагерцового излучения, выходящего вдоль оси плазменного столба в различные моменты времени одного выстрела пучком при плотности плазмы $n_e \approx 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (распределение плотности по диаметру столба представлено сверху рисунка)

В силу большой (масштаб 5 ГВт) мощности пучка суммарная импульсная мощность излучения оказывается также относительно большой – масштаба сотен МВт. Однако эффективность перевода энергии от пучковых электронов в поток излучения заданной направленности в экспериментах настоящего времени пока еще не велика. По этой причине дальнейшие работы будут сосредоточены на проведении теоретических и экспериментальных исследований с целью подъема эффективности перевода энергии плазменных колебаний в электромагнитное излучение, а также формировании из излучения узконаправленного потока. Для этого будет создаваться плазма с заданными градиентами плотности и осуществляться инжекция пучка с повышенной плотностью тока пучка и различной угловой расходимостью электронов.

5 Эксперименты по изучению планарного МСЭ с замыканием поперечных волновых потоков для улучшения стабильности генерации

Одно из направлений работ, проведенных в рамках государственного задания лабо-

ратории в 2015 году, 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. Это достигается за счет использования двумерной пространственно-распределенной обратной связи.

Следует отметить, что основным результатом предыдущей серии экспериментов на установке ЭЛМИ в 2013 – 2014 гг. была демонстрация возможности одновременной генерации в двух каналах планарного МСЭ мощных квазимонохроматических импульсов мм-излучения на частотах, соответствующих собственным частотам резонатора. Поскольку в той серии экспериментов планарные каналы МСЭ были отделены друг от друга металлической перегородкой на всем их протяжении, то генерация квазимонохроматического излучения в окрестности частоты 75 ГГц в этих двух каналах осуществлялась в значительной доле выстрелов на несовпадающих частотах. Тем не менее, в ряде выстрелов наблюдалась одновременная генерация излучения в обоих каналах на одинаковой собственной частоте резонатора МСЭ, что объясняется проникновением небольшой доли потоков выходного излучения из одного канала в другой, которое происходит в пространственной области, где использованные пучки поглощаются графитовым коллектором. Таким образом, оказалось, что даже слабая электродинамическая связь между каналами МСЭ позволила с некоторой вероятностью осуществить синхронизацию раскочки колебаний в этих каналах. Также было показано, что при заданной энергии электронов пучков оптимальные для генерации излучения значения продольной и поперечной компонент статического ондуляторного поля хорошо согласуются с предсказаниями теоретической модели, описывающей МСЭ в условиях, когда ондуляторный синхронизм сдвинут на величину расстройки, соответствующую максимуму электронного КПД.

Таким образом, естественным развитием исследований стало применение сильной электродинамической связи между двумя каналами МСЭ для достижения единой частоты и синфазности электромагнитных колебаний в потоках мм-излучения, выходящих из этих каналов. Для осуществления этой связи, электродинамические системы обоих каналов были объединены в области входных двумерных брэгговских отражателей путем удаления ме-

таллической перегородки разделяющей каналы в этом месте. В результате ее удаления оказался возможным взаимный обмен каналами поперечными волновыми потоками, создаваемыми двумерными отражателями. В соответствии с результатами теоретической модели такой обмен потоками должен эффективно обеспечить взаимную синхронизацию электромагнитных колебаний, накачиваемых электронными пучками в этих двух каналах МСЭ.

В серии экспериментов с двухканальным МСЭ в условиях сильной электродинамической связи между каналами были установлены следующие закономерности генерации мм-излучения.

1. Во всех выстрелах генерация излучения в обоих каналах происходила одинаковым образом. В условиях генерации на единой частоте, фаза электромагнитных колебаний в двух каналах практически всегда совпадала в течение всей длительности импульса излучения. В выстрелах, в которых наблюдался перескок с одной частоты на другую, этот процесс осуществлялся одновременно в обоих каналах.
2. В частотном интервале 74,5 – 75,5 ГГц, где находились собственные частоты резонаторов отдельных каналов, были обнаружены высокочастотные моды с частотами, лежащими между ними. Эти частоты соответствуют колебаниям, которые едины для всей объединенной двухканальной электродинамической системы данного МСЭ.
3. Установлено, что в условиях сильной связи между каналами даже при довольно широком диапазоне изменений ондуляторного магнитного поля и напряжения на диоде реализуется одномодовая одночастотная генерация излучения в обоих каналах одновременно в течение всей длительности импульса излучения. Это коренным образом отличает данную серию экспериментов от экспериментов при слабой связи между каналами.

Типичные параметры полученных в этих экспериментах импульсов излучения были следующими: пиковая мощность излучения из одного канала составила около 20 МВт, длительность импульсов - 100 нс, частота излучения – 74,6 ГГц, спектральная ширина не превышала 20 МГц (см. рисунок 11).

Таким образом, 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. Этот результат ис-

ключительно важен с практической точки зрения.

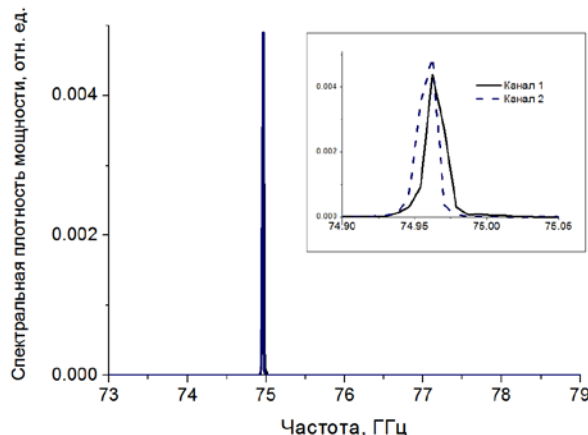


Рисунок 11 – Спектр мм-излучения в одном из выстрелов в режиме одночастотной генерации

Заключение

В соответствии с общим планом работ по данной тематике, в 2015 году исследования проводились по пяти отдельным научным направлениям. Первым направлением является моделирование и разработка нового поколения инжектора электронного пучка с плазменным эмиттером в импульсно-периодическом режиме. Вторым направлением является подготовка новой экспериментальной базы для проведения экспериментов по исследованию плазмы при инъекции атомарных пучков с мощностью порядка 1 МВт в многопробочную ловушку ГОЛ-3. Третьим направлением работ является исследование импульсного пучкового воздействия большой мощности на перспективные конструкционные материалы первой стенки и плазмприёмников будущих термоядерных реакторов. Четвёртое направление связано с разработкой проекта генератора терагерцового излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия с высоким уровнем турбулентности. Пятое направление работ в рамках данной НИР включает в себя проведение экспериментов по изучению планарного лазера на свободных электронах с замыканием поперечных волновых потоков для улучшения стабильности генерации излучения.

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 науч-

но-исследовательской работы. Результат работ по созданию планарного лазера на свободных электронах является важным с точки зрения практических приложений.

Результаты исследований опубликованы в работах [1-10].

Список использованных источников

- [1] Ivanov, A.A., Burdakov, A.V., Bagryansky, P.A. Recent progress in studies of plasma heating and stabilization in axisymmetric magnetic mirrors in Novosibirsk // *Fusion Science and Technology*. – 2015. – Vol. 68. – № 1. – P. 56–62.
- [2] 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.
- [3] Ivanenko, S.V., Khilchenko, A.D., Puryga, E.A., Ovchar, V.K., Zubarev, P.V., Kvashnin, A.N., Ivanova, A.A., Kotelnikov, A.I. Prototype of Data Acquisition Systems for ITER Divertor Thomson Scattering Diagnostic // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2015. – Vol. 62. – № 3. – P. 1181–1186.
- [4] Grishnyaev, E.S., Polosatkin, S.V. Modeling of Deuterium Ionization and Extraction From an Ion Source Driven by Heated Cathode // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2015. Vol. 43. – № 11. – P. 3856/
- [5] Sorokina, N.V., Burdakov, A.V., Ivanov, I.A., Polosatkin, S.V., Postupaev, V.V., Rovenskikh, A.F., Shoshin, A.A. Study of the impurity composition and effective plasma charge in the GOL-3 facility // *Plasma Physics Reports*. 2015. Vol. 41. № 7. P. 529–534.
- [6] Arakcheev, A.S., Huber, A., Wirtz, M., Sergienko, G., Steudel, I., Burdakov, A.V., Coenen, J.W., Kreter, A., Linke, J., Mertens, Ph., Shoshin, A.A., Unterberg, B., Vasilyev, A.A. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 463. – P. 246–249.
- [7] Huber, A., Wirtz, M., Sergienko, G., Steudel, I., Arakcheev, A., Burdakov, A., Esser, H.G., Freisinger, M., Kreter, A., Linke, J., Linsmeier, C., Mertens, P., Muller, S., Philipps, V., Pintsuk, G., Reinhart, M., Schweer, B., Shoshin, A., Terra, A., Unterberg, B. Combined impact of transient heat loads and steady-state plasma exposure on tungsten // *Fusion Engineering and Design*. – 2015. – Vol. 98-99. – P. 1328/
- [8] Michael, C.A., Tanaka, K., Vyacheslavov, L., Sanin, A., Kawahata, K. Two-dimensional wave-number spectral analysis techniques for phase contrast imaging turbulence imaging data on Large Helical Device // *Review of Scientific Instruments*. – 2015. – Vol. 86. – № 9. – Article number 093503.
- [9] Arzhannikov, A.V., Burdakov, A.V., Burmasov, V.S., Ivanov, I.A., Kuznetsov, S.A., Kuklin, K.N., Mekler, K.I., Polosatkin, S.V., Postupaev, V.V., Rovenskikh, A.F., Sinitsky, S.L., Sklyarov, V.F. Plasma system of the GOL-3T facility // *Plasma Physics Reports*. – 2015. – Vol. 41. – № 11. – P. 863–872.
- [10] Аржанников А.В., и др. Генератор терагерцового излучения на основе интенсивного пучково-плазменного взаимодействия // *XLII Междунар. Звенигородская конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу / ПЛАЗМАИО-ФАН*. – М., 2015. – С. 306.

14.1.4 Создание первой очереди плазменной ловушки нового поколения ГДМЛ

Введение

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывается проект линейной магнитной ловушки нового поколения для удержания термоядерной плазмы. Концепция новой установки, получившей название ГДМЛ, основана на новых эффектах, ранее обнаруженных и исследованных ранее на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН. Установка ГДМЛ представляет собой пробкотрон с плотной плазмой, в котором с помощью инъекции быстрых нейтралов создается популяция быстрых плещущихся ионов. Улучшение удержания по сравнению с классической конфигурацией газодинамической ловушки достигается за счет использования многопробочных торцевых секций, что, позволяет рассчитывать на десятикратное улучшение продольного удержания плазмы. Стабилизация плазмы в установке должна достигаться за счет формирования в плазме радиального электрического поля и связанным с ним неоднородным вращением плазмы.

Работы по проекту направлены на разработку основных элементов установки, определение и оптимизацию режимов ее работы. Ключевыми элементами установки являются торцевые плазмоприемники, предназначенные для поглощения вытекающего из центральной части потока плазмы. Плазмоприемники должны быть устойчивы к потокам энергии и частиц большой мощности, при этом они должны допускать установку активных электродов, таких как плазменные пушки, инжекторы электронных пучков, или кольцевых электродов, а также обеспечение вакуума в области расширителей.

1 Разработка физического проекта плазмоприемников установки ГДМЛ

Особенностью линейных систем для удержания плазмы является большой поток частиц и энергии вдоль магнитного поля. В существующих и перспективных установках практически вся энергия, вводимая в плазму, выносится из ловушки вдоль силовых линий магнитного поля на торцевые плазмоприемники. В проекте ГДМЛ основными источниками нагрева являются пучки нейтралов (суммарная захваченная мощность 10 МВт) и электронные

пучки, инжектируемые с торцов установки, также с суммарной мощностью 10 МВт. В стационарном случае вся мощность, вводимая в плазму, выносится на торцевые плазмоприемники. Максимальный поток энергии (в сильном поле многопробочных секций) составляет

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{20 \text{ МВт}}{\pi(0.1 \text{ м})^2} \cdot \frac{7 \text{ Тл}}{0.7 \text{ Тл}} = 3.2 \text{ ГВт/м}^2$$

Бесспорно, не существует материалов, способных работать при таких потоках мощности. Основной путь снижения тепловой нагрузки на плазмоприемники состоит в увеличении площади вытекающей плазменной струи в спадающем магнитном поле и установке пластин плазмоприемников под скользящим углом к магнитному полю. Ограничения этого подхода связаны с тем, что основная часть вытекающего плазменного потока должна приниматься выходным электродом (сеткой) инжектора электронного пучка. Угловая расходимость пучка, генерируемого инжектором, ограничивает максимальное возможное пробочное отношение значениями от 100 до 200, поэтому величина потока мощности вдоль поля в месте установки сетки будет составлять $\sim 20 \text{ МВт/м}^2$. Проблема снятия больших тепловых нагрузок в термоядерных исследованиях ранее решалась в связи с разработкой приемников пучков для мощных инжекторов нейтралов. Известны конструкции, позволяющие, при использовании активного водяного охлаждения, снимать до 83 МВт/м^2 в импульсах с длительностью 1,5 с [1], в ИЯФ СО РАН есть опыт создания и эксплуатации подобных устройств. Такие приемники пучков представляют собой, как правило, наборы медных труб с установленными внутри завихрителями потока. Также в рамках работ над проектом ИТЭР разработаны вольфрамовые и углеродные элементы плазмоприемников с активным охлаждением, способные работать при стационарных потоках до 20 МВт/м^2 [2].

Критическим вопросом создания плазмоприемников является их ресурс, который в значительной степени определяется эффектами термоциклирования. 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 ма-

териалов 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 $2.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. 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. Хорошо известно, что эффекты блистеринга существенны при облучении медных мишеней потоком высокоэнергетичных ионов (с энергиями в десятки кэВ) при флюенсах 10^{22} - 10^{23} м^{-2} . Скорее всего, при меньшей энергии ионов и высокой температуре поверхности мишени эффекты блистеринга не существенны, то есть эффекты повышенной эрозии могут возникнуть в случае, если на плазмоприемник будут попадать быстрые ионы, уходящие из ловушки.

2 Исследование возможных способов подпитки и рециркуляции вещества в установке ГДМЛ

Плазма в установке ГДМЛ состоит из двух компонент – популяции быстрых ионов, создаваемой системой нейтральной инжекции, и теплой мишенной плазмы. Быстрые ионы удерживаются в бесстолкновительном режиме, теряя свою энергию за счет столкновений с электронами. Теплая мишенная плазма удерживается в газодинамическом режиме и имеет существенно меньшее, по сравнению с популяцией быстрых ионов, время удержания. Баланс вещества в установке можно оценить из равенства потоков энергии, вводимой в плазму и теряющейся из нее. Энергия инжектируемых в плазму ионов равна 40 кэВ. При электронной температуре плазмы 500 эВ энергия, уносимая ионами, покидающими плазму, равна 4 кэВ ($8kT_e$), то есть система нейтральной инжекции вносит только 1/10 от вытекающего потока частиц. Дисбаланс инжекции и потерь частиц должен компенсироваться внешней подпиткой веществом.

Следуя приведенным выше оценкам, полный поток водорода за импульс в каждый

из расширителей равен 8×10^{21} ионов или 140 ст.см³ водорода. По данным работы [3] скорость выхода водорода с поверхности меди (константа Сивертса) при температурах 575–825 К равна $K_T = 6.7 \pm 0.1 \cdot 10^{-26} \text{ м}^4/\text{с}$. Тогда для параметров ГДМЛ время установки равновесия между падающим на поверхность и выходящим потоком при температуре поверхности 575 К можно оценить как

$$\tau = \frac{\lambda}{\sqrt{\Gamma \cdot K_T \cdot \exp(-E_s/kT)}} = \frac{3 \cdot 10^{-8} [\text{м}]}{\sqrt{5 \cdot 10^{22} [\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}] \cdot 6.7 \cdot 10^{-26} [\text{м}^4 \text{ с}^{-1}] \cdot 8.5 \cdot 10^{-4}}} = 20 \text{ мкс}$$

Кроме того, глубина физической эрозии мишени за импульс сравнима с глубиной пробега ионов в меди, поэтому можно считать, что весь имплантированный в плазмоприемник водород выходит в вакуум в виде атомов или молекул, то есть коэффициент рециклинга близок к единице.

Возможность откачки водорода в расширительном баке связана с величиной концентрации и температуры плазмы. При плотности плазмы 10^{18} м^{-3} и температуре плазмы 5 эВ длина пробега тепловой молекулы водорода до ионизации равна одному метру, то есть газ может относительно свободно выходить за пределы плазменного шнура.

Баланс накопления и рекомбинации плазмы в расширителе может быть приблизительно описан следующим уравнением

$$\frac{dn_e}{dt} = \frac{\Gamma_0 \cdot P}{S \cdot L} - \frac{n_e v_i}{L} = \frac{\Gamma_0}{\pi^2 L} \cdot \frac{r}{v_{H_2}} n_e \langle \sigma_i v_e \rangle - \frac{n_e v_i}{L} = \frac{1}{L} \left(\frac{\Gamma_0}{\pi} \cdot \frac{1}{v_{H_2}} \langle \sigma_i v_e \rangle - v_i \right) \cdot n_e$$

где Γ_0 – поток ионов в расширитель, P – вероятность ионизации образовавшейся молекулы водорода, L, r – характерные размеры плазмы в расширителе, v_{H_2}, v_i, v_e – скорости молекул, ионов и электронов плазмы. Если выражение в скобках больше нуля, происходит экспоненциальный рост плотности. В этом выражении единственным неопределенным параметром является скорость электронов (можно считать, что скорость ионов определяется процессами диссоциации). Подставив $\Gamma_0 = 8 \times 10^{21} \text{ с}^{-1}$, $r = 0,3 \text{ м}$ ($R = 100$), $v_{H_2} = 10^3 \text{ м/с}$, $v_i = 10^4 \text{ м/с}$, получим $\langle \sigma_i v_e \rangle = 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует температуре электронов 5 эВ.

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 периферийный слой плазмы может нагреваться с помощью ВЧ-нагрева.

Другим сценарием работы является откачка газа в расширителе и подпитка плазмы через газ-бокс в многопробочной секции вблизи центрального соленоида. Максимальная концентрация газа в расширителе может быть оценена из следующего условия

$$2n_{H_2}v_{H_2} \cdot L \cdot 2\pi r = \Gamma_0.$$

При $L=1$ м это условие дает значение 2×10^{12} см⁻³ или 8×10^{-3} Па. Для обеспечения такого вакуума скорость вакуумной откачки в расширителе должна составлять 1.75×10^3 м³/с. Такая откачка может быть обеспечена только геттерированием газа на поверхности расширителя (например, с помощью титанирования поверхности). При этом, однако, если считать, что насыщение геттера происходит, когда поверхность покрывается монослоем водорода, площадь поверхности геттера должна составлять 400 м². Альтернативными вариантами являются использование криооткачки, нераспыляемых геттеров или других материалов с высокой скоростью диффузии водорода, или титанирование в процессе разряда.

3 Моделирование режимов нагрева плазмы в центральной ячейке при инъекции нейтральных пучков

Запланированные научно-исследовательские работы проводились с помощью одномерного кода DOL, ранее разработанного для моделирования нестационарных параметров плазмы в открытых осесимметричных ловушках [4]. Математическую задачу, лежащую в основе кода DOL, можно разделить на следующие основные компоненты:

- 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
- Вычисление интенсивности термоядерных реакций в установке

Рассматриваемая задача в типичном случае имеет следующий порядок масштабов времени, $\tau_{ci} \ll \tau_{\parallel} \ll \tau_d \sim \tau_s \sim \tau_{ex}$ времена циклотронного вращения, баунс-осцилляций, торможения, рассеяния и перезарядочных потерь быстрых ионов. Наименьшее из времен τ_d , τ_s ,

τ_{ex} определяет время релаксации и нестационарность модели существенно именно на таких или меньших временах. В связи с малостью τ_{ci} , τ_{\parallel} задача для быстрых ионов решается в терминах функции распределения, усредненной по орбитам циклотронного вращения и баунс-осцилляций. Помимо этого, предполагается, что задача является аксиально симметричной, функция распределения быстрых ионов меняется пренебрежимо слабо на пространственных размерах порядка ларморовского радиуса, а амбиполярные потенциалы существенно меньше характерных энергий быстрых частиц.

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 [5] и дифференциальной эволюции [6]. Общая схема источника нейтронов, включая предполагаемое размещение подкритичной ядерной сборки, представлена на рисунке 1.

Фиксированными параметрами являлись мощность инжектируемых пучков быстрых частиц (100 МВт), длина центральной ячейки (20 м) и магнитное поле в пробке (150000 Гс). Оптимизация установки подразумевала изменение следующих параметров: максимальное пробочное отношение (R_{max}); пробочное отношение в точке инъекции (R_{inj}), энергия инжектируемых быстрых атомов (E_{inj}), радиус плазмы (r_{pl}), эквивалентный ток поддува газа для поддержания плотности фоновой плазмы (J_g). Расчеты были проведены для количества запирающих концевых ячеек $N = 5, 10, 20$.

В качестве условий, ограничивающих параметры плазмы, были выбраны следующие показатели. Во-первых, поперечное относительное давление плазмы, рассчитанное по возмущенному магнитному полю, не должно было превышать единицу. Это соответствует относительному давлению плазмы по вакуумному полю 0.5, которое было ранее продемонстрировано в экспериментах ГДЛ [7]. Во-вторых, захват пучка не должен был превышать 90 % (в противном случае могло бы происходить формирование кольцеобразного профиля распределения плотности быстрых ионов, неблагоприятного для удержания). В-третьих, удержание фоновых ионов было ограничено газодинамическим режимом, причем граница перехода между адиабатическим и газодинамическим режимами определялась равенством времен удержания в указанных режимах.

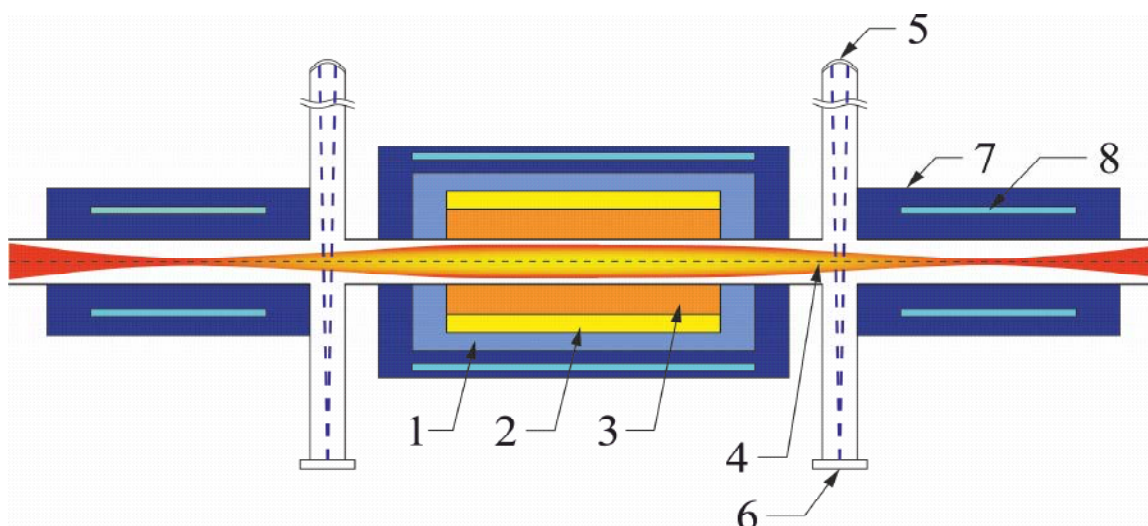


Рисунок 1. Общая схема источника нейтронов на основе ГДМЛ. 1 - отражатель, 2 - литиевый бланкет, 3 - активная зона, 4 - плазма, 5 - инжектор быстрых атомов, 6 - приемник пучка, 7 - нейтронная защита, 8 - магнитные катушки.

Таблица 1. Параметры конфигураций источника нейтронов, полученные в результате работы алгоритмов оптимизации.

Параметр	N = 5	N = 10	N = 10 (Диф. эволюция)	N = 20
E_{inj} , кэВ	118.8	121.2	128.8	126.2
r_{pl} , см	25.9	26.1	23.0	35.6
R_{max}	15	15	11.4	15
R_{inj}	1.4	1.4	1.0	1.8
J_g , экв. А	5.4	3.8	3.8	3.0
Захват пучка, %	82.8	86.5	86.3	86.0
β , %	77	98.4	99.6	66.2
T_e , кэВ	1.6	2.1	2.1	2.4
T_i , кэВ	2.2	3.5	3.3	4.3
τ_{gd} , мс	3.3	5.5	4.5	9.5
τ_{kin} , мс	3.3	5.5	4.5	9.4
$10^2 Q$	10.3	15.9	16.3	20.1

Результаты моделирования представлены в таблице 1. Для оптимизации варианта источника нейтронов с количеством запирающих ячеек $N = 10$ использовались оба алгоритма поиска оптимума. Как следует из полученных данных, относительная разница между к.п.д. термоядерных реакций для конфигураций, полученных с помощью различных алгоритмов, составляет 2.5 %. Сами по себе полученные к.п.д. термоядерных реакций соответствуют эффективности производства нейтронов (количество нейтронов в расчете на единицу вводи-

мой мощности), сравнимой или большей таковой у электроядерных систем.

Заключение

Проект ГДМЛ направлен на создание установки для удержания горячей плазмы, на которой будут продемонстрированы реакторные перспективы открытых линейных систем для удержания плазмы. Как видно из представленных в отчете результатов расчетов и численного моделирования, открытая ловушка с инжекцией популяции быстрых ионов может

служить источником нейтронов - драйвером для подкритического реактора. Результаты работы опубликованы в работах [8-12].

Список использованных источников

- [1]. Наумов В.К., Семашко Н.Н. Теплогидравлические характеристики и критические тепловые нагрузки в приёмниках пучков системы инъекции T-15 // Атом, энергия. - 1992. - 72. - Вып. 6, - С. 580-587.
- [2]. Merola M. et al 2002 J. Nucl. Mater. 307-311 1524
- [3]. K. L. Wilson, R. A. Causey, M. I. Baskes, and J. Kamperschroer Hydrogen isotope retention and release from copper J. Vac. Sci. Technol. A 5, 2319 (1987)
- [4] Юров Д. В., Приходько В. В., Цидулко Ю. А., «Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой», Физика плазмы, т. 42 (3), 93-110 (2016), принято к публикации
- [5] R. Hooke, T. A. Jeeves, «'Direct search' solution of numerical and statistical problems», Journal of the Association for Computing Machinery, 8 (2), 212-229 (1961)
- [6] R. Storn, K. Price, «Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces», Journal of Global Optimization, 11 (4), 341-359 (1997)
- [7]. P. A. Bagryansky et al., «Confinement of hot ion plasma with $\beta = 0.6$ in the gas dynamic trap», Fusion Science and Technology, 59 (1T), 31-35 (2011)
- [8]. Судников А.В., Беклемишев А.Д., Поступаев В.В. Разработка магнитной системы открытой ловушки с винтовыми пробками // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 99.
- [9]. Багрянский П.А., Аникеев А.В., Беклемишев А.Д., Господчиков Е.Д., Зайцев К.В., Иванов А.А., Коваленко Ю.В., Колесников Е.Ю., Коробейникова О.А., Лизунов А.А., Максимов В.В., Мурахтин С.В., Пинженин Е.И., Приходько В.В., Савкин В.Я., Солдаткина Е.И., Соломахин А.Л., Шалашов А.Г., Юров Д.В., Яковлев Д.В. и др. Термоядерный источник нейтронов на основе осесимметричного пробкотрона: ключевые физические проблемы и пути их решения // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 53.
- [10]. Аникеев А.В., Аржанников А.В., Багрянский П.А., Беклемишев А.Д., Иванов А.А., Приходько В.В., Цидулко Ю.А., Юров Д.В. Проект нейтронного источника на основе открытой ловушки с учетом последних экспериментальных достижений в ИЯФ СО РАН // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 75.
- [11]. Anikeev, A.V., Prikhodko, V.V., Yurov, D.V. Parameters of a fusion neutron source based on the recent GDT experimental data and possible applications // Fusion Science and Technology, Volume 68, Issue 1, 2015, p.70-75
- [12]. Беклемишев А.Д., Сквородин Д.И., Зайцев К.В. Глобальная звуковая мода в ловушке с плещущимися ионами // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2015. С. 76.

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

Введение

Проверка предсказаний и уточнение параметров Стандартной модели (СМ), а также, поиск Новой физики являются важнейшими целями экспериментальных исследований в физике элементарных частиц и космологии.

Задача получения точных теоретических предсказаний СМ может решаться различными способами. Во-первых, можно применять подход, основанный на суммировании параметрически выделенных членов бесконечного ряда теории возмущений по константе взаимодействия. Важным примером такого подхода является уравнение Балицкого-Фадиана-Кураева-Липатова (БФКЛ), полученное при участии руководителя проекта и лежащее в основе теоретического описания полужестких процессов в квантовой хромодинамике (КХД). Во-вторых, можно вычислять достаточно большое количество членов ряда теории возмущений. Такой подход требует развития новых методов приведения и вычисления многопетлевых интегралов. Одним из способов упростить многопетлевые вычисления является использование эффективной теории, такой как эффективная теория тяжёлого кварка (НҚЕТ).

Получение предсказаний квантовой электродинамики в сильных электромагнитных полях является также очень интересной и актуальной задачей. Наиболее интересными полевыми конфигурациями являются (экранированное) кулоновское поле $-Za/r$ с $Za \sim 1$, поле плоской волны большой интенсивности и постоянное электромагнитное поле, близкое и превышающее критическое поле Швингера $4 \cdot 10^{13}$ Гс.

Теоретическое исследование полей кручения может оказаться важным для описания эволюции ранней Вселенной. Эти поля генерируют гравитационное четырехфермионное взаимодействие, которое доминирует на планковских масштабах и может приводить к нетривиальной динамике. Интересным, с точки зрения космологии, является и вопрос о возможном появлении динамического хаоса для гравитационного поля вблизи тела с очень большой массой, например, в окрестности черной дыры.

Нельзя полностью исключать, что квантовая теория гравитации может быть

основана на совершенно экзотической концепции, в которой пространство-время является дискретным (так называемая теория гравитации Редже). Большое значение здесь имеет поиск таких формулировок дискретной гравитации, которые позволят получить предсказания для реальных физических процессов.

1 Проверка гипотезы о связи амплитуд максимально расширенной суперсимметричной теории Янга-Миллса с вакуумными средними вильсоновских петель

Проверена гипотеза реджезации калибровочных бозонов в суперсимметричных теориях Янга-Миллса (СЯМ) и теориях Янга-Миллса общего вида в следующем за главным логарифмическом приближении [1]. Гипотеза реджезации состоит в том, что амплитуда многочастичного рождения в мультiredжевской кинематике имеет мультiredжевскую форму в главном (и в следующем за главным) логарифмическом приближении. При доказательстве был использован метод, основанный на соотношениях бутстрапа. Соотношения бутстрапа получаются из требования совместимости s-канальной унитарности и мультiredжевской формы амплитуды. На мультiredжевской форме амплитуды основан подход Балицкого-Фадиана-Кураева-Липатова (БФКЛ), который является эффективным методом исследования СЯМ в мультiredжевской области.

2 Вычисление импакт-фактора глубоко виртуального фотона в следующем за главным порядке в импульсном представлении

В настоящее время уже вычислены импакт фактор дифракционного рождения трех струй в древесном приближении и импакт фактор дифракционного рождения двух струй в однопетлевом приближении. Сейчас ведется подготовка результатов к печати. Частичные результаты уже докладывались на конференциях и опубликованы в виде тезисов докладов [2]. 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 приме-

няться для построения предсказаний для ультрапериферического рождения струй в столкновениях тяжелых ионов на БАК. Такие процессы активно изучаются и представляют огромный интерес, так как их сечения могут быть вычислены из первых принципов, используя наши импакт факторы, уравнения эволюции КХД и метод Вайцеккера-Вильямса. Еще одним местом приложения вычисленных нами импакт факторов является описание дифракционного фоторождения легких мезонов. Наш результат позволяет продвинуться в этом направлении, так как дает возможность вычислить сечение фоторождения мезона с произвольной поляризацией и произвольной передачей, что было неизвестно ранее. Такие процессы также активно исследуются как на БАК, так и в данных HERA и других установок.

3 Получение двухпетлевого уравнения эволюции в HQET, его использование для описания распада В-мезонов с учетом первой поправки

Аномальная размерность угла на Вильсоновской линии вычислена в трёхпетлевом приближении. Эта аномальная размерность нужна для вычисления амплитуд процессов, в которых массивный кварк меняет скорость: распады b на c , рождение t анти- t пар и т.д. Она является функцией угла между этими скоростями в пространстве Минковского. В пределе больших углов она сводится к аномальной размерности угла со светоподобными сторонами, которая уже была известна в трёхпетлевом приближении (и используется для описания процессов с лёгкими кварками). Если выразить полный результат для аномальной размерности через эффективную константу связи, пропорциональную светоподобной аномальной размерности, то результат (до 3 петель включительно) не зависит от числа кварковых ароматов. Более того, он имеет тот же вид в суперсимметричных обобщениях КХД. Причина такой универсальности пока не выяснена. В другом пределе, когда евклидов угол близок к π , аномальная размерность связана со статическим кварк-антикварковым потенциалом. Это соотношение было известно на двухпетлевом уровне. В нашей работе показано, что оно следует из конформной инвариантности. В КХД эта симметрия аномальна (нарушается бета-функцией), поэтому естественно ожидать нарушения этого соотношения, пропорционального бета-функции. Именно это и происходит в трёхпетлевом приближении. В $N=4$ суперсимметричной теории Янга-Миллса кон-

формная инвариантность не нарушена, и поправки к этому соотношению не возникают. Результаты опубликованы в работах [3] и [4].

4 Дальнейшее исследование моделей суперсимметричных калибровочных теорий в режиме сильной связи

Данная работа является продолжением и дальнейшим развитием предыдущих работ автора: [5] и [6]. Рассмотрены $N=1$ суперсимметричные КХД-подобные прямая и ее дуальная по Зайбергу теории с N_F ароматами легких кварков и, соответственно, с цветовыми калибровочными группами $SU(N_C)$ и $SU(N_F-N_C)$. Обе теории включают дополнительно N_F^2 бесцветных скалярных суперполей Φ_i^j . Но теперь изучена новая область $2N_C < N_F < 3N_C$.

Найдены множественности различных вакуумов и величины кварковых конденсатов в каждом из этих вакуумов. В рамках динамического сценария, введенного в работе автора [7], вычислены спектры масс прямой и дуальной теорий в каждом из вакуумов и показано, что эти спектры масс отличаются параметрически.

Кроме того, рассмотрена $N=2$ суперсимметричная КХД с цветовой калибровочной группой $U(N_C)$ и $N_C+1 < N_F < 3N_C/2$ ароматами легких кварков с массовым членом $m\text{Tr}(QQ)$ в суперпотенциале, нарушенная до $N=1$ массовым членом $\mu_X\text{Tr}(X^2)$ скалярных суперполей X , $m \gg \mu_X \gg \Lambda^2$. Спектр масс этой теории вычислен в вакуумах с ненарушенной дискретной симметрией $Z(2N_C-N_F)$. Проведено сравнение спектра масс этой прямой теории и двух ее дуальных по Зайбергу вариантов. Результаты данной работы отличаются от результатов изучения этих теорий в недавних работах arXiv:1304.0822; 1403.6086 М. Шифмана и А. Юнга. Результаты работы представлены в [8].

5 Вычисление второй квазиклассической поправки к процессу $\gamma Z \rightarrow e^+e^-Z$. Применение метода квазиклассических функций Грина к другим процессам в атомном поле

До недавнего времени все исследования процессов КЭД в атомном поле при высоких энергиях проводились точно по полю в рамках квазиклассического подхода либо в главном приближении, либо с учётом первой поправки. В нашей работе 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). Результаты опубликованы в работе [9].

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). Результаты опубликованы в [10].

6 Изучение представления гравитации Фадеева в переменных, аналогичных переменным тетрада-связность, в том числе и в дискретной версии. Исследование значения полученных результатов для космологии ранней Вселенной

В формулировке Фадеева общей теории относительности (ОТО) метрика – функция десятимерной тетрады. В классическом подходе (на уравнениях поля) эта теория эквивалентна ОТО. Ранее мы предложили дискретное описание гравитации Фадеева, в котором поля тетрады кусочно-постоянны на блоках типа 4-мерных тетраэдров или, скажем, кубов, на которые разбивается R^4 – многообразие точек (x_1, x_2, x_3, x_4) , а вектора рёбер сами являются полевыми переменными. В сравнении с обычной ОТО, действие Фадеева конечно и для разрывных полей тетрады – блоки в квантовой теории не стыкуются на общих гранях, т.е. независимы. В частности, спектр площади поверхности, важный для физики чёрных дыр, равен сумме спектров независимых элементарных площадей.

Мы предлагаем и изучаем представление дискретного действия Фадеева, аналог формы Картана-Вейля действия ОТО Эйнштейна с независимыми переменными связности. Вводится 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 Фадеева. Результаты в [11].

В другой работе мы предлагаем и изучаем дискретную версию представления Пала-

тини действия ОТО с помощью независимой аффинной связности (символы Кристоффеля) – в дискретной версии матрицы общей линейной группы $GL(4, R)$. 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). Результаты опубликованы в [12].

Заключение.

Проверена гипотеза реджезации калибровочных бозонов в СЯМ в СГЛП. Вычислены импакт фактор дифракционного рождения трех струй в древесном приближении и импакт фактор дифракционного рождения двух струй в однопетлевом приближении. Аномальная размерность угла на Вильсоновской линии вычислена в трёхпетлевом приближении. Рассмотрены различные суперсимметричные теории и в них найдены множественности различных вакуумов и величины кварковых конденсатов в каждом из этих вакуумов. Вычислено точно по полю сечение тормозного излучения в атомном поле с учетом первой квазиклассической поправки, а также был исследован вопрос о возможности применения квазиклассического подхода к вычислению сечений с учетом второй квазиклассической поправки. Продолжено изучение представления гравитации Фадеева.

Список литературы

- [1] Fadin V. S., Kozlov M.G., Reznichenko A.V., Gluon Reggeization in Yang-Mills Theories, Phys.Rev. D92 (2015) 8, 085044
- [2] Boussarie R., Grabovsky A.V., Szymanowski L., Wallon S. Impact factor for high-energy two and three jets diffractive production. AIP Conf.Proc. Vol. 1654, p. 030005.
- [3] Grozin A.G., Henn J.M., Korchemsky G.P., Marquard P., Phys. Rev. Lett. Vol. 114, p. 062006.
- [4] Grozin A.G., Henn J.M., Korchemsky G.P., Marquard P., arXiv:1510.07803; J. High Energy Phys. (принято к печати).
- [5] Chernyak V.L., arXiv:1205.0410.
- [6] Chernyak V.L., arXiv:1211.1487.
- [7] Chernyak V.L., JETP Vol. 114, p. 61; arXiv:0811.4283.
- [8] Chernyak V.L., arXiv:1308.5863 (представлено в ЖЭТФ).
- [9] Krachkov P.A., Lee R.N., Milstein A.I., Phys. Lett., Vol. B751, p. 284-288.
- [10] Krachkov P.A., Milstein A.I., Phys.Rev. A. Vol. 91, p. 032106.
- [11] Khatsymovsky V.M., Affine connection form of Regge calculus, Mod.Phys.Lett. A Vol. 31, p. 1650010, e-Print: arXiv:1509.04974.
- [12] Khatsymovsky V.M., First order minisuperspace model for the Faddeev formulation of gravity. Mod.Phys.Lett. A Vol. 30, p. 1550174. e-Print: arXiv:1508.07573.

№ 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 возникновения коллабораций. Был внесен огромный 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 100 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 г. и 8 ТэВ в 2012 г. в системе центра масс). Интеграл набранной статистики 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. Большой адронный коллайдер 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, светимости 10^{34} см⁻²сек⁻¹. На детекторе АТЛАС были проведены следующие работы:

- ремонт и замена неисправных элементов детектора и электроники;

- установка новых элементов детектора, в частности, дополнительного слоя внутреннего детектора для регистрации распадов частиц, содержащих b-кварк;

- повышение эффективности и увеличение быстродействия алгоритмов триггера и реконструкции;

- подготовка всей вычислительной инфраструктуры для обработки существенно большего объема данных.

Также активно велась работа по анализу набранных в 2011-12 г. данных и публикации результатов. Основной задачей являлось изучение свойств недавно открытого «хиггс-подобного» бозона (спина, чётности, относительных вероятностей различных мод распада, констант связи), а также поиск «новой физики» (в первую очередь суперсимметричных частиц).

В июне 2015 г. на БАК была достигнута новая рекордная энергия столкновений протонов - 13ТэВ в системе центра масс - и начался новый этап набора данных (так называемый «заход 2», «заход 1» проводился в 2010-2012 г.). Благодаря тщательной подготовительной работе удалось обеспечить высокую (более 90 %) эффективность набора данных. С июня по ноябрь 2015 г. был набран интеграл статистики 3.5 обратных фемтобарн на детекторе АТЛАС и 0.3 обратных фемтобарн на детекторе LHCb. Проигрыш по интегралу статистики в 6 раз (на данный момент – в 2016 г. планируется набрать около 25 фб⁻¹) по сравнению с заходом 1 компенсируется выигрышем в партонных сечениях при возрастании энергии столкновений протонов. Этот выигрыш тем заметнее, чем больше масса рождающихся частиц (в том числе еще не открытых, гипотетических, присутствующих в теориях «новой физики» за пределами Стандартной Модели). Поэтому даже быстрый анализ набранной в сезоне 2015 г. статистики позволил существенно улучшить (по сравнению с результатами захода 1) пределы на массы и сечения рождения многих гипотетических частиц (суперсимметричных частиц - глюино, нейтрино, новых тяжелых векторных бозонов, частиц темной материи). Вместе с тем, для многих физических процессов как «стандартной», так и «новой» физики, малость набранной статистики является основным фактором, ограничивающим уровень физических результатов. Поэтому существенное увеличение интеграла статистики в последующие годы (2016-17) является крайне важным.

1 Доработка и запуск программного обеспечения детекторов ATLAS и LHCb для обеспечения высокой эффективности набора данных при возобновлении работы LHC в 2015 г.

В 2015 году был возобновлен набор данных при столкновениях протонов рекордных энергий (в июне 2015 г. было достигнуто 13 ТэВ в системе центра масс, в 2012 г. было 8 ТэВ) в Большом Адронном Коллайдере после двухлетней плановой остановки. За 2 года была проделана большая работа по ремонту неисправных элементов детекторов и электроники и подготовке к набору данных на более высокой энергии и при бо́льших нагрузках. В частности, отремонтировано 19 измерительных каналов и устранено перепутывание 60 каналов в системе измерения температуры жидкоаргоновых калориметров детектора АТЛАС. Осуществлен переход на новую операционную систему (WinCC OA), проект запущен под Linux на новой машине. В январе-феврале 2015 года была сдана в эксплуатацию и в дальнейшем поддерживалась в течение всего года основная информационная страничка дежурного по контролю за качеством данных жидкоаргонового калориметра LADIES (<https://atlas-larmon.cern.ch/LArPage1/>). Начиная с февраля дежурные на постоянной основе использовали страничку для получения информации о качестве набираемых данных. С тех пор по инициативе дежурных и экспертов в программное обеспечение информационной странички было внесено около 80 зафиксированных поправок. 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. В сезоне 2015 г. произошло увеличение частоты столкновений сгустков протонов. Время между столкновениями уменьшилось с 50 до 25 нс. Для того, чтобы уменьшить время, требующееся на оцифровку и принятие решения триггером, был осуществлен переход от записи данных жидкоаргонового калориметра с 5 измерениями (сэмплами) амплитуды на импульс (с шагом 25 нс) к записи данных с 4 сэмплами. При осуществлении этого перехода нужно было убедиться, что не происходит ухудшения он-лайн идентификации спорадических всплесков шума. Соответствующая работа была проделана. Продолжались работы по поддержке и ускорению моделирования в пакете GEANT 4 торцевого элек-

тромагнитного калориметра, имеющего сложную геометрию электродов («аккордеон»).

Также большая работа велась в составе группы системного администрирования системы сбора данных эксперимента ATLAS (ATLAS TDAQ SysAdmin Group), занимающейся эксплуатацией и развитием компьютерного обеспечения триггера высокого уровня (High Level Trigger), системы формирования и фильтрации событий (Event Builder, Event Filter) и других подсистем. В первой половине года продолжалась остановка на модернизацию (LS1), шла интенсивная подготовка к запуску RUN2. Важными вехами были тестовый запуск TDAQ во время LS1 и запуск TDAQ с отключенной внешней коннективностью (Disconnection Test), в обоих наши сотрудники принимали непосредственное участие. В течение всего периода присутствия в ЦЕРН (почти круглый год) наши сотрудники принимали участие в круглосуточных экспертных дежурствах (on-call) по администратии системы сбора данных, в текущих работах по администрированию, включая физический монтаж и обслуживание оборудования, тестирование возникающих проблем, взаимодействие с поддержкой операционной системы, службами ЦЕРН и производителями аппаратного обеспечения. В некоторых случаях (проблема имен групп в sssd, аутентикации для squid, таблиц SNMP и т.д.) пришлось выходить за пределы собственно административной работы и разбираться с исходными кодами ПО. В начале года была полностью завершена миграция сервиса входа во внутреннюю сеть (atlas gateways) на Scientific Linux 6, создана документация, подготовлена процедура тестирования (checklist). В рамках принятия системы в эксплуатацию, сервис был несколько раз переустановлен, в том числе с переносом на другой компьютер и изменением дисковой конфигурации. Из эксплуатации выведен аналогичный сервис для тестовой сети (pre-series gateway). Один из компьютеров сконфигурирован с сетевой конфигурацией с избыточностью (VRRP). Упрощены и рационализированы настройки системы в целом (puppet). Доработаны настройки прокси сервера squid для протокола HTTPS. После модернизации членами группы осуществлялась поддержка и сопровождение системы. Разработана предварительная концепция и прототип нового набора системных сценариев atlas gateways. Потребовалось интегрировать в сценарии новый способ получения информации о ролях пользователей, AMRM, основанный на интерфейсе REST. Эта интеграция была успешно проведена, все функции

сценариев, включая собственно доступ, предупреждение о истечении привилегий, переведены на интерфейс REST. Сценарии протестированы и запущены в эксплуатацию. Закончена модернизация ОС для сервиса удаленного мониторинга (RMON), опробован и внедрен новый сервис доступа (x2go), оптимизированы сетевые настройки. Модернизированный сервис сдан в эксплуатацию.

2 Оптимизация реконструкции лептонов и фотонов при энергии 13 ТэВ в системе центра масс и светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

В 2015 году в коллаборации АТЛАС было сильно модифицировано базовое программное обеспечение для обработки и анализа данных – с целью унификации используемых различными группами алгоритмов и форматов данных, а также для увеличения быстродействия и эффективности обработки. Это потребовало существенной переработки программного обеспечения для получения калибровочных коэффициентов – как для электронной калибровки, так и для «физической» (определение энергии электронов и фотонов, измерение эффективности реконструкции и идентификации и т.д.). Получены результаты по измерению эффективности идентификации электронов и позитронов низких энергий в распадах J/Ψ методом «tag & probe» (меченый и пробный). Результаты получены для данных, набранных в 2015 году и для моделирования, для трех разных наборов идентификационных критериев (мягкого, умеренного и жесткого) и представлены в виде двумерной таблицы с 4 ячейками по поперечной энергии (в интервале от 7 до 20 ТэВ) и 6 ячейками по псевдобыстроте (нелинейной функции полярного угла), см. рис. 1. Эти результаты необходимы при анализе любого физического процесса с электронами и позитронами в конечном состоянии, в частности для изучения распадов хиггсовского бозона и для поиска новых частиц.

3 Предварительный анализ данных, набранных на детекторах ATLAS и LHCb в 2015 г.

Всего с июля по ноябрь 2015 г. на детекторе АТЛАС была записана статистика 3.87 обратных фемтобарна (fb^{-1}) при энергии столкновений протонов 13 ТэВ в системе центра масс. Эффективность набора данных составила 93 % (87 %, если требовать работоспособность нового дополнительного слоя внутреннего кремниевого детектора, расположенного на

радиусе 3.3 см от места встречи). Интеграл статистики, полностью пригодной для физического анализа, составил 3.5 fb^{-1} (3.2 fb^{-1} с дополнительным слоем внутреннего детектора).

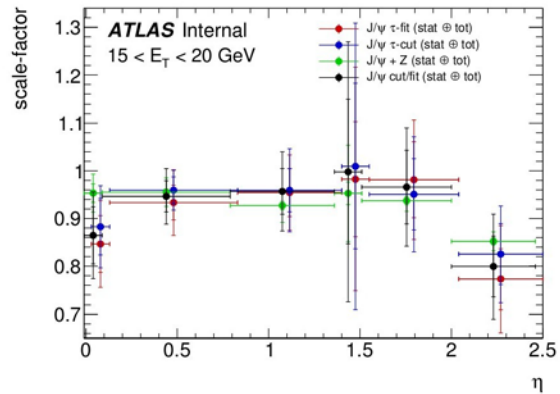


Рисунок 1. Отношение «эксперимент к моделированию» эффективности идентификации электронов и позитронов с поперечной энергией в интервале от 15 до 20 ТэВ, определенной разными методами, в зависимости от псевдобыстроты η (нелинейной функции полярного угла, $\eta=0$ (2.5) соответствует углу 90° (9.285°) от оси пучков).

Проигрыш по интегралу статистики в 6 раз (на данный момент – в 2016 г. планируется набрать около 25 fb^{-1}) по сравнению с заходом 1 (в 2012 году было набрано 20 fb^{-1} при энергии 8 ТэВ) с лихвой компенсируется выигрышем в партонных сечениях при возрастании энергии столкновений протонов. Этот выигрыш тем заметнее, чем больше масса рождающихся частиц (в том числе еще не открытых, гипотетических, присутствующих в теориях «новой физики» за пределами Стандартной Модели). Например, отношение сечений рождения при энергиях столкновений протонов 13 и 8 ТэВ (т.е. в условиях набора данных в 2015 и 2012 г.) составляет для глюино и скварков (суперсимметричных партнеров глюона и кварков) 15 при их массах 1 ТэВ и 35 при массах 1.5 ТэВ. Для новых тяжелых векторных бозонов Z' с массой 3 ТэВ отношение сечений рождения при 13 и 8 ТэВ равно 20, а для квантовых черных дыр с массой 5 (6) ТэВ это отношение равно 370 и 9 000 соответственно. Поэтому даже быстрый анализ набранной в сезоне 2015 г. статистики позволил существенно улучшить (по сравнению с результатами захода 1) пределы на массы и сечения рождения многих гипотетических частиц. Например, нижние пределы на массы глюино и нейтралино (легчайшей суперсимметричной частицы с нулевым электрическим зарядом – такая частица не может распасться ни на частицы Стандартной Модели,

ни на другие суперсимметричные частицы, поэтому она рассматривается очень хорошим кандидатом на роль частиц темной материи) теперь составляют величину от 1.4 до 1.8 ТэВ для глюино и от 0.4 до 0.8 ТэВ для нейтралино (в зависимости от каналов распада глюино и налагаемых условий отбора событий).

Также велось изучение процессов Стандартной Модели, в частности, парного и одиночного рождения топ-кварков, парного рождения Z бозонов. В каналах с двумя фотонами либо четырьмя лептонами в конечном состоянии изучалось рождение хиггсовского бозона H с массой около 125 ГэВ, открытого коллаборациями ATLAS и CMS в 2012 году, а также велся поиск более тяжелых хиггсоподобных частиц. Точность результатов пока серьезно ограничена объемом набранной статистики. Для хиггсовского бозона с массой 125 ГэВ измеренное при 13 ТэВ сечение оказалось несколько ниже предсказаний Стандартной Модели (а при 7 и 8 ТэВ измеренное сечение было выше предсказаний СМ, см. рис. 2), однако разница с предсказанием составляет всего 1.3 стандартных отклонения.

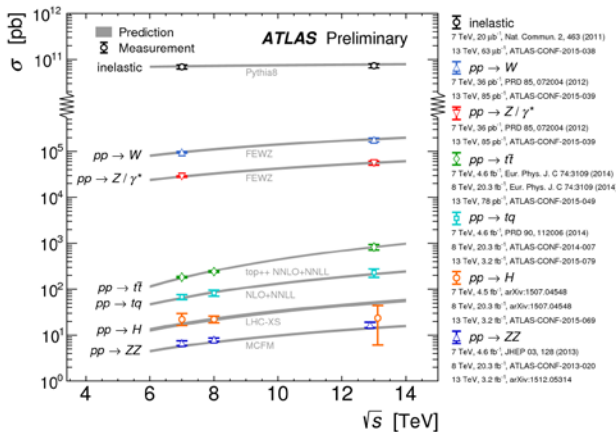


Рисунок 2. Сравнение измеренных на детекторе ATLAS при энергиях столкновений протонов 7, 8 и 13 ТэВ в системе центра масс сечений рождения различных частиц с предсказаниями Стандартной Модели (показаны серым цветом). t – топ-кварк, H – хиггсовский бозон с массой около 125 ГэВ.

При поиске новых (более тяжелых) хиггсовских бозонов коллаборациями ATLAS и CMS было обнаружено превышение над фоном в канале с двумя фотонами в конечном состоянии при инвариантной массе около 750 ГэВ, однако его статистическая значимость пока находится на уровне 2 стандартных отклонений (учитывая, что поиск избытка над фоном велся в широком интервале масс). Требуется значительно больший интеграл статистики,

чтобы определить, является ли наблюдаемый сейчас избыток сигналом от новой частицы, либо это просто статистическая флуктуация.

По результатам захода 2 на статистике, набранной на детекторе ATLAS в 2015 году, было подготовлено 24 конференционных ноты и 4 журнальных статьи, см. полный список на <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/December2015-13TeV>.

На детекторе LHCb по окончании набора данных при повышенной энергии 13 TeV в 2015 году был проведен предварительный отбор событий B-мезонов и b-барионов. За счет увеличенного сечения рождения B-адронов на такой энергии и улучшенного триггера выход интересующих нас распадов на тот же интеграл светимости увеличился в 2-3 раза. В сеансе 2015 года на LHCb было набрано около 0.3 фб-1 интегральной светимости, что примерно на порядок меньше объема, набранного в 2011-2012 годах. Повышение светимости и набор статистики, значительно превышающей набранную в 2015 г., запланированы на 2016 год.

4 Разработка программного обеспечения 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 проекта по измерению CP-нарушения в распадах B-мезонов и b-барионов в эксперименте LHCb на этапе 2015 года был проведен амплитудный анализ распада $B_0 \rightarrow D_0 \bar{p} K \pi$. Результаты этого анализа важны для измерения угла γ матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскава в распаде $B_0 \rightarrow D K \pi$ с использованием CP-собственного конечного состояния D-мезона. Распад описывался амплитудной моделью со вкладами промежуточных резонансов $K^*(892)_0$, $K^*(1410)_0$, $K^*(1430)_0$ и $D^*(2460)_-$. Кроме того, модель содержит широкие структуры, в том числе резонансы $K^*(1430)_0$ and $D^*(2400)_-$ в $K \pi$ S-волне и $D \pi$ S- и P-волнах. Измерены массы и ширины резонансов $D^*(2400)_-$ и $D^*(2460)_-$, а также комплексные амплитуды всех компонент амплитудной модели. Полученная модель будет необходима для следующего этапа – измерения угла γ матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскавы при помощи распадов $B_0 \rightarrow D K^+ \pi^-$.

Продолжен амплитудный анализ распада $\Lambda_b \rightarrow D_0 p \pi$, где найден ранее не предсказанный резонансный вклад в амплитуде

D_0 р вблизи порога, а также измерены квантовые числа состояния $\Lambda_{c(2940)}$. Для использования в этом анализе 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 пятимерном фазовом объеме распада $\Lambda_{c(2940)} \rightarrow D_0 p$, так и для значительного числа других анализов в эксперименте LHCb. В результате было показано, что широкая структура вблизи порога, по-видимому, является резонансным вкладом со спином $3/2$ в смеси с нерезонансной компонентой со спином $1/2$. Это первое наблюдение подобного резонанса в канале $D_0 p$. На данный момент не существует теоретических ожиданий для наличия такого резонанса. Кроме того, в анализе получены ограничения на спин и четность состояния $\Lambda_{c(2940)}$, которое по некоторым теоретическим моделям является экзотическим (D^*N молекулой).

5 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 (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:

5.1. 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.

5.2. 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.

Проект GBT является частью проекта радиационно-стойкого двунаправленного оптического линка для использования в программе модернизации 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 году 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. Так же исследовалась возможность реализовать протокол коммуникации GBT в FPGA установленных в адаптерах SPECS для постепенного перехода систем калориметра на GBT. Результаты моделирования проекта ПЛИС показали практическую осуществимость этого подхода.

В 2016 году планируется собрать тестовый стенд miniDAQ, который предназначен для работы с GBT, и реализовать режим работы адаптеров SPECS по протоколу GBT. Далее планируется установка набора коммутаторов GBT на калориметр и перепрограммирование адаптеров SPECS.

6 Модернизация оборудования и программного обеспечения BINP/GRID кластера и изучение возможностей повышения эффективности использования вычислительных ресурсов

В 2015 году продолжена модернизация оборудования и программного обеспечения вычислительного кластера BINP/GCF.

- 1) Развёрнута в полном объёме 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.

Также велись работы по запуску новой системы хранения данных (предназначенной прежде всего для данных коллаборации BaBar).

Поступили в ИЯФ и были установлены и подключены к сети 10 Gbit два сервера, проведено тестирование оборудования и первичная настройка 10 Gbit-ного коммутатора. В конце года поступили также диски большого объема (48 по 6 ТБайт), планируется их установка на серверы.

В 2015 году средняя утилизация ресурсов кластера по сравнению с 2014 годом выросла более чем в два раза, в течение нескольких месяцев превышая 75% (рис. 3).

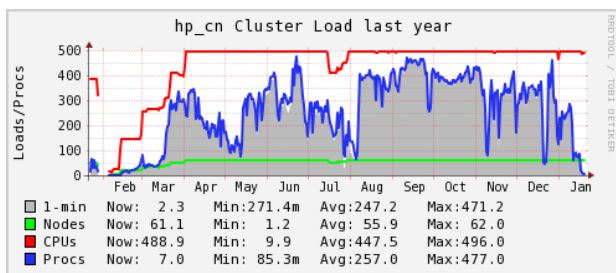


Рисунок 3. Средняя загрузка ГРИД кластера ИЯФ с января 2015 по январь 2016 г. Зеленая кривая – число работающих вычислительных узлов, красная – число работающих ядер, синяя – число запущенных процессов (задач). Доля серой области внутри синей кривой – эффективность использования процессорного времени.

7 Увеличение производительности информационной системы распределенной обработки данных GRID, развитие и расширение системы AGIS: совершенствование клиентского пакета и дальнейшая интеграция с другими программными компонентами вычислительной инфраструктуры детектора ATLAS

Компьютерная модель эксперимента ATLAS базируется на использовании современной Грид инфраструктуры (технологии географически распределенных параллельных вычислений), также известной как грид-вычисления или грид-сети. Ключевым информационным звеном в распределенной системе обработки эксперимента является информационная Грид система AGIS (ATLAS Grid Information System, <http://atlas-agis.cern.ch>), описывающая компьютерную модель и вычислительные ресурсы эксперимента. Возросший поток данных с детектора требует совершенствования матобеспечения и увеличения производительности системы распределенной обработки и передачи данных эксперимента ATLAS. В свою очередь, развитие и расширение распределенной системы обработки затрагивают также

модернизацию и увеличение информационного обеспечения грид сети - системы AGIS.

Информационная система представляет собой совокупность технического и программного обеспечения, осуществляющего централизованное хранение различных конфигурационных параметров, статических и динамических данных, необходимых для настройки, управления и функционирования всех систем и сервисов распределенной грид-сети эксперимента ATLAS. Рис. 4 схематически описывает предназначение и основные функциональные возможности системы. Благодаря внутренней реализации информационной модели, AGIS скрывая разнородность компьютерной инфраструктуры сети, предоставляет единое описание топологии вычислительных ресурсов ATLAS сайтов (define topology).

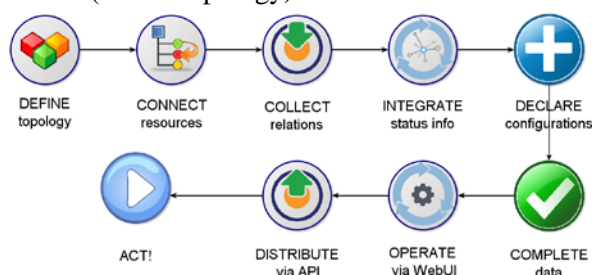


Рисунок 4: Ключевые функциональные возможности системы AGIS.

Основная функциональная особенность системы (connect resources), заключается в разделении и структурировании вычислительных ресурсов (как программных служб, так и физических компьютерных мощностей) предоставляемых грид-сайтами WLCG с одной стороны (provided by), и их фактическим отображением и организацией (used by) с точки зрения использования в эксперименте ATLAS. Рис. 5 более детально иллюстрирует данную концепцию описания ресурсов для базовых информационных моделей системы. Следующие функциональные блоки (collect-integrate-declare), отображенные на рисунке-1, описывают возможности системы автоматического сбора статических и динамических параметров ресурсов сайта с внешних информационных систем (например, gLite BDII, GOCDB, MyOSG, REBUS), дальнейшая интеграция полученных данных (например, информация о простоях ресурсов сайта, всевозможные статусные данные) в единую информационную модель эксперимента, а также дополнительное описание различных конфигурационных структур ресурсов эксперимента (Squid, Frontier, Perfsonar и др.). После проверки данных, сохранения их в удобном для

эксперимента виде, система AGIS позволяет работать с информацией через пользовательские интерфейсы управления.

Для осуществления контроля и управления данными информационная система предоставляет пользовательские клиентские пакеты управления - пользовательский WebUI (Web User Interface) и CLI (Command Line Interface) интерфейсы, а также интерфейс прикладного программирования API (Application Programming Interface). Данный этап работ был посвящен совершенствованию и развитию пользовательского WebUI интерфейса управления и обновлению программного API интерфейса для дальнейшей интеграции системы с новыми программными компонентами вычислительной инфраструктуры.

WebUI интерфейс представляет собой совокупность средств, при помощи которых пользователь взаимодействует с информационной системой через Web браузер. Пользовательский WebUI интерфейс управления включает в себя инструментарий (набор интерактивных HTML страниц и форм) для регистрации новых объектов в системе (например, создание новой грид-службы, вычислительного ресурса, или элемента хранения данных), а также позволяет визуализировать содержимое базы данных информационной системы в удобном для пользователей виде. Например, администраторы грид-сайтов эксперимента АТЛАС непосредственно используют WebUI для обновления информации о ресурсах сайта (ATLAS Site), настройки параметров PandaQueue объектов запуска заданий системы PandDA (The PanDA Production ANd Distributed Analysis system), создания и редактирования информационных DDMEndpoint объектов системы хранения данных DDM (Distributed Data Management System).

С точки зрения технической реализации WebUI интерфейс управления системы фактически является веб-приложением, серверная часть которого написана на языке программирования python, используя фреймворк разработки веб-приложений Django. Клиентская часть интерфейса, помимо стандартных конструкций языка HTML и CSS, также использует AJAX функционал для создания интерактивных страниц с динамической загрузкой данных с сервера.

Одним из важных требований, предъявляемых к WEB интерфейсу, является функционал для проверки и валидности данных, введенных пользователем. Данный

уровень защиты препятствует вводу в систему заведомо неправильных данных как на уровне соответствия типов, так и на уровне допустимых значений определенного параметра.

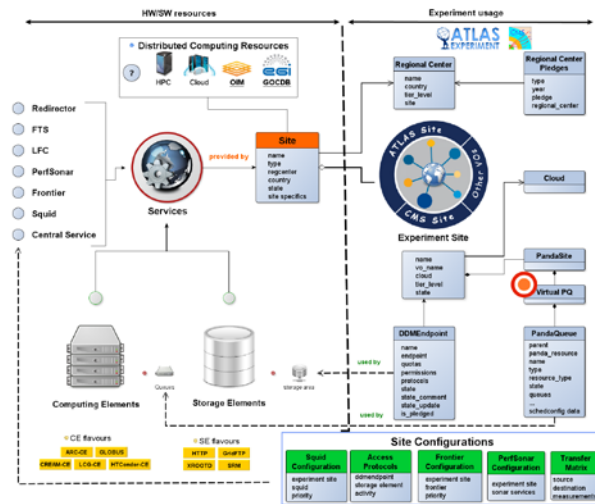


Рисунок 5. Базовая информационная модель системы AGIS: разделение ресурсов, предоставляемых грид-сайтам (provided by) и их отображение (used by) на экспериментозависимое описание компьютерной модели АТЛАС.

Например, при регистрации новой АТЛАС службы (сервиса) в системе, необходимо предоставить строго определенный набор входных данных, при этом идентификатор ресурса должен иметь строго predetermined формат, а грид-узел, для которого создается сервис, должен быть уже зарегистрирован в базе информационной системы. В ходе работ были обновлены и расширены модули валидации данных на стороне сервера, введенных пользователем через формы HTML страниц сайтов.

В рамках данного этапа работы было произведено обновление табличного вывода данных (используя библиотеку JQuery, datatable) и их структурного отображения в виде дерева элементов. В ходе расширения информационной модели AGIS - внедрения новых информационных объектов в систему - был также расширен пользовательский интерфейс и реализован соответствующий функционал со стороны WebUI приложения.

В качестве примеров можно привести разработку и реализацию пользовательских форм (а также их соответствующие серверные модули) для создания и редактирования конфигурации вычислительных ресурсов нового типа HTCondor-CE в эксперименте АТЛАС, и нового типа ресурса хранения, использующего технологию Object Store.

Данные обновления затрагивают и модернизацию соответствующих API функций клиентского пакета AGIS.

hments/1157834/1665491/2015-09-17.LAr-LATOME-FW.status_update.pdf
[12] <http://atlas-agis.cern.ch>

Все разработанные расширения и обновления функционала системы были установлены на основные сервера кластера. На сегодняшний день AGIS успешно используется в производстве эксперимента АТЛАС, являясь главным информационным ресурсом для всех программных систем и сервисов компьютерного обеспечения распределенной грид сети эксперимента АТЛАС.

Заключение

Все пункты плана работ на 2015 год выполнены. Благодаря двухлетней тщательной подготовительной работе удалось обеспечить высокую (более 90 %) эффективность набора данных в новом сезоне при рекордной энергии 13 ТэВ и их высокое качество. Проведен предварительный анализ данных, получены и опубликованы первые результаты.

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] <https://atlas-larmon.cern.ch/LArPage1/>
- [2] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasComputing/LArElectronicsCalibration>
- [3] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/EGammaIdentificationRun2>
- [4] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/ElectronEfficiencyRun2>
- [5] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/December2015-13TeV>
- [6] Aad, G., ... Anisenkov, A.V. et al. "Measurement of the ZZ Production Cross Section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector" arXiv:1512.05314, submitted to PRL
- [7] Aad, G., ... Anisenkov, A.V. et al. "Search for new phenomena with photon+jet events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector" arXiv:1512.05910, submitted to JHEP
- [8] Aad, G., ... Anisenkov, A.V. et al. "Search for strong gravity in multijet final states produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC" arXiv:1512.02586, submitted to JHEP
- [9] Aad, G., ... Anisenkov, A.V. et al. "Search for New Phenomena in Dijet Mass and Angular Distributions from pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector" arXiv:1512.01530, submitted to PLB
- [10] ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade. Technical Design Report. ATLAS-TDR-022-2013
- [11] LAr LATOME Firmware Status update 2015-09-17 <https://indico.cern.ch/event/444316/contribution/0/attach>

№ 15.1.3 Проверка Стандартной Модели в прецизионных экспериментах и редких распадах

Введение

Целью экспериментальных исследований, которые объединены в этом проекте, является проверка Стандартной Модели — современной теории взаимодействий элементарных частиц и поиск явлений, выходящих за ее пределы. В проект включены эксперименты, проводимые или планируемые на установках со встречными пучками, а также ряд других экспериментов.

Эксперименты на встречных пучках в течение нескольких десятилетий являются одним из наиболее важных источников новых данных о взаимодействиях элементарных частиц. В данном проекте — это эксперименты на электрон-позитронных коллайдерах в области энергий в системе центра масс до 12 ГэВ. Эта область энергий представляет большой интерес для экспериментальных и теоретических исследований, в частности, так как в ней находятся семейства частиц, содержащих тяжёлые c - и b -кварки.

Для проекта электрон-позитронного коллайдера с высокой светимостью — Супер Чарм-Тау фабрики, который предложен ИЯФ СО РАН, данный исследовательский проект включает разработку детектора, оптимизированного для регистрации редкого процесса распада $\tau \rightarrow \mu \gamma$. Для него разрабатывается система идентификации частиц на основе аэрогелевых черенковских счётчиков.

Другие эксперименты на ускорителях в данном проекте — это эксперимент MEG в PSI, в котором ведётся поиск нарушающего закон сохранения лептонного числа распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, и эксперимент по измерению $g-2$ в FNAL. В первом из них (MEG 1) уже опубликован результат по части статистики, готовится публикация по всей статистике. В 2016 году начнётся набор данных на значительно более чувствительном детекторе MEG2. В эксперименте по измерению $g-2$ в FNAL планируется улучшить точность измерения этой величины по сравнению с измерением, выполненным ранее в Брукхейвенской Национальной Лаборатории.

Основной целью разработки двухфазных криогенных лавинных детекторов (КЛД) в данном проекте является использование их в экспериментах по поиску темной материи методом регистрации сигнала от ядер отдачи с

энергией 100 кэВ и ниже. Проект включает разработку в ИЯФ СО РАН детектора с предельной чувствительности, ниже 5 кэВ.

1 Набор экспериментальных данных с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП4М в области энергии 4,2 - 6,8 ГэВ в системе центра масс. Анализ экспериментальных данных в области энергии 3,1 - 3,7 ГэВ в системе центра масс с целью измерения полного сечения e^+e^- аннигиляции в адроны

В эксперименте КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М проведено прецизионное измерение величины R в семи точках в диапазоне энергии центра масс от 3.12 до 3.72 ГэВ. Величина R имеет фундаментальное значение в физике частиц, в частности, для расчётов в рамках Стандартной Модели. Она определяется как отношение сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны с учётом радиационных поправок к сечению рождения мюонной пары в борновском приближении. Достигнутая точность измерения в большинстве точек лучше либо равна 3.3% при систематической ошибке 2.1%. Наше измерение R имеет лучшую точность, чем измерения других детекторов (рисунок 1).

В 2015 году был начат набор статистики в области J/ψ -мезона. В 2016 году этот набор будет продолжен, кроме того запланирован набор в области резонанса $\psi(3770)$. Набранные данные позволят уточнить ряд вероятностей распадов J/ψ -мезона и измерить с высокой точностью массы нейтральных и заряженных D -мезонов.

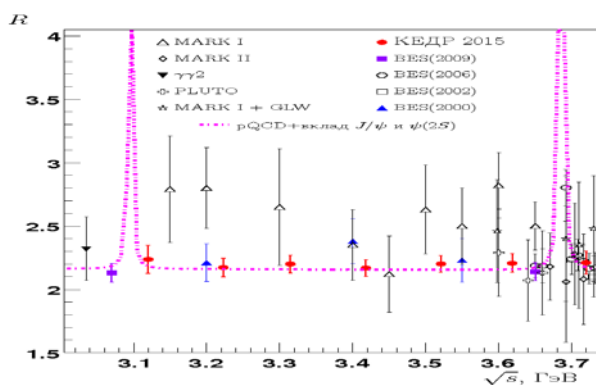


Рисунок 1. Результаты измерения R .

2 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 состояния $Y(2175)$. Изучение распадов $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$ и $J/\psi \rightarrow K^+K^-$

В 2015 году 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 $Y(2175)$. Проведен запуск модернизированной системы измерения энергии пучка BEPC-II методом обратного комптоновского рассеяния. Относительная статистическая точность измерения энергии электронов (позитронов) составила около 5×10^{-5} за 20 минут набора данных.

Продолжалась обработка набранной ранее статистики, в том числе изучение распадов J/ψ -мезона по данным, набранным на BESIII в предыдущих экспериментах. 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 , π^0 , $f_0(980)$, ϕ , π^0 , η , ϕ , $\pi^+\pi^-$, p , \bar{p} , $a_0(980)$.

3 Модернизация электроники и программного обеспечения калориметра детектора Belle на коллайдере KEKB. Анализ экспериментальных данных: а) измерение угла Треугольника Унитарности бета во времени-зависимом анализе распадов $B^0 \rightarrow D^0 h^0$, $D^0 \rightarrow K^s_0 \pi^+ \pi^-$, где $h^0 = \pi^0, \eta, \omega$, с использованием модельно-независимого Далиц-анализа; б) поиск распадов экзотических состояний, похожих на $X(3872)$, в моды с участием η_c -мезона; в) изучение экзотических состояний: заряженных $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ и нейтрального $Z_b(10610)$ и изучение распадов состояний Z_b в конечные состояния с B -мезонами; г) изучение зависимости сечения рождения $B\bar{B}^*$ и $B^*B\bar{B}^*$ от энергии в системе центра масс в области энергии резонанса $Y(5S)$; д) Далиц-анализ распада $B^0\text{-bar} \rightarrow D^{*+} \omega \pi^-$; е) изучение распадов тау-лептона: $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu$; $\tau^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \nu$; $\tau^- \rightarrow K^- K^+ \pi^- \nu$; ж)

измерение вероятностей полулептонных распадов $X_i^- c^+$; з) измерение вероятностей распадов $X_i^- c^+ \rightarrow X_i^- \pi^+ \pi^+$

3.1. Изучение экзотических состояний боттомония

В результате изучения процессов $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^+\pi^-$ ($n=1,2,3$) определены квантовые числа двух обнаруженных ранее заряженных боттомоний-подобных состояний

и . Кроме того, большой объем данных, полученный в эксперименте Belle, позволил не только выделить трехчастичные процессы $Y(5S) \rightarrow B\bar{B}^*\pi$ и $B^*B\bar{B}^*\pi$, но и впервые провести анализ динамики этих процессов. На Рис. 2 показаны распределения по инвариантной массе $B\bar{B}^*$ и $B^*B\bar{B}^*$ систем и результаты аппроксимации с помощью различных моделей. По результатам исследования подготовлена статья в настоящее время находящаяся на стадии реферирования.

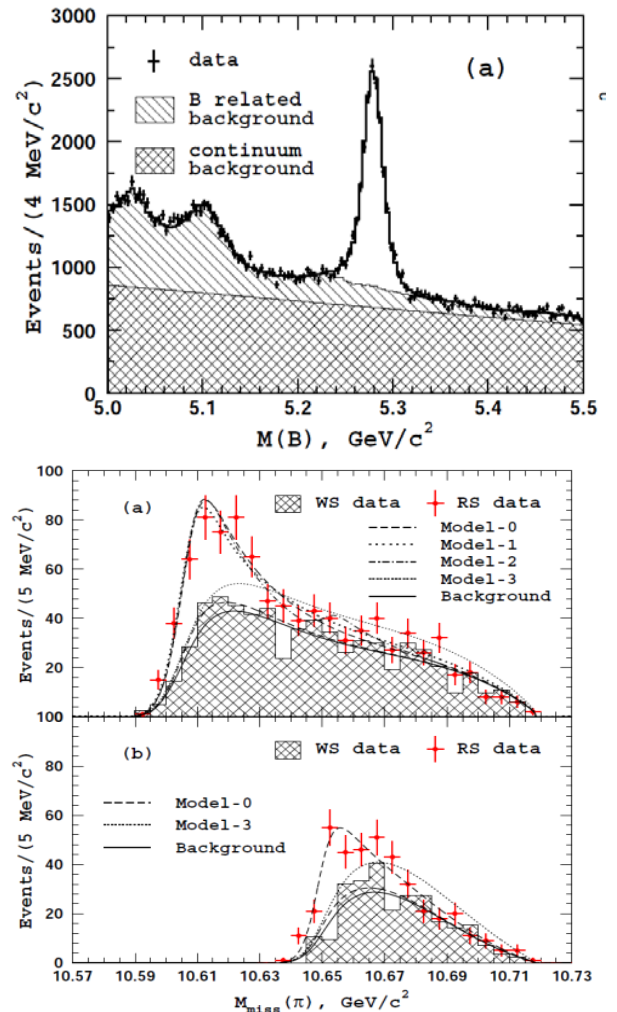


Рисунок 2. Инвариантная масса B -кандидата (слева). Масса отдачи к пиону для событий $B\bar{B}^*\pi$ (справа сверху) и $B^*B\bar{B}^*\pi$ (справа внизу).

3.2. Поиск распадов В-мезонов в конечные состояния с η_c -мезоном

Был проведен поиск экзотических состояний подобных $X(3872)$ в распадах заряженных В с последующим распадом X резонанса в конечные состояния с участием η_c мезона: $\eta_c\pi^+\pi^-$, $\eta_c\omega$, $\eta_c\eta$ и $\eta_c\pi^0$. Ни в одном из изученных каналов не было обнаружено статистически значимого сигнала и были поставлены лишь верхние пределы на соответствующие произведения относительных вероятностей.

3.3. Изучение переходов $Y(5S) \rightarrow Y(1,2S)\eta$

Проведен поиск подобных переходов с использованием данных, полученных в эксперименте Belle. В результате, впервые обнаружены переходы $Y(5S) \rightarrow Y(1,2S)\eta$ и измерены их относительные вероятности. Предварительные результаты представлены на международных конференциях. В настоящее время готовится статья в журнал Physical Review D.

3.4. Измерение относительной вероятности полупетонных распадов $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda l^+ \nu$

Экспериментальное измерение абсолютного значения вероятности этого распада имеет ряд технических сложностей, что, как правило, приводит к большой модельной неопределенности полученных результатов. Была разработана модельно-независимая методика измерения вероятности полупетонного распада Λ_c^+ -бариона. Работа завершена и в настоящее время результаты готовятся к публикации в журнале.

3.5. Изучение распада $B^0 \rightarrow D^* \omega \pi$

Выполнен амплитудный анализ распада $B^0 \rightarrow D^* \omega \pi$. Обнаружены вклады промежуточных $\rho(770)$, $\rho(1450)$ и D^{**} резонансов (см. Рис. 3). Помимо относительных вероятностей распадов, были измерены продольные поляризации D^{**} -состояний, парциально-волновые вклады, а также измерена полная ширина распада $B^0 \rightarrow D^* \omega \pi$, согласующаяся с более ранними измерениями CLEO и BaBar.

3.6. Изучение распадов τ -лептона в три псевдоскалярных заряженных мезона и нейтрино

В настоящее время наблюдается систематическое расхождение результатов измерений абсолютных величин вероятностей распадов τ -лептона в три псевдоскалярных заряженных мезона и нейтрино, которые получены в экспериментах Belle и BaBar.

Вновь проведенный систематический

анализ всей совокупности данных позволил разработать алгоритм, который позволит провести полный учет корреляций в системе идентификации частиц.

3.7. Измерение $\cos(2\phi_1)$ в распадах $B^0 \rightarrow D^{(*)0} h^0$, $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$

Процедура анализа полностью разработана и проверена с помощью моделирования. В качестве дополнительной проверки, с помощью отобранных событий было выполнено измерение времени жизни B^0 -мезона. Результат измерения согласуется со среднемировым значением. В данный момент разработка процедуры входит в завершающую стадию, определяются источники систематических неопределенностей.

Рисунок 3. Результаты аппроксимации экспериментальных: квадрат инвариантной массы $\omega\pi$ -пары (слева) и квадрат инвариантной массы $D^*\pi$ -пары (справа).

3.8. Модернизация электроники и программного обеспечения детектора

В 2015 году было закончено изготовление модулей формирователей-оцифровщиков торцевого калориметра и произведена их проверка. В настоящий момент все крейты торцевой части калориметра установлены на детектор и укомплектованы модулями. Проложены и проверены кабели между электроникой и системой сбора данных детектора, проведен набор данных с использованием космических частиц.

4 Завершение анализа данных эксперимента ВаВаг по измерению элемента $|V_{ub}|$ матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Элемент матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава $|V_{ub}|$, характеризующий связь b - кварка с u - кварком, является фундаментальным параметром Стандартной модели. Измерение CP-нарушения в распадах B - мезонах, в частности угла β , и измерение $|V_{ub}|$, дают возможность проверки механизма CP- нарушения в Стандартной модели. Наилучшим образом это иллюстрируется унитарным треугольником, который является графическим представлением условия унитарности для матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Длина стороны, которая противоположна углу β пропорциональна величине $|V_{ub}|$.

Измерение $|V_{ub}|$ является сложной задачей как теоретически, так и экспериментально. Экспериментальная проблема состоит в том, что величина сигнала $B \rightarrow X_c e \nu$ в 50 раз меньше фона от распадов $B \rightarrow X_c e \nu$. Выделение сигнала от фона может быть получено выбором области в фазовом пространстве, где фон от $B \rightarrow X_c e \nu$ подавлен.

В настоящей работе представлено измерение спектра электронов с импульсами больше $0.8 \text{ GeV}/c$ в полупертоновых нешармованных распадах B -мезонов. Данные, использованные в анализе, были набраны на детекторе ВаВаг, работавшем на асимметричном e^+e^- коллайдере PEP-II. В результате эксперимента было набрано 88 миллионов $B\bar{B}$ событий, что соответствует интегральной светимости 80.4 fb^{-1} в области $\Upsilon(4S)$ - резонанса. Интегральная светимость 9.5 fb^{-1} была набрана при энергии в системе центра масс e^+e^- на 40 MeV ниже $\Upsilon(4S)$ - резонанса. Эти события были использованы для вычитания нерезонансного рождения в области $\Upsilon(4S)$ - резонанса.

Результаты измерения $|V_{ub}|$ показаны на рисунке 4, где точки представляют результаты обработки экспериментальных данных с ис-

пользованием различных теоретических моделей. Данное измерение является одним из лучших по точности.

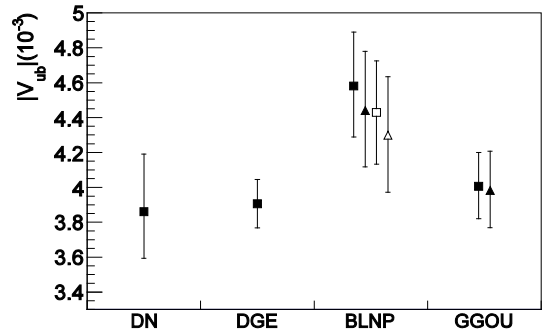


Рисунок 4. Величина $|V_{ub}|$, полученная в результате обработки экспериментальных данных с использованием различных теоретических моделей.

5 Моделирование эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона $g-2$

В 2015 году продолжилась подготовка эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона в Национальной ускорительной лаборатории им Э.Ферми (США). Были собраны все элементы мюонного накопительного кольца, проведены испытания основного сверхпроводящего соленоида кольца и достигнуто проектируемое магнитное поле, началась работа по достижению высокой однородности поля. Начало набора данных запланировано на 2017 год.

Группа ИЯФ принимает участие в моделировании эксперимента и оценке различных систематических эффектов. В эксперименте планируется применить новую методику регистрации сигнала прецессии спина мюона, когда регистрируется осцилляция не числа электронов, попавших в детектор, а полной энергии, выделенной в калориметре. Данная методика не применялась ранее в предыдущих измерениях аномального магнитного момента мюона. Группа ИЯФ работает над оценкой вкладов различных эффектов в систематическую ошибку измерения при применении методики.

6 Обработка данных 2009-2013 годов эксперимента MEG с целью уточнения существующего предела на величину вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$. Модернизация детектора для эксперимента MEG2.

Эксперимент MEG (PSI, Швейцария) нацелен на поиск возможного нарушения зако-

на сохранения лептонного числа в безнейтринном распаде мюона в позитрон и гамма-квант. Набор данных с первой версией детектора происходил в 2009-2013 гг. Анализ набранной до 2011 года статистики позволил улучшить верхний предел на вероятность распада мюона $B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma)$ на полтора порядка и достичь величины $\sim 5.7 \times 10^{-13}$. Анализ всей статистики позволит понизить предел еще примерно в полтора раза (Рисунок 5). В 2015 году была закончена финальная обработка всех набранных данных. Одними из изменений обработки были как улучшения в самих алгоритмах реконструкции событий, так и, например, дополнительный учет измеренного отклонения формы мишени от плоскости, дополнительная фильтрация событий распада мюонов на лету. В конце года была открыта для анализа сигнальная область событий. И уже в 2016 году будет закончен анализ наблюдаемых спектров методом максимального правдоподобия, по результатам которого будет опубликован финальный результат эксперимента MEG-1.

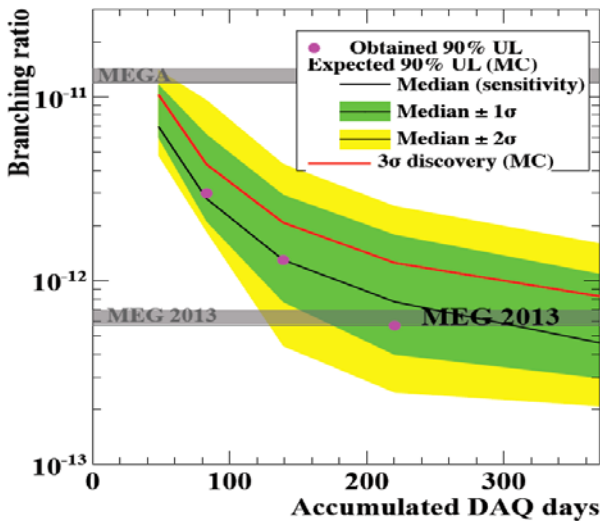


Рисунок 5. Полученная и ожидаемая чувствительность в зависимости от используемого набора данных на вероятность безнейтринного распада мюона в эксперименте MEG

С 2013 года активно ведутся работы по полной модернизации всех систем детектора для следующей серии экспериментов со значительно улучшенной чувствительностью. Новый эксперимент получил название MEG2. В 2015 году активно изготавливались новые подсистемы детектора и проводились тестовые испытания на пучках. В конце года прошел первый пред-инженерный заход с частично установленными подсистемами, и была проверена механика сборки внутренней части детектора. 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 2016 году планируется закончить монтаж подсистем MEG2 в экспериментальном зале, провести инженерный заход с полностью собранным детектором.

7 Разработка и создание двухфазного криогенного лавинного детектора в аргоне с электролюминесцентным зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица

В 2015 году был разработан и создан двухфазный криогенный лавинный детектор (КЛД) в аргоне с электролюминесцентным зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица (толстые газовые электронные умножители/гейгеровские лавинные фотодиоды). На Рис. 6 показана принципиальная схема такого детектора.

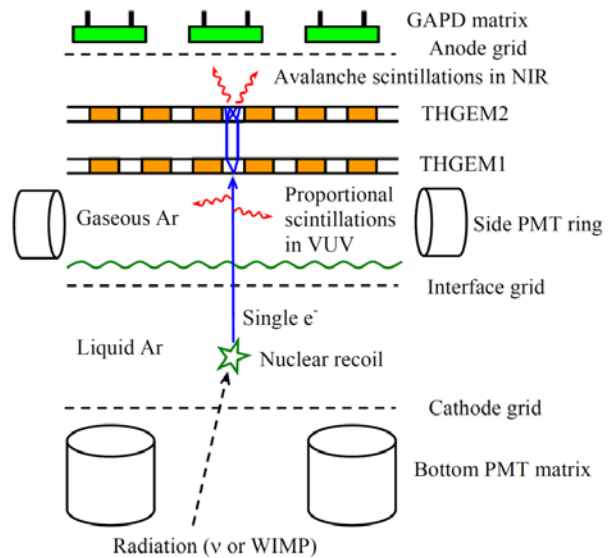


Рисунок 6. Принципиальная схема двухфазного КЛД в Ar с электролюминесцентным зазором (на основе сборки боковых ФЭУ) и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица.

Криогенная камера прототипа детектора имела объем 9 л. ЭЛ зазор имел толщину в газовой фазе 1.8 см; он был образован двумя пластинами ТГЭУ с активной площадью 10x10 см², одна из которых находилась в жидкости, а другая в газе. Толщина активного слоя жидкого

Аг в дрейфовом зазоре составила 5 см. Для амплитудной информации использовался оптический (электролюминесцентный) сигнал в ЭЛ зазоре, который считывался с помощью сборки из четырех компактных криогенных ФЭУ Hamamatsu R6041-506. Для координатной информации использовался сигнал с комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД-матрица. Для этого была спроектирована и изготовлена сборка 5x5 матрицы ГЛФД «Hamamatsu MPPC S10931-100P».

8 Разработка прототипа системы идентификации частиц детектора для Супер Чарм-тау фабрики на основе фокусирующего аэрогеля

В течение нескольких последних лет в ИЯФ СО РАН разрабатывается проект электрон-позитронного коллайдера с высокой светимостью, Супер Чарм-тау фабрики, и рассматриваются различные варианты детектора для этого коллайдера. Одной из задач нового детектора будет эксперимент по поиску процесса $\tau \rightarrow \mu \gamma$, идущего с нарушением лептонного числа.

Эксперимент по поиску процесса $\tau \rightarrow \mu \gamma$ не предъявляет специальных требований к энергии пучков. Как показывают расчеты, основным требованием является набор максимально возможной статистики. Данный эксперимент будет использовать статистику набранную во всех точках по энергии выше порога рождения тау-лептонов.

В 2015 году продолжались работы по разработке прототипа системы идентификации частиц, в которой используется регистрация черенковских колец (RICH) для детектора Супер Чарм-тау фабрики: были разработаны методы измерения и контроля механических параметров радиаторов детекторов на основе аэрогеля, таких как: линейные размеры, плотность и плоскостность входной и выходной поверхности блока. Также был разработан и произведен станок для прецизионной резки блоков аэрогеля. Новый станок позволил уменьшить время резки одного блока с 2 часов до 15 минут. Статья «Аэрогелевые черенковские детекторы в экспериментах на встречных пучках», в которой, в частности, рассмотрены радиаторы для детекторов RICH, была опубликована в 2015 году в журнале Успехи физических наук.

Заключение

В 2015 году 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. Ведётся обработка данных. 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.

Завершается анализ данных эксперимента BaBar (США) с целью измерения параметра Стандартной модели $|V_{ub}|$, результат планируется опубликовать в 2016 году.

В эксперименте MEG в PSI (Швейцария) получен лучший в мире предел на вероятность нарушающего закон сохранения лептонного числа распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ и готовится финальная публикация. В 2016 году начнётся набор данных с модернизированным детектором MEG2.

В 2015 году ияфовские физики активно участвовали в подготовке эксперимента по измерению величины $g-2$ с лучшей в мире точностью. Этот эксперимент в 2017 году планируется начать в Фермилаб (США).

В 2016 году в ИЯФ активно велись методические работы: разработка системы идентификации для детектора для Супер С-Тау фабрики и детектора для экспериментов по поиску темной материи на основе двухфазных криогенных лавинных детекторов.

Список использованных источников

- [1] V.V. Anashin e.a. (KEDR collaboration). Measurement of R at KEDR. Nuclear and Particle Physics Proceedings, vol.260, 2015, Pages 85-86.
- [2] К.Ю.Тодышев и др. (коллаборация КЕДР) Recent results from the KEDR detector at VEPP-4M International Workshop on e^+e^- collisions from Phi to Psi 2015 23-26 сентября 2015 года, г. Хэфей, Китай.
- [3] С.И.Эйдельман. Измерение R при низких энергиях International Workshop on "Flavour Changing and

- Conserving Processes" (FCCP2015) 10-12 сентября 2015 г., Капри, Италия.
- [4] Т.А.Kharlamova e.a. (KEDR collaboration). Measurement of the product of the leptonic width of the J/ψ meson and the branching ratio for its decay to hadrons. *Physics of Atomic Nuclei* Volume 78, Issue 3, 29 May 2015, Pages 325-332/
- [5] A. Yu. Barnyakov et al. Testing aerogel Cherenkov counters with $n = 1.05$ using electrons and muons. *NIM A*, будет опубликовано.
- [6] A. Yu. Barnyakov. et al. Operation and performance of the ASHIPH counters at the KEDR detector. *NIM A*, будет опубликовано.
- [7] M. Yu. Barnyakov, et al. Radiation hardness test of the digital. *NIM A*, будет опубликовано.
- [8] A.M. Baldini et al., A new cylindrical drift chamber for the MEG II experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015.
- [9] M. Ablikim, et al., Observation and Spin-Parity Determination of the $X(1835)$ in $J/\psi \rightarrow \gamma K^0 K^0$ eta, *Phys.Rev.Lett.* 115 (2015) 9, 091803, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.091803
- [10] M. Ablikim, et al., Observation of the isospin-violating decay $J/\psi \rightarrow \phi \pi^0 f_0(980)$, *Phys.Rev. D*92 (2015) 1, 012007, DOI: 10.1103/PhysRevD.92.012007
- [11] M. Ablikim, et al., Observation of the electromagnetic doubly OZI-suppressed decay $J/\psi \rightarrow \pi^0$, *Phys.Rev. D*91 (2015) 11, 112001, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.112001
- [12] M. Ablikim, et. al., Study of $J/\psi \rightarrow \eta \phi \pi^+ \pi^-$ at BESIII, *Phys.Rev. D*91 (2015) 5, 052017, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.052017
- [13] M. Ablikim, et. al., Observation of $J/\psi \rightarrow a_0(980)$ at BESIII, *Phys.Rev.D*90 (2014) 5, 052009, *Phys.Rev. D*91 (2015) 3, 039901, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.039901, 10.1103/PhysRevD.90.052009
- [14] Danilyuk, A.F., Kononov, S.A., Kravchenko, E.A., Onuchin, A.P. Aerogel Cherenkov detectors in colliding beam experiments. *Physics-Uspekhi*, Volume 58, Issue 5, p.503-511. DOI:10.3367/UFNe.0185.201505k.0540
- [15] Amplitude analysis of $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^+\pi^-$ at $\sqrt{s}=10.866$ GeV, A. Garmash, A. Bondar, A. Kuzmin, et al, *PRD* 91, 072003 (2015).
- [16] Search for $B^+ \rightarrow l^+ \nu_l \gamma$ decays with hadronic tagging using the full Belle data sample, A. Heller, P. Goldenzweig, M. Heck, T. Kuhr, A. Zupanc, et al, *PRD* 91, 112009 (2015).
- [17] Evidence for the decay $B^0 \rightarrow \eta \pi^0$, B. Pal et al, *PRD* 91, 011101(R) (2015).
- [18] Search for the decay $B^+ \rightarrow K^{*0} K^{*+}$, Y.M. Goh, Y. Unno, B.G. Cheon, et al, *PRD* 91, 071101(R) (2015).
- [19] Search for B decays to final states with the η_c meson, A. Vinokurova, A. Kuzmin, S. Eidelman, et al, *JHEP* 1506, 132 (2015).
- [20] Search for the Dark Photon and the Dark Higgs Boson at Belle, I. Jaegle et al, *PRL*114, 211801 (2015).
- [21] Observation of $X(3872)$ in $B \rightarrow X(3872) K \pi$ decays, A. Bala, V. Bhardwaj, K. Trabelsi, J.B. Singh, et al, *PRD* 91, 051101(R) (2015).
- [22] Measurement of the Direct CP Asymmetry in $B \rightarrow X_{s+d} \gamma$ Decays with a Lepton Tag, L. Pesantez, P. Urquijo, J. Dingfelder, et al, *PRL*114, 151601 (2015).
- [23] Search for $B_s^0 \rightarrow \gamma \gamma$ and a measurement of the branching fraction for $B_s^0 \rightarrow \phi \gamma$, D. Dutta, B. Bhuyan, et al, *PRD* 91, 011101(R) (2015).
- [24] Measurement of the $B \rightarrow X_s \gamma$ branching fraction with a sum of exclusive decays, T. Saito, A. Ishikawa, H. Yamamoto, et al, *PRD* 91, 052004 (2015).
- [25] Study of D^{**} production and light hadronic states in the $B^0 \rightarrow D^{*+} \omega \pi^-$ decay, D. Matvienko, A. Kuzmin, S. Eidelman, et al, *PRD* 92, 012013 (2015).
- [26] Measurement of $B^0 \rightarrow D_s^- K_s^0 \pi^+$ and $B^+ \rightarrow D_s^- K^+ K^+$ branching fractions, J. Wiechczynski, J. Stypula, et al, *PRD* 91, 032008 (2015).
- [27] Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \psi(2S)$ via initial state radiation at Belle, X.L. Wang, C.Z. Yuan, C.P. Shen, P. Wang, et al, *PRD* 91, 112007 (2015).
- [28] Search for $B^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ and $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ decays using hadronic tagging, Y. Yook, Y.-J. Kwon, et al, *PRD* 91, 052016 (2015).
- [29] Measurement of $e^+e^- \rightarrow \gamma \chi_{cJ}$ via initial state radiation at Belle, Y.L. Han, X.L. Wang, C.Z. Yuan, C.P. Shen, P. Wang, et al. (BelleCollaboration), *PRD* 92, 012011 (2015).
- [30] Charged charmonium-like $Z(4430)^+$ from rescattering in conventional B decays, P. Pakhlov, T. Uglov, *Phys. Lett.* B748, 183 (2015).
- [31] Ю.И.Сковпень (от коллаборации BaBar). Вена (Австрия), июль 2015 г.
- [32] Logashenko et al., The Measurement of the Anomalous Magnetic Moment of the Muon at Fermilab, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 44, 031211 (2015). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4917553>
- [33] Д. Матвиенко, Recent D^{**} and D_s^{**} observations at Belle, ICNFP 2015, Колимбари Крит (Греция), август 2015 г.
- [34] А. Бондарь, *HadronSpectroscopy*, LP2015, Любляна (Словения), август 2015 г.
- [35] А. Гармаш, Recent results on exotic quarkonium states from Belle, EPS-HEP 2015, Вена (Австрия), июль 2015 г.
- [36] П. Кроковный, Zc and Zb states, *International Workshop on QCD Exotics 2015*, Цзинань (Китай), июнь 2015 г.
- [37] А. Винокурова, Search for B decays to final states with the η_c meson, CHARM 2015, Детройт (США), май 2015 г.
- [38] С. Эйдельман, Leptonic and semileptonic charm decays at Belle, CHARM 2015, Детройт (США), май 2015 г.

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

Введение

В ИЯФ СО РАН активно ведутся работы по разработке новых систем и приборов для проведения фундаментальных исследований и решения прикладных задач. Целью данного проекта является разработка детекторов нового поколения для проведения низкофоновых экспериментов, систем идентификации частиц и для применения в медицине и безопасности. Основной целью данного этапа работ являлось формирование технологического задела в создании новых типов детекторов и оптимизация их характеристик.

1 Разработка системы сбора данных и медленного контроля двухфазного КЛД в Ag объемом 10 л с электролюминесцентным зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица

В 2015 году была продолжена разработка системы сбора данных и медленного контроля двухфазного КЛД в Ag объемом 10 л с электролюминесцентным зазором и комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица (газовые электронные умножители /гейгеровские лавинные фотодиоды). В частности, была завершена разработка системы сбора данных с матрицы ГЛФД размером 3x3 в рамках пакета программ LabView. На рисунке 1 показан интерфейс программы во время набора статистики на двухфазном КЛД.

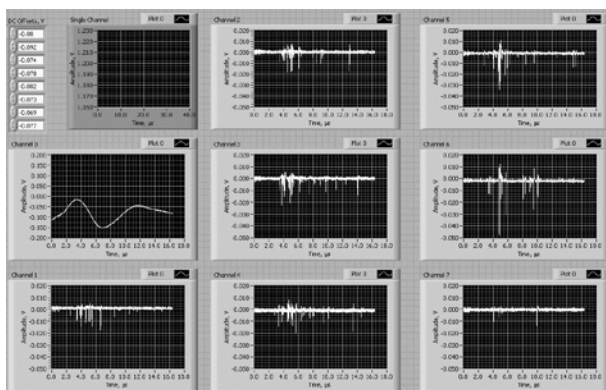


Рисунок 1. Интерфейс программы системы сбора данных во время работы двухфазного КЛД.

2 Разработка системы очистки с рециркуляцией двухфазного КЛД в Ag объемом 10 л

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).

3 Создание программы реконструкции черенковских колец. Изучение влияния алгоритма реконструкции кольца на точность измерения черенковского угла

Программа реконструкции черенковских колец была разработана и проверена при обработке результатов экспериментов с прототипом ФАРИЧ на выведенном пучке электронов на комплексе ВЭПП-4М. Программа использует метод максимального правдоподобия, который обеспечивает наилучшую точность измерения угла черенковского излучения в детекторе.

4 Разработка и изготовление опытного образца 32 канального ВЦП на основе микросхем ПЛИС с временным разрешением 0,5 нс

В 2015 году были произведены 5 опытных плат 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.

5 Измерения новых образцов аэрогелей на пучке электронов высокой энергии

В 2015 году были проведены поисковые исследования возможности полировки аэрогелей. Наилучший результат получен при полировке аэрогеля натуральным шелком. Данная работа была представлена на международной конференции по методике регистрации частиц (Frontier Detectors for Frontier Physics, Итализи, о. Эльба, Май 2015) и опубликована [A.Yu. Barnyakov, et al., Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.096>.]

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.

6 Разработка детектора с прямым счетом квантов и разделением их по энергии и исследование его характеристик

В 2015 году 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 составляет 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 рисунке 2. Энергетическое разрешение детектора определяется в основном собственным разрешением используемого сцинтиллятора, которое составляет 25-40% для диапазона энергий 20 - 100 кэВ.

7 Разработка методики классификации материалов на основе данных с детектора

Начата работы по определению оптимальных режимов исследования объекта и тестирование методики определения элементного состава образца на основе данных по ослаблению 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.

Заключение

В ИЯФ СО РАН активно ведется разработка двух фазных криогенных детекторов. Данные работы являются пионерскими и физики ИЯФ СО РАН занимают лидирующие позиции в мире в этой методике.

Метод идентификации частиц на основе фокусирующего аэрогеля был предложен сотрудниками ИЯФ СО РАН. Они являются одной из наиболее активно работающих в этом направлении групп в мире. Для данных детекторов в ИЯФ СО РАН разработан аэрогель с рекордными параметрами в мире.

Использование принципа сканирования и высокоэффективного детектора рентгеновского излучения позволяет достичь высокого

качества изображения при предельно низких дозах. Разработанные в ИЯФ СО РАН рентгеновские установки имеют рекордные в мире параметры по соотношению разрешения и дозы облучения.

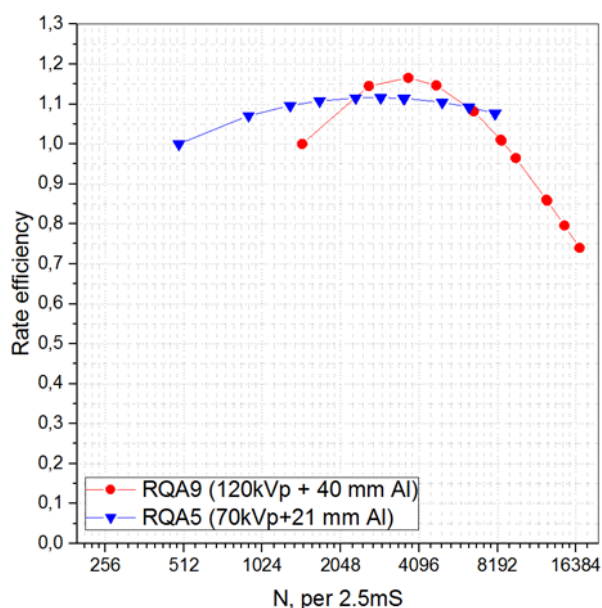


Рисунок 2. Непропорциональность счета детектора в зависимости от величины входного потока на канал (время накопления данных одной строки 2.5 мс) при различных спектрах излучения.

№ 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 $\phi(1020)$ 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 $(g-2)_\mu$. Измерение $(g-2)_\mu$ с высокой точностью является одним из наиболее чувствительных тестов Стандартной Модели. В настоящее время две международных коллаборации, одна в лаборатории им. Э.Ферми (FNAL), США, а другая в лаборатории JPARC, Япония, готовят новые эксперименты, в которых величина $(g-2)_\mu$ будет измерена с точностью 0.15 ppm. Для интерпретации результатов этих измерений и проверки Стандартной Модели на соответствующем уровне точности совершенно необходимо улучшить в два-три раза точность измерений адронных сечений в диапазоне энергий ВЭПП-2000.

В 2010-2013 годах на комплексе ВЭПП-2000 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 2015 году начались работы на модернизированном

комплексе ВЭПП-2000. Результаты, полученные в 2015 году, связаны как с анализом данных ВЭПП-2000, полученных до начала модернизации комплекса, так и с началом работ на модернизированном комплексе. Кроме того, физики ИЯФ СО РАН проводят изучение процессов электрон-позитронной аннигиляции в адроны в рамках международной коллаборации.

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

В 2015 году проведен большой объем пуско-наладочных работ, связанных с началом работ на модернизированном комплексе ВЭПП-2000.

1. Произведен физический запуск инжекционного комплекса ВЭПП-5, являющегося источником пучков электронов и позитронов на модернизированном комплексе ВЭПП-2000. Запуск инжекционного комплекса позволит на порядок повысить светимость комплекса ВЭПП-2000 в области высоких энергий.
2. Запущен канал транспортировки пучков длиной более 200 метров от инжекционного комплекса до бустерного кольца комплекса ВЭПП-2000.
3. Произведена, установлена и запущена новая магнитная система бустерного кольца комплекса ВЭПП-2000.
4. Закончена сборка детектора КМД-3 после ремонта, проведены пусконаладочные работы.
5. Закончена сборка детектора СНД после ремонта, проведены пусконаладочные работы.
6. Начата калибровка обоих детекторов по космическим событиям.

2 Определение энергетической зависимости сечений многоадронных процессов, в частности, $K+K-\rho_i+\rho_i^-$, $b\rho_i$, в области энергий выше 1 ГэВ.

В 2015 году закончен анализ данных по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$. В анализе использовалась статистика на основе интегральной светимости 23 пбн^{-1} в области энергий от 1.5 до 2 ГэВ. В результате измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ (Рисунок 2) со статистической точностью $\sim 4\%$ и система-

тической погрешностью $\sim 6\%$. В рамках работы создан генератор процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ с учетом основных промежуточных состояний. Важно отметить, что основные вклады в динамику дали двухчастичные промежуточные состояния $K_1(1270,1400)K$. Публикация с результатами работы направлена в журнал *Physics Letters B*.

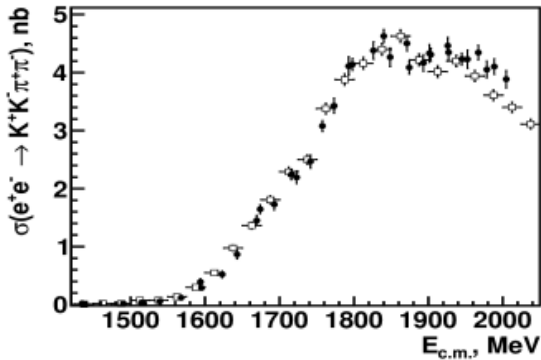


Рисунок 2. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$, измеренное с детектором КМД-3 (черные точки). Для сравнения показаны результаты измерения этого сечения с детектором ВаВаг (открытые квадраты).

В 2015 году с детектором КМД-3 продолжилось изучение процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ в области энергий 1.425 - 2.0 ГэВ в системе центра масс. В анализе использовались три класса событий: события со всеми зарегистрированными частицами, события, в которых не был зарегистрирован трек одного заряженного пиона (трек не был реконструирован или не попал в детектор) и события, в которых не был зарегистрирован один из нейтральных пионов. Сечение изучаемого процесса определялось по сумме числа событий всех трех классов. Такой подход позволяет увеличить объем экспериментальных данных и тем самым уменьшить статистическую ошибку измерения сечения. Было проведено предварительное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ в 38 энергетических точках в указанном диапазоне энергий (Рисунок 3). Сечение, измеренное в эксперименте КМД-3 неплохо согласуется с результатом, полученном на детекторе ВаВаг, превосходя его в статистической точности.

В 2015 году с детектором КМД-3 продолжилось изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$. В анализе использовалась статистика на основе интегральной светимости 22 пбн^{-1} , набранная в 2011-2012 гг. Сечение было измерено в 30 энергетических точках в диапазоне энергий 1.59 - 2.0 ГэВ в системе центра масс. Было показано, что на существующем объеме статисти-

стики видит сигнал только от одного промежуточного состояния $\phi(1020)\eta$. Был изучен возможный фон от процессов $e^+e^- \rightarrow \phi(1020)f_0(500)$, $e^+e^- \rightarrow K^{*+}(892)K^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ (Рисунок 4) аппроксимировано в рамках модели векторной доминантности суммой вклада $\phi(1680)$ и нерезонансного вклада и получены параметры $\phi(1680)$ мезона.

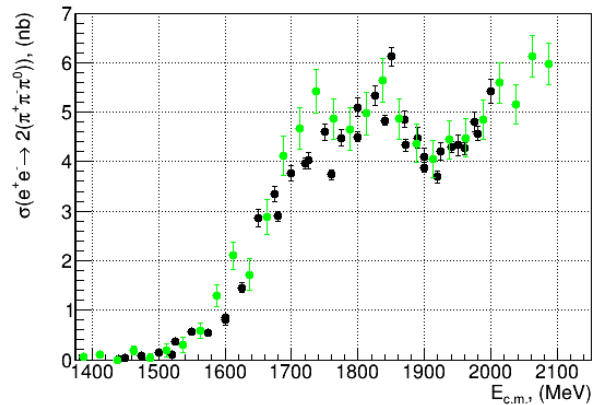


Рисунок 3. Предварительный результат измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$, полученный с детектором КМД-3 (черные точки) в сравнении с результатом эксперимента ВаВаг (зеленые точки).

Предварительные результаты измерений докладывались в 2015 году на Международном Совещании по Радиационным Поправкам и Монте-Карло Генераторам (RadioMonteCarlow, Фраскати, Италия), Международной Конференции по Структуре и Взаимодействию Фотона, включая Фотон-Фотонные Столкновения (PHOTON2015, Новосибирск, Россия), Международной Конференции Европейского Физического Общества по Физике Высоких Энергий (EPS HEP2015, Вена, Австрия), Международной Ломоносовской Конференции по Физике Элементарных Частиц (Москва, Россия), Международной Конференции по Спектроскопии Адронов (HADRON2015, Нью-Порт, Вирджиния, США) Международном Совещании по e^+e^- столкновениям «от ϕ до ψ » (PHPSI2015, Хэфей, Китай) и ряде других конференций по физике высоких энергий.

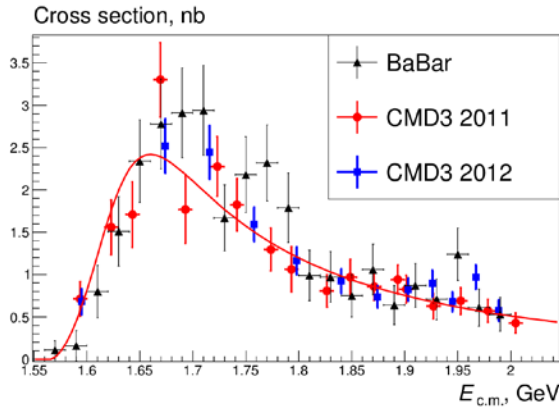


Рисунок 4. Предварительный результат измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$, полученный с детектором КМД-3 (красные точки – данные, набранные в 2011 году, синие точки – данные, набранные в 2012 году) в сравнении с результатом эксперимента BaBar (черные точки).

3 Прецизионное измерение энергетической зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^-$ в области энергий до 660 МэВ в системе центра масс.

В 2015 году продолжился анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ по данным, набранным с детектором КМД-3 в 2013 году. Измерение сечения этого процесса с точностью лучше 1% в области энергий, доступной на ВЭПП-2000, очень важно для интерпретации результатов экспериментов по измерению аномального магнитного момента мюона. Одной из основных сложностей данного анализа является разделение трех основных конечных состояний: пар e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$. Для уменьшения систематической ошибки в анализе используются две независимые методики идентификации конечных состояний: в одной параметрами разделения являются измеренные импульсы частиц, в другой - энергосодержание частиц в калориметре. В области энергий до 660 МэВ в системе центра масс наилучшую точность удастся получить с помощью первой методики.

В 2015 году удалось достигнуть целого ряда улучшений методики анализа данных и уменьшить систематическую ошибку измерения.

1. Была улучшена калибровка дрейфовой камеры и улучшена точность измерения импульсов.
2. Была уточнена теоретическая модель исследуемого процесса и показано, что распределения, наблюдаемые в эксперименте, согласуются с теоретическими ожиданиями. Та-

кое согласие абсолютно необходимо для достижения высокой точности измерения.

3. Был оценен с помощью моделирования и независимо измерен фон от распадов ω -мезона.
4. Улучшена калибровка Z-камеры детектора КМД-3 и улучшена точность определения телесного угла регистрации.

Предварительный результат измерения (Рисунок 5) доложен на Международном Совещании по e^+e^- столкновениям «от ϕ до ψ » (PHIPS2015, Хэфей, Китай) и на ряде международных конференций.

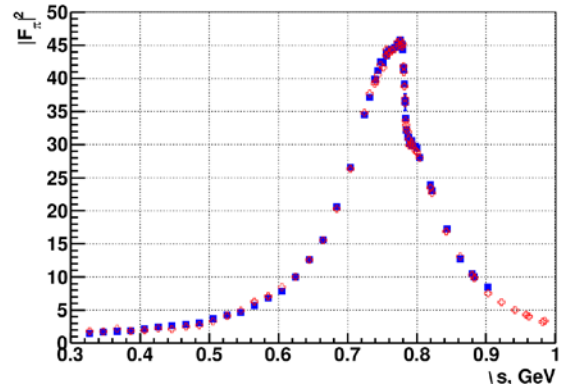


Рисунок 5. Предварительный результат измерения формфактора пиона с детектором КМД-3.

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

В 2015 году группой физиков из ИЯФ СО РАН, участников коллаборации BaBar, выполнялся анализ процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \eta$ в диапазоне энергий от порога рождения до 4 ГэВ в системе центра. Сечение измерялось методом радиационного возврата на основе интеграла светимости 454 фбн^{-1} , набранному с детектором BaBar на В-фабрике PEP-II (SLAC, Стэнфорд, США). Это измерение выполнено впервые в мире. 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. Всего было зарегистрировано около 6000 событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ и около 500 событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \eta$. Систематическая ошибка измерения сечения $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \pi^0$ (Рисунок 6) составляет около 6% вблизи порога рождения и линейно возрастает до 12% на энергии 4.0 ГэВ.

Систематическая ошибка измерения сечения $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi$ (Рисунок 7) вблизи порога составляет около 12% и линейно возрастает до 19% на энергии 4.0 ГэВ.

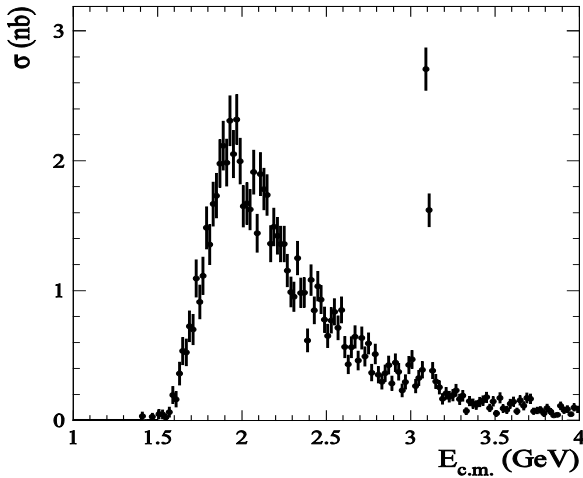


Рисунок 6. Предварительные результаты измерения энергетической зависимости сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$

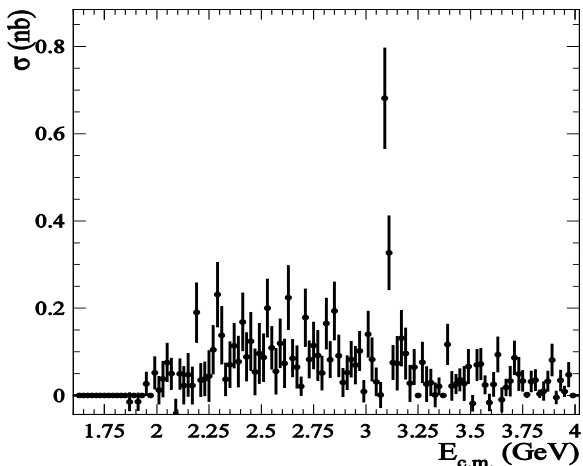


Рисунок 7. Предварительные результаты измерения энергетической зависимости сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi$

Результаты настоящей работы докладывались в 2015 году на международных конференциях FPCP2015, QCD2015 и HADRON2015. Публикация с результатами анализа в настоящее время проходит финальное утверждение в рамках коллаборации BaBar.

5 Изучение характеристик канала измерения времени калориметра детектора СНД в реальном детекторе.

Электромагнитный калориметр детектора СНД измеряет энергии и углы вылета элементарных частиц, рождающихся в электрон-позитронной аннигиляции на коллайдере ВЭПП-2000. В настоящее время проводится

модернизация калориметра с целью расширения его возможностей. В частности, планируется измерять время прохождения частицы через калориметр с точностью 1 нсек. Это позволит улучшить идентификацию частиц по времени пролета, например, для процесса рождения нуклон-антинуклонных пар.

Завершена разработка и произведен опытный 24-канальный образец нового блока цифрового измерителя амплитуд (АЦП). Характеристики модуля проверялись по генератору, имитирующему форму сигнала с кристалла NaI(Tl) и были получены расчетные значения амплитудного и временного разрешения. Для подтверждения этих результатов были проведены измерения в режиме реального эксперимента на ВЭПП-2000. Для этого один из рабочих модулей электроники калориметра был заменен на новый разработанный модуль. Отбирались события электрон-позитронного рассеяния с попаданием одной из конечных частиц в кристаллы NaI(Tl), сигналы с которых оцифровывались новыми флэш-АЦП. При анализе записанных данных отбирались события с четырьмя кристаллами первого и второго слоев калориметра, для них подсчитывалось полное энерговыделение и определялось время срабатывания. Полученное временное разрешение слегка хуже расчетного (Рисунок 8), что объясняется тем, что в эксперименте суммировались данные с нескольких кристаллов, что приводило к уширению линии. В условиях реального эксперимента достигнуто требуемое разрешение около 1 нсек.

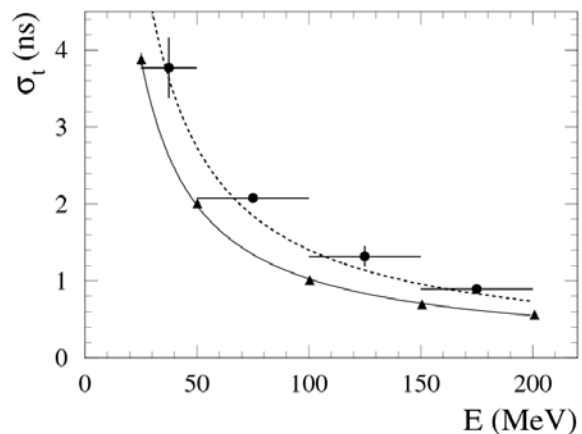


Рисунок 8. Временное разрешение в калориметре NaI(Tl) как функция энергии. Пунктирная линия и точки с ошибками получены на экспериментальных событиях.

Сплошная линия и треугольники соответствуют генераторным данным.

6 Измерение параметров канала считывания информации с полосок жидкоксеронового калориметра детектора КМД-3 в условиях реального эксперимента.

В 2015 году была проведена установка и запуск новой оцифровывающей электроники для полоскового тракта жидкоксеронового калориметра. Новая электроника построена на современной элементной базе, имеет высокую надежность и позволяет работать при высоких нагрузках триггера, что необходимо для успешного продолжения экспериментов на модернизированном накопителе ВЭПП-2000. Электроника построена на базе платоцифровщиков AWF32. Основные характеристики платы AWF32 приведены ниже:

- Кол-во спектрометрических каналов - 32
- Полная шкала амплитуды вх. сигнала 2В
- Скорость сэмпирования в каждом канале $3 \cdot 10^6$ выборки/с
- Дискретизация амплитуде, каждый канал 4096 (12бит)
- Габаритный размер - 140x120x10мм
- Напряжение питания - 7..14 В
- Потребляемая мощность - 1.6 Вт (на всю плату)

Платы собирались в сборки по 3 штуки и монтировались непосредственно на корпусе детектора рядом с блоками зарядочувствительных усилителей (Рисунок 10). Общее количество плат составляет 72 шт. После монтажа проверялся уровень шумов и линейность всего тракта в каждом канале электроники. Величина полученных шумов в пересчете на измеренную энергию соответствует ожидаемым (около 0.15 МэВ) и определяется шумами ЗЧУ. Примеры графиков электронной калибровки для трех полосковых каналов представлены на рисунке Рисунок 9.

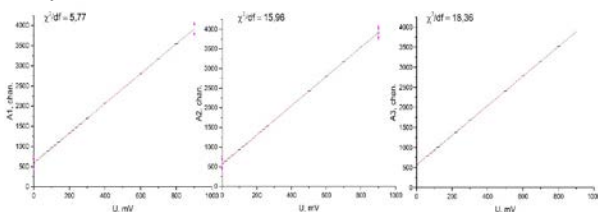


Рисунок 9. Пример калибровки электронного канала считывания информации с полосок жидкоксеронового калориметра детектора КМД-3.

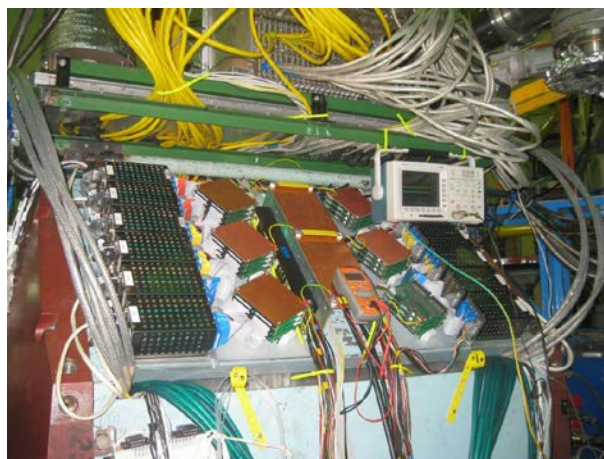


Рисунок 10. Электроника для считывания данных с полосок жидкоксеронового калориметра детектора КМД-3 в рабочем расположении.

7 Развитие 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 архивируется и обрабатывается на offline-сервере коллаборации, что отнимает в среднем до 60 минут. В результате полное время от момента начала записи захода до получения информации о качестве данных в среднем отнимает от 65 до 80 минут. В случае высокой светимости комплекса, за время обнаружения ошибки в данных будут собрано до 12 полноценных файлов заходов

Снизить временную задержку получения информации о качестве набираемых данных предлагается путем устранения необязательных стадий в жизненном цикле данных, а также организации распределенной обработки данных, получаемых непосредственно из системы сбора данных с online сервера. В данном подходе для получения необходимой информации о качестве данных, не потребуется ожидать, даже

окончания записи захода, так как, предупреждение может быть отправлено оператору сразу после набора статистики «ошибочных» событий необходимого размера. При высокой светимости необходимая статистика будет набираться в течении десятков секунд, что уменьшит задержку на 1-2 порядка от текущих значений.

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 11, Рисунок 12). 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.

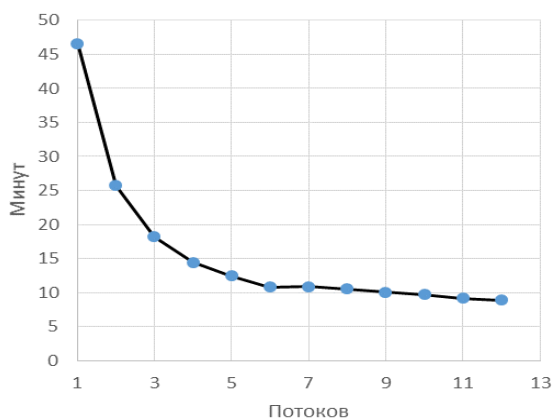


Рисунок 11. Задержка между набором данных и получения информации о качестве данных в зависимости от числа потоков.

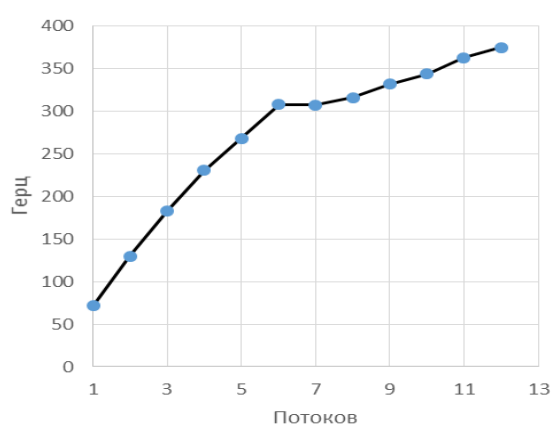


Рисунок 12. Скорость обработки данных в зависимости от числа потоков.

Заключение

В 2015 году получены следующие основные результаты.

1. 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.
2. Продолжился анализ данных, набранных ранее с детектором ВаВаг. Проведено измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi \eta$ по данным эксперимента BABAR.
3. 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 жидкоксенонного калориметра детектора КМД-3 и проведена ее калибровка в условиях реального эксперимента. Разработано программное обеспечение, позволяющего производить параллельную обработку информации с детектора КМД-3.

Список использованных источников

- [1] Aulchenko V.M. et al., Architecture of the system of registration and triggering of the CMD-3 detector // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. Volume 51, Issue 1, Pages 24-30.
- [2] Kozyrev E.A. et al., Investigation of the process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ with the aid of the CMD-3 detector at the VEPP-2000 electron-positron collider // Physics of Atomic Nuclei, Volume 78, Issue 3, Pages 358-362
- [3] Lukin, P.A. et al., Investigation of the processes $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ and $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ with the aid of the CMD-3 detector // Physics of Atomic Nuclei, Volume 78, Issue 3, Pages 353-357
- [4] Fedotovitch, G.V. et al., Preliminary results of measurements of hadronic cross sections with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 electron-positron collider // Physics of Atomic Nuclei, Volume 78, Issue 5, Pages 591-602

- [5] Akhmetshin, R.R. et al., Search for the process $e^+e^- \rightarrow \Lambda'(958)$ with the CMD-3 detector // *Physics Letters B*, Volume 740, Pages 273-277
- [6] Aulchenko, V.M. et al., Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ cross section in the center-of-mass energy range 1.22-2.00 GeV with the SND detector at the VEPP-2000 collider // *Physical Review D*, Volume 91, Issue 5, Article number 052013
- [7] Aulchenko, V.M. et al., New results of measurement of cross sections for electron-positron annihilation to hadrons with the SND detector at VEPP-2000 // *Physics of Atomic Nuclei*, Volume 78, Issue 4, Pages 497-508
- [8] Berkaev, D.E. et al. Controlling the energy of colliding electron-positron beams on the VEPP-2000 accelerator complex // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, Volume 51, Issue 1, Pages 7
- [9] M.N. Achasov et al., Hadronic cross sections measurement with the SND detector at VEPP-2000 e^+e^- collider // *Phys.Scripta T166 (2015) 014018*
- [10] I.B. Logashenko et al., Measurement of the hadronic cross sections at Novosibirsk // *EPJ Web Conf.* 96 (2015) 01022
- [11] V.M. Aulchenko et al., Study of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ process in the energy range 1.05–2.00 GeV // *J. Exp. Theor. Phys.* 121, no. 1, 27 (2015).
- [12] M.N. Achasov et al., Search for the $\eta' \rightarrow e^+e^-$ decay with the SND detector // *Phys. Rev. D* 91, 092010 (2015).
- [13] M.N. Achasov et al., On the search for the $\eta \rightarrow e^+e^-$ decay at the VEPP-2000 e^+e^- collider // *JETP Lett.* 102, no. 5, 266 (2015).
- [14] В.Л. Иванов, Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \varphi\eta$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 // *Материалы 53-й Международной Научной Студенческой Конференции МНСК-2015, Новосибирск, 2015, с.69.*

№ 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 полупеноменологические 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), Belle (Япония), BES-III (Китай), главным образом, с использованием методики радиационного возврата.

На накопителе ВЭПП-3 проводятся эксперименты с поляризованной дейтериевой мишенью. Дальнейший прогресс этих экспериментов связан с вводом в строй системы ме-

чения квазиреальных фотонов, которая позволит провести серию измерений поляризационных наблюдаемых и дифференциальных сечений в различных реакциях с поглощением фотона с энергией до 1.5 ГэВ. В рамках данного проекта предлагается провести демонстрацию возможности создания плотной газовой мишени, состоящей из поляризованных молекул водорода.

1 Измерение электромагнитных формфакторов каонов и нуклонов по данным, накопленным на коллайдере ВЭПП-2000 с детекторами СНД и КМД-3.

Электромагнитные формфакторы каонов измеряются в реакциях $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$. Предварительный результат по сечению первой реакции при энергии в системе центра масс от 1.05 до 2.00 ГэВ был получен на детекторе СНД по экспериментальным данным, накопленным на коллайдере ВЭПП-2000 в 2010-2012 годах [1]. Измеренное сечение показано на рис. 1. Видно, что наши данные неплохо согласуются с результатами предыдущего измерения и не уступают им по точности. В изучаемой области энергий в процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ дает вклад аннигиляция через возбужденные резонансные состояния семейств ρ и ω . Интерференция между амплитудами этих состояний порождает сложную энергетическую зависимость измеренного сечения.

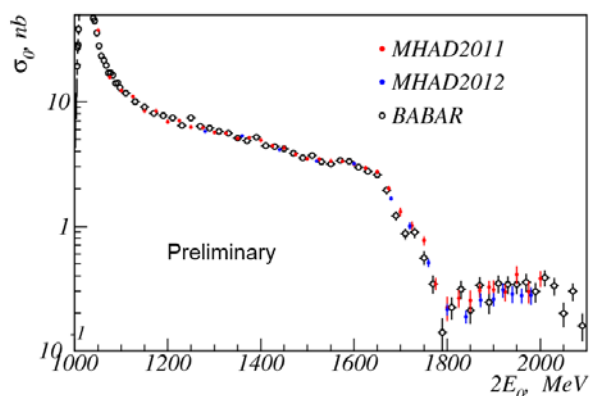


Рисунок 1. Сечение процесса, измеренное детектором СНД по данным 2011 (MHAD2011) и 2012 (MHAD2012) годов в сравнении с измерением, сделанным в эксперименте BABAR.

Электромагнитные формфакторы протона измеряются в процессе $e^+e^- \rightarrow p \text{ anti-}p$. На детекторе КМД-3 по этому процессу завершен анализ данных, накопленных на коллайдере ВЭПП-2000 в 2010-2012 годах [2]. Измерены эффективный формфактор протона в диапазоне от порога реакции до 2.00 ГэВ и отношение

электрического и магнитного формфакторов. Результаты измерений показаны на рис. 2 и 3. Предварительные результаты по измерению формфакторов протона на детекторе СНД [1] 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, что отношение формфакторов вблизи порога значительно превышает единицу.

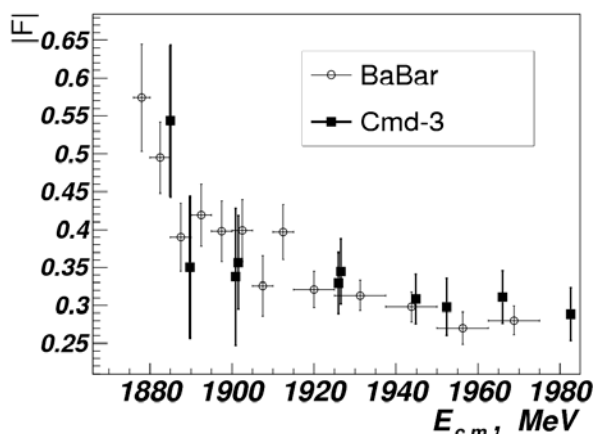


Рисунок 2. Эффективный формфактор протона, измеренный КМД-3, в сравнении с результатом эксперимента BABAR.

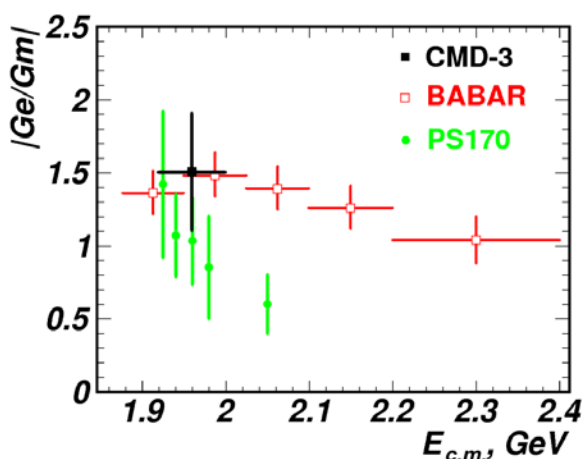


Рисунок 3. Отношение электрического и магнитного формфакторов протона в сравнении с результатами предыдущих экспериментов.

2 Разработка новой электроники калориметра детектора СНД, позволяющей существенно улучшить точность измерения нейтронных формфакторов

В 2015 году продолжалась разработка электроники, позволяющей измерять время срабатывания в каждом кристалле калоримет-

ра. Проводились испытания с прототипом флэш-АЦП, который проводит измерение формы сигнала с кристалла калориметра с периодом 25 нс [3]. Далее форма сигнала аппроксимируется и определяются время прихода и амплитуда сигнала. Были испытаны различные варианты аппроксимации. Был выбран вариант, когда средняя форма сигнала описывается кубическим сплайном. Полученная нормированная на единицу в максимуме средняя форма $G(t)$ затем используется для аппроксимации индивидуального сигнала $f(t)=AG(t+\Delta t)+P$, где A — амплитуда сигнала, Δt — сдвиг времени прихода относительно усредненного сигнала и P — пьедестал. С прототипом было получено амплитудное разрешение около 250 кэВ и временное разрешение лучше 1 нс при амплитуде сигнала 100 МэВ. Эти параметры удовлетворяют физическим требованиям. Зависимость временного разрешения от амплитуды сигнала, измеренная с помощью калибровочного генератора приведена на рис.4. В настоящее время изготавливается окончательный прототип модуля флэш-АЦП, в котором аппроксимация формы сигнала будет реализована в самом модуле, на ПЛИС.

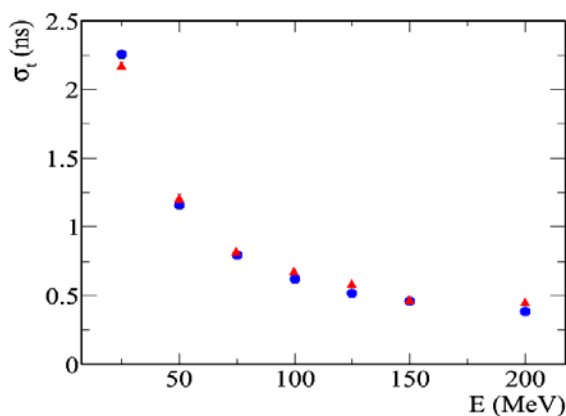


Рисунок 4. Зависимость временного разрешения в новом канале калориметра СНД от амплитуды сигнала. Кружки и треугольники показывают результаты для двух реализаций аппроксимации формы, с использованием вещественной и целой арифметики.

3 Повышение быстродействия системы сбора данных детектора СНД для новых экспериментов по измерению нуклонных формфакторов

Эксперименты с детектором СНД на модернизированном комплексе ВЭПП-2000 предполагается начать в 2016 году. В результате модернизации ожидается увеличение светимости при энергии 2 ГэВ

почти на порядок. Ожидается также возрастание фоновой загрузки. В течение 2015 года 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 TCP/IP непосредственно с каждой платы. Программное обеспечение системы сбора данных было модернизировано, чтобы реализовать чтение с новых плат. В результате нагрузочная способность системы сбора данных детектора СНД возросла в 3 раза, приблизительно до 3 кГц.

4 Измерение электромагнитных формфакторов адронов на основе экспериментальных данных с В-фабрик и детектора BES-III

В эксперименте BABAR с наилучшей в мире точностью был измерен электромагнитный формфактор заряженного каона в диапазоне энергий от 2.6 до 8.0 ГэВ [4]. Измерения проводились с использованием методики радиационного возврата. Выше 5 ГэВ формфактор измерялся впервые. Результат измерения в сравнении с предсказаниями пертурбативной КХД приведен на рис.5. Видно, что с ростом энергии экспериментальный формфактор приближается к предсказаниям.

Данные по каонному формфактору вблизи резонансов семейства ψ вместе с данными других экспериментов были использованы для изучения интерференционных эффектов в распадах $\psi \rightarrow K \text{ anti-K}$ [4,5]. В частности, в работе [5] было впервые получено указание на существование распада $\psi(3770) \rightarrow K^+ K^-$, который проявляется как интерференционная волна в сечении процесса $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$.

В эксперименте BABAR была исследована зарядовая асимметрия в процессах $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ [6]. 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. В работе показано, что соответствующая относительная систематическая ошибка около 0.5×10^{-3} .

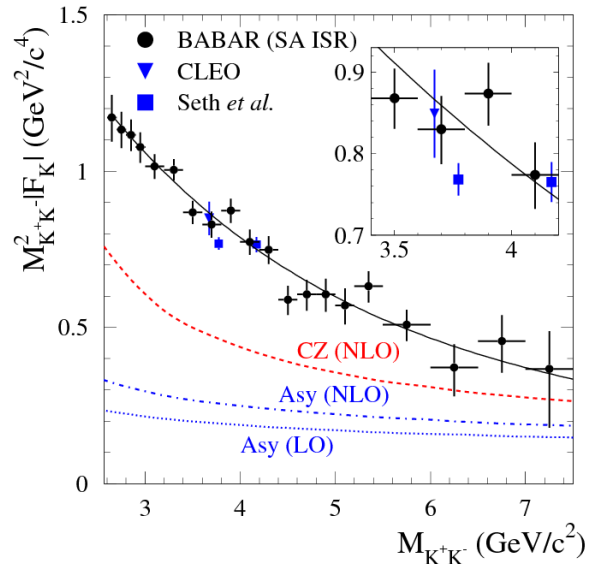


Рисунок 5. Нормализованный формфактор заряженного каона, измеренный в эксперименте BABAR, в сравнении с данными других экспериментов и теоретическими предсказаниями, основанными на пертурбативной КХД.

5 Проведение тестового эксперимента с системой мечения квазиреальных фотонов по изучению фоторождения пионов на протоне на накопителе ВЭПП-3

В 2015 был проведен тестовый эксперимент на установке Дейтрон на накопителе ВЭПП-3. Целью эксперимента была отладка режимов работы накопителя с установленной системой мечения квазиреальных фотонов (СМФ), проверка и отладка аппаратуры и программного обеспечения систем регистрации СМФ и детектора продуктов реакции. Эта работа ведется в рамках подготовки к экспериментам по изучению фотоядерных реакций на тензорно-поляризованных дейтронах для энергии фотона в диапазоне 400-1500 МэВ.

При подготовке к тестовому эксперименту были выполнены следующие работы:

- для защиты от синхротронного излучения из магнитов СМФ в вакуумную камеру ВЭПП-3 были вмонтированы дополнительные приемники излучения, охлаждаемые водой, и установлены термодатчики для контроля за температурой элементов накопителя;
- разработан новый вариант программ сбора данных с СМФ и детекторов продуктов реакции, в частности, введена расширенная буферизация данных и модифицированы критические участки программ с целью ускорения их работы;

- настроена синхронизация оцифровщиков СМФ с фазой ВЧ генератора ВЭПП-3.

Для тестового эксперимента был выбран процесс фоторождения пиона на протоне в области Δ -изобары, где сечение реакции велико. Для трековых детекторов СМФ использовались прототипы газовых электронных умножителей (ГЭУ), а для регистрации протонов и пионов были применены готовые элементы (кристаллы CsI(Tl), дрейфовые камеры, сцинтилляторы), использовавшиеся в ряде предыдущих экспериментов на «Дейтрон»-е.

Вся аппаратура была смонтирована в июле-августе, а в сентябре были проведены следующие работы на пучке электронов в ВЭПП-3:

- отлажены режимы накопления, ускорения пучка в ВЭПП-3 с установленной СМФ, и найдены оптимальные орбиты пучка для энергий 500, 600, 800 и 1250 МэВ;
- изучена структура фона на детекторах СМФ, найдены варианты его уменьшения;
- отлажена совместная работа двух разнородных подсистем регистрации: оцифровщиков ГЭУ (опрос на базе FPGA и Ethernet) и КАМАК модулей детектора продуктов реакции (опрос на базе транспьютерных крейт-контроллеров и линков). Особое внимание было уделено синхронизации работы двух подсистем при работе с буферизацией данных, реализованы специальные меры по контролю за тем, что не происходит перепутывание информации с подсистем при объединении данных;
- набраны данные процесса тормозного излучения при энергии пучка 600, 800 и 1250 МэВ;
- набраны данные процесса фоторождения нейтрального пиона на протоне при энергии пучка электронов 600 МэВ, т.е. для диапазона энергии фотона 380-480 МэВ.

Анализ накопленных данных позволил выполнить следующее:

- проверена надежность синхронизации данных с двух подсистем регистрации;
- продемонстрирована корреляция между двумя методами реконструкции энергии: из энергии электрона, зарегистрированного трековой системой СМФ, и из импульса протона, зарегистрированного детектором продуктов реакции (рис.1);
- показано, что применение СМФ позволяет на порядок увеличить точность реконструкции энергии фотона, вызвавшего изучаемую реакцию.

Таким образом, данный тестовый эксперимент продемонстрировал готовность СМФ и системы регистрации к проведению запланированных экспериментов с тензорно-поляризованным дейтроном, первый из которых предполагается выполнить в 2017 году, когда будут изготовлены новые детекторы продуктов реакции (протонов и нейтронов).

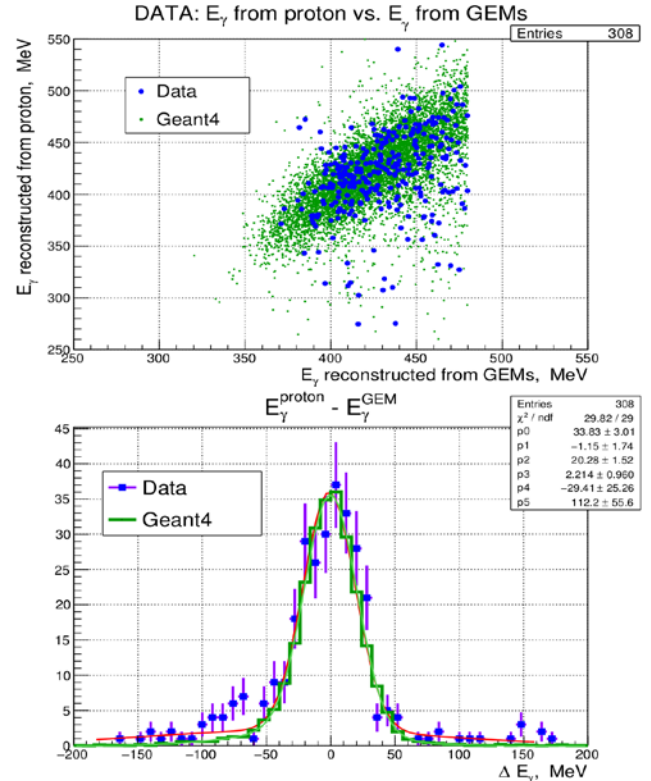


Рисунок 6. Экспериментальные данные и моделирование процесса $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$. Вверху — корреляция между энергией фотона, реконструированной из параметров протона и из энергии электрона, измеренной СМФ. Внизу — гистограмма разности значений энергии фотона реконструированной двумя способами. Ширина определяется разрешением детектора по энергии протона ~ 20 МэВ. Оценка разрешения СМФ дает величину около 2 МэВ, что соответствует ожиданиям.

5 Проектирование и изготовление прототипа системы формирования молекулярного пучка водорода

Одним из важнейших вопросов получения плотной поляризованной молекулярной мишени является создание источника молекул с высокой направленностью вперед, под нулевым углом к оси пучка. Для получения высоконаправленных пучков обычно используют блоки капилляров, набор трубочек малого диаметра. Предельное увеличение интенсивности вперед по сравнению с интенсив-

ностью из отверстия при данном расходе газа может составлять величину $3L/8g$, где L – длина капилляра, а g – его радиус.

Для определения реального выигрыша в интенсивности было проведено сравнение трех источников молекул: отверстия диаметром 1 мм, трубки длиной 50 и диаметром 5 мм и блока капилляров диаметром 20 мм, на основе микроканальной пластины, состоящей из трубочек диаметром 40 микрон и длиной 500 микрон. Источник был помещен в камеру, откачиваемую турбомолекулярным насосом. Измерение интенсивности пучка проводилось с помощью квадрупольного масс-спектрометра. Чтобы измерить сигнал молекулярной струи перед масс-спектрометром была установлена вращающаяся крыльчатка, прерывающая струю, и применен метод синхронного детектирования. Результаты измерений приведены на рис. 7. Для используемых в работе капилляров предельное увеличение интенсивности должно составлять около 9. Измеренное увеличение при малых расходах газа составило около 4 и уменьшалось с увеличением расхода. По-видимому, это связано с уменьшением длины свободного пробега в газе перед капиллярами, когда в формировании струи начинает работать только часть капилляра. Применение капилляров меньших размеров позволило бы получить более направленный пучок молекул.

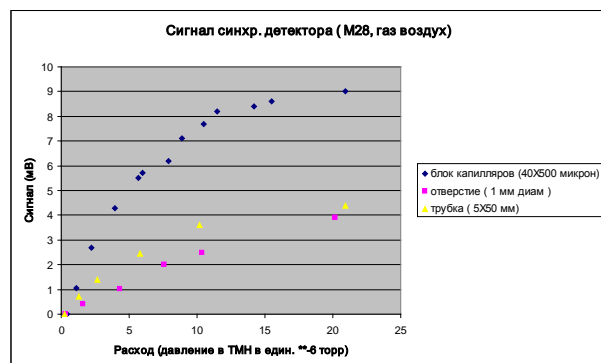


Рисунок 7. Сигнал молекулярной струи в зависимости от расхода газа для трех источников молекул.

Заключение

В 2015 году получены следующие основные результаты:

1. В экспериментах СНД и КМД-3 получены новые результаты по каонному и протонным электромагнитным формфакторам [1,2].
2. На прототипе новой электроники калориметра детектора СНД получено временное разрешение лучше 1 нс [3].

3. Система сбора данных детектора СНД модернизирована для новых экспериментов на коллайдере ВЭПП-2000 при повышенной светимости.

4. Новые данные по электромагнитному формфактору заряженного каона при высоких энергиях получены в эксперименте BABAR [4,5].

5. В эксперименте BABAR измерена зарядовая асимметрия в реакциях $e+e- \rightarrow \mu+\mu-\gamma$ and $e+e- \rightarrow \pi+\pi-\gamma$ [6].

6. 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.

7. Проведена первая серия экспериментов по созданию источника молекул с высокой направленностью.

8. На накопителе ВЭПП-3 проведено высокоточное измерение вклада двухфотонного обмена в процесс рассеяния электронов на протоне [7].

Список использованных источников

- [1] Achasov M. N., Barnyakov A. Yu., Beloborodov K. I. et al. Study of $e+e-$ annihilation into hadrons with the SND detector at the VEPP-2000 collider. PoS(EPS-HEP2015), article 512.
- [2] Akhmetshin R.R., Amirkhanov A.N., Anisenkov A.V. et al. 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. arXiv:1507.08013 [hep-ex].
- [3] Surin I. K., Achasov M. N., Bogdanchikov A. G. et al. New EMC electronic channel for the SND detector at VEPP-2000 $e+e-$ collider. JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, Vol. 587, Iss. 1, article 012026.
- [4] Lees J. P., Poireau V., Tisserand V. et al. Study of the $e+e- \rightarrow K+K-$ reaction in the energy range from 2.6 to 8.0 GeV. PHYSICAL REVIEW D, Vol. 92., article 072008.
- [5] Druzhinin V.P. Evidence for the decay $\psi(3770) \rightarrow K+K-$. PHYSICAL REVIEW D, Vol. 92., article 054024.
- [6] Lees J. P., Poireau V., Tisserand V. et al. Measurement of initial-state-final-state radiation interference in the processes $e+e- \rightarrow \mu+\mu-\gamma$ and $e+e- \rightarrow \pi+\pi-\gamma$. PHYSICAL REVIEW D, Vol. 92., article 072015.
- [7] Rachek I. A., Arrington J., Dmitriev V.F. et al. Measurement of the Two-Photon Exchange Contribution to the Elastic e^+p Scattering Cross Sections at the VEPP-3 Storage Ring. PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 114, article 062005.

№ 15.3.1 Развитие концепции финальной фокусировки пучков Супер Чарм-Тау фабрики и других высокопроизводительных коллайдеров

Введение

В Институте продолжается развитие проекта «мега-сайт» установки – электрон-позитронного коллайдера «Супер Чарм-Тау фабрика». Особенность реализации метода встречи Crab Waist с большим параметром Пивинского накладывает жесткие требования на конструкцию места встречи. Линзы финального фокуса должны быть двухапертурными (для входящего и выходящего пучков), компактными (поскольку их поперечные размеры определяют телесный угол детектора) и обладать большим градиентом (не менее 100 Т/м) для сильной фокусировки пучков в точке пересечения. Подобные линзы могут быть только сверхпроводящими, и в ИЯФ разработан вариант возможной конструкции такой линзы и изготовлен прототип с целью испытания и измерения свойств магнитного поля.

Из-за сложной конфигурации магнитного поля элементов финального фокуса, который, для высокопроизводительных коллайдеров будущего, находится внутри детектора, серьезным является вопрос интерференции полей основного соленоида детектора, соленоидов, компенсирующих связь бетатронных колебаний, линз финального фокуса, других магнитов (корректирующих), которые формируют сталкивающиеся пучки. Переходные области магнитных полей содержат высокие гармоники магнитного поля, влияющие на динамику пучка. Проблема усугубляется тем, что пучки пересекают такие области под достаточно большим углом (30-50 мрад), а величина бетатронных функций, подчеркивающая возмущение, может достигать здесь значений в несколько километров.

Поэтому отдельным вопросом является разработка и исследование модели магнитного поля области финального фокуса и моделирование движения частиц в этой области включая «крабовые» секступоли, разворачивающие перетяжку пучков в точке встречи. Недавно в мире появились еще два проекта e⁺e⁻ коллайдеров, которые используют принципы, примененные в «Супер Чарм-Тау фабрика», в т.ч., конструкцию линз финального фокуса, встречу пучков с достаточно большим углом пересече-

ния, «крабовые» секступольные линзы и т.д. Это проекты «Хиггс-фабрик» в ЦЕРН (FCC-ee, периметр 100 км, максимальная энергия 175 ГэВ) и в Китае (CEPC, периметр 60 км, энергия 120 ГэВ). Оба проекта существенно заинтересованы в результатах наших исследований, а ИЯФ принимает активное участие в обоих проектах.

Моделирование нелинейного движения частиц, исследование и оптимизация динамической апертуры важны и для источников синхротронного излучения. В частности, методы оптимизации динамической апертуры использовались для разработки ИЯФ синхротрона-бустера источника СИ NSLS II.

1 Изготовление ярма двухапертурной линзы

Изготовлено ярмо прототипа компактной двухапертурной сверхпроводящей линзы с большим градиентом (100 Т/м). Квадруполь представляет собой модифицированную линзу Панофского с вписанным диаметром апертуры 2 см и максимальным градиентом 100 Т/м при токе питания обмотки 1150 А.

Ярмо длиной 40 см, показанное на рис.1, выполнено из магнито-мягкой стали типа «Армко».



Рисунок 1 Ярмо двухапертурной линзы (вид сверху).

Ярмо состоит из четырех идентичных квадрантов, изготовленных с высокой точностью электроэрозионным способом. Допуск на точность изготовления и позиционирования гиперболического профиля полюса линзы составляет 20 мкм. Столь жесткие требования объясняются большим значением (несколько километров) вертикальной бетатронной функции на азимуте размещения линзы, которая будет подчеркивать ошибки магнитного поля, связанные с неточностью изготовления и сборки магнита.

Четыре квадранта соединяются болтовым соединением с помощью прецизионных штифтов. В настоящее время ведется подготовка магнитного стенда для испытания прототипа линзы и измерения характеристик магнитного поля.

2 Намотка катушки линзы

Намотана катушка линзы седловидной формы. Именно такой форм-фактор обеспечивает максимальную компактность линзы, что является важным, поскольку размер поперечного сечения линзы (с криостатом) определяет минимальное расстояние от точки встречи пучка до края линзы, полный приемный угол детектора и, в конечном счете, эффективность работы коллайдера. Одна из четырех катушек (на один полюс) показана на рис.2.



Рисунок 2 Сверхпроводящая обмотка линзы финального фокуса.

Катушка мотается с помощью специального приспособления сверхпроводящим проводом NbTi в медной матрице диаметром 0.7 мм и состоит из 14 витков. Для обеспечения жесткости катушки и для предотвращения срыва сверхпроводимости катушка импрегнирована эпоксидным компаундом.

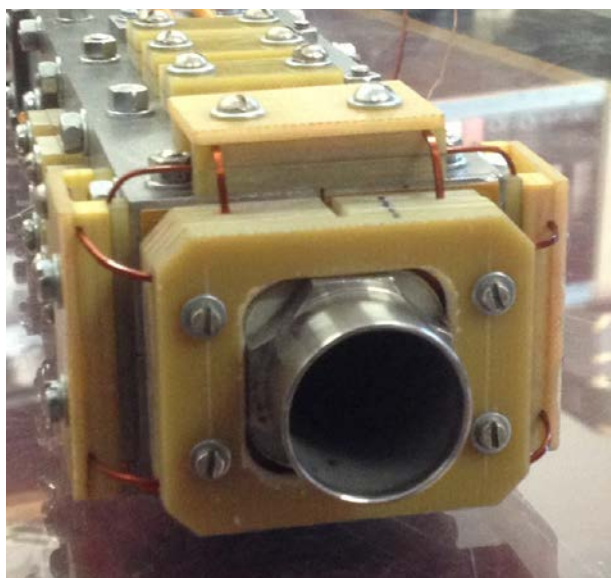


Рисунок 3 Организация коммутации четырех катушек сверхпроводящей линзы на торце.

Ток питания катушки 1.15 кА позволяет получить требуемый градиент 100 Т/м. На рис.3 показана линза в сборе и коммутация четырех обмоток на ее торце.

3 Разработка модели магнитного поля финального фокуса для моделирования движения частиц

Разработана модель магнитного поля для элементов финального фокуса, показанных на рис.4. Модель включает основной соленоид детектора с амплитудой продольного поля 2 Т, компенсирующий соленоид с полем 4 Т и экранирующий соленоид с полем 2 Т. Поля компенсирующего и экранирующего соленоидов направлены противоположно полю основного соленоида детектора.

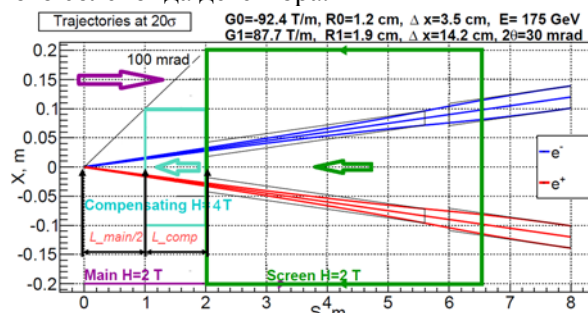


Рисунок 4 Схема размещения основных магнитных элементов системы финального фокуса (основной, компенсирующий и экранирующий соленоиды; двухапертурная линза финального фокуса).

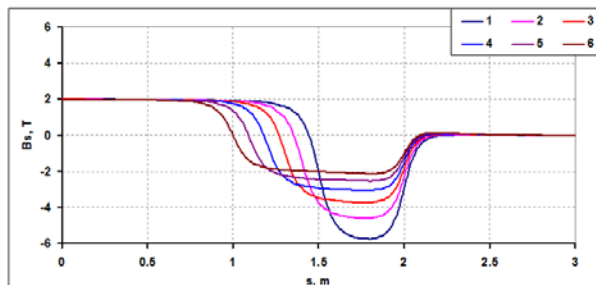


Рисунок 5 Распределение продольного магнитного поля на оси детектора для разных длин компенсирующего соленоида (интеграл поля сохраняется)

Модельное продольное поле на оси соленоида для различных длин компенсирующего соленоида (при условии сохранения его интеграла поля) показано на рис.5. Поскольку пучки пересекают соленоидальное поле под углом и со смещением относительно оси, на границе поля возникает горизонтальная компонента, зависящая от длины соленоида (рис.6).

Это горизонтальное поле вызывает поворот пучка в вертикальной плоскости и, следовательно, нежелательное возбуждение вертикального эмиттанса пучка. Из рис.6 видно, что чем больше длина соленоида, тем меньше величина горизонтальной компоненты магнит-

ного поля. Параметры соленоидального поля были оптимизированы с целью получения приемлемого увеличения вертикального эмиттанта пучка.

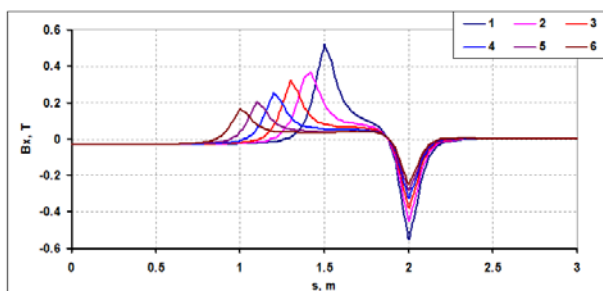


Рисунок 6 Горизонтальное поле на оси пучка для разной длины компенсирующего соленоида.

4 Разработка компьютерной программы моделирования движения частиц в сложных полях финального фокуса

Разработана компьютерная программа для моделирования движения частиц в магнитном поле финального фокуса, имеющего сложную трехмерную конфигурацию. Для моделирования продольное распределение магнитного поля в финальном фокусе коллайдера было разбито («слайсировано») на короткие отрезки, внутри которых поле считалось постоянным (рис.7).

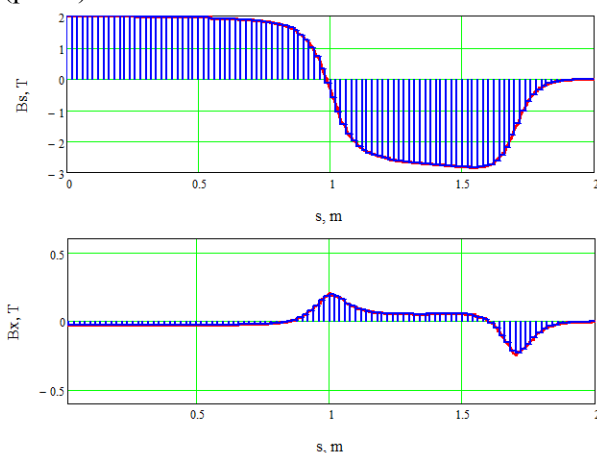


Рисунок 7 Кусочно-постоянное приближение продольного распределения соленоидального (вверху) и горизонтального (внизу) поля системы финального фокуса.

Для каждого слайса линейное движение рассчитывалось с помощью матричного формализма (т.н., кусочно-постоянное приближение), а нелинейные компоненты поля учитывались в приближении «тонкой нелинейной линзы», размещаемой на границе отрезков. Такой алгоритм автоматически обеспечивает сим-

плектичность преобразования координат, а малая длина слайсов дает требуемую точность. При необходимости длину отрезков разбиения можно уменьшать, поскольку матричные преобразования и тонкие нелинейные линзы обеспечивают высокую скорость моделирования движения частиц.

5 Оптимизация динамической апертуры

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. В обоих случаях оптимизация динамической апертуры проводилась с помощью программы моделирования Acceleraticum, разработанной в ИЯФ. Программа позволяет моделировать и оптимизировать движение частиц в циклическом ускорителе с учетом реалистичной магнитной структуры, синхротронного излучения и других эффектов.

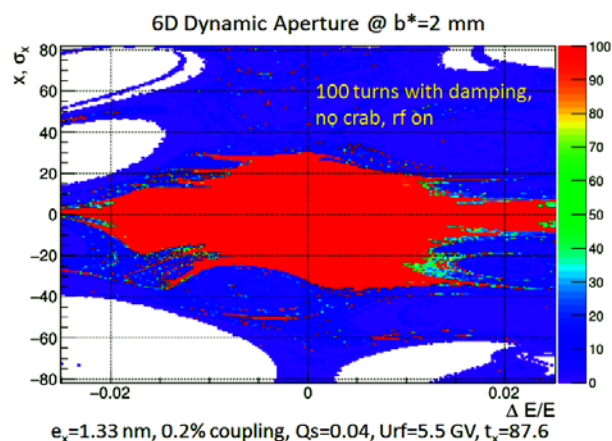


Рисунок 8 Оптимизированная динамическая апертура циклического электрон-позитронного коллайдера с методом встречи пучков типа Crab Waist. Красным цветом показана область устойчивого движения. По вертикальной оси отложена динамическая апертура, нормированная на стандартный размер пучка. По горизонтальной оси – относительное отклонение энергии частицы от номинальной.

На рис.8 показана оптимизированная динамическая апертура циклического электрон-позитронного коллайдера для встречи пучков Crab Waist. Для номинальной энергии горизонтальная апертура составляет $\pm 30\sigma_x$. Для частицы с отклонением по энергии $\pm 2\%$ горизонтальная апертура составляет около $\pm 5\sigma_x$. Полученная величина представляется доста-

точной как для обеспечения высокой светимости коллайдера, так и для получения эффективной инжекции.

6 Оптимизация энергетического акцептанса (продольной апертуры)

Оптимизирован энергетический (динамический) акцептанс промежутка встречи e+e-коллайдера, в котором реализован метод пересечения пучков типа Crab Waist. Оптимизация проводилась с помощью коррекции хроматизма высокого порядка секступольными линзами, размещенными в правильно подобранных значениях набега бетатронной фазы. На рис.9 вверху показана исходная ситуация, когда энергетический акцептанс (устойчивая область бетатронных частот) составляет всего (-0.4%, +0.5%). В результате существенного уменьшения производных частоты по импульсу до четвертого порядка включительно, энергетический акцептанс удалось увеличить в несколько раз до (-2.5%, +1.9%).

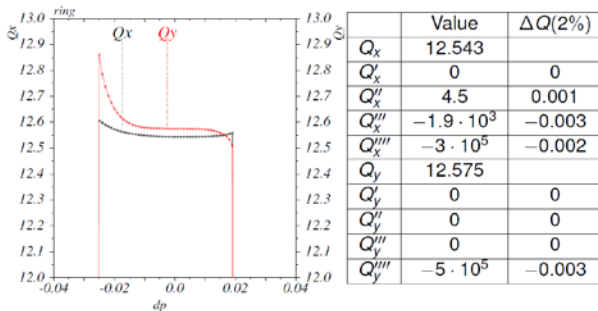
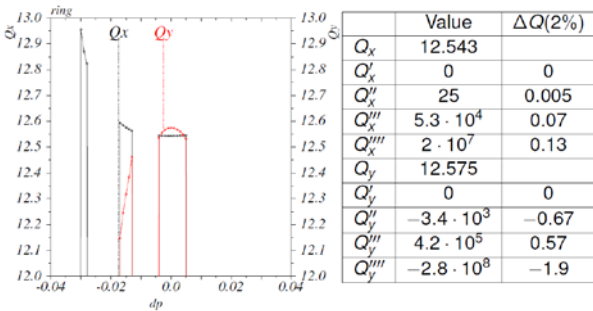


Рисунок 9 Акцептанс до и после оптимизации.

Следует отметить, что первые три производные вертикальной бетатронной частоты от энергии точно обратились в ноль.

7 Учет «крабовых» секступолей в модели коллайдера

Разработан метод учета влияния «крабовых» секступольных линз на динамику пучка. «Крабовые» секступоли используются в методе встречи пучков Crab Waist для взаимного разворота перетяжки сталкивающихся сгустков

и компенсации, таким образом, «пучковых» резонансов связи (рис.10).

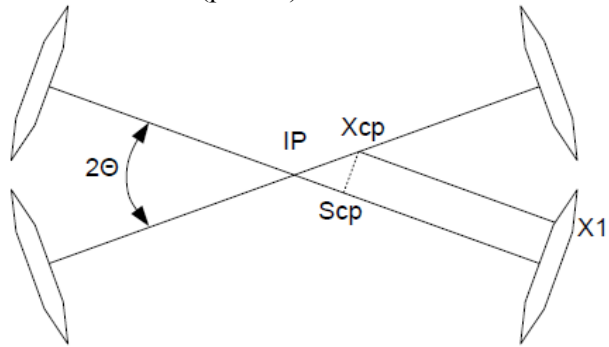


Рисунок 10 Две пары «крабовых» секступольных линз. Набег бетатронной фазы от точки встречи до секступоля равен π по горизонтали и $\pi/2$ по вертикали.

Крабовые секступольные линзы учитываются в виде набора «тонких» секступольных линз, что позволяет рассматривать эффекты, связанные с длиной линзы. Как известно, пара тонких секступольных линз с набегом бетатронной фазы $n\pi$ между ними, где n – целое число, не производит геометрических aberrаций. Однако для реальных линз с конечной длиной точно компенсируются только aberrации второго порядка. Высшие порядки остаются и способны существенно уменьшать динамическую апертуру.

8 Коррекция влияния «крабовых» секступолей

Разработан метод коррекции влияния «крабовых» секступольных линз на динамику пучка. Квадратичные aberrации пары линз с набегом фазы $n\pi$ между ними, где n – целое число, исчезают автоматически. Однако высшие порядки aberrаций остаются, и, ввиду того что градиент линз второго порядка большой, могут ограничивать динамическую апертуру.

Для уменьшения этого нежелательного эффекта было предложено размещать вблизи «крабовых» секступолей еще одну пару корректирующих секступольных линз с силой, не превышающей 10% от силы основных секступолей. Эффект секступольных корректоров показан на рис.11.

Голубая кривая на рис.11 показывает влияние «тонких» крабовых секступолей. Учет конечной толщины приводит к уменьшению динамической апертуры (красный контур на рис.11). Постановка дополнительных слабых секступольных корректоров существенно увеличивает динамическую апертуру (зеленая линия на рис.11).

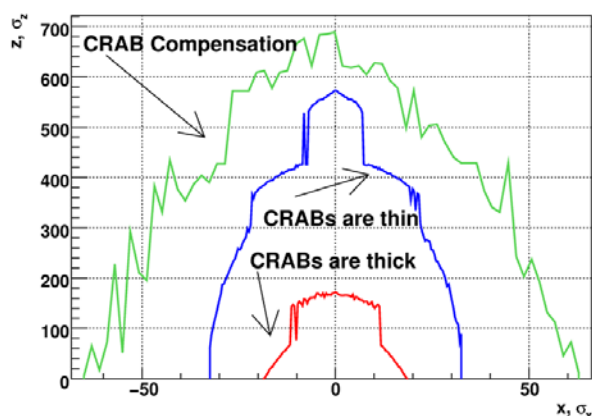


Рисунок 11 Компенсация влияния «крабовых» секстипольных линз. Пояснения в тексте.

Заключение

Исследование концепции финальной фокусировки пучков Супер Чарм-Тау фабрики и других высокопроизводительных коллайдеров (Тема П.15.3.1, № 0305-2014-0011) имеет большое значение для развития метода встречных пучков, поскольку технология встречи Crab Waist, используемая в проекте Фабрики, позволяет увеличивать светимость (эффективность) коллайдера в 10-100 раз без увеличения тока пучка. Этот метод на сегодняшний день является основным для всех рассматриваемых проектов электрон-позитронных коллайдеров будущего.

Организация финального фокуса и, в частности, разработка магнитных элементов финального фокуса с требуемыми жесткими параметрами, является одним из ключевых вопросов реализации нового метода встречи.

ИЯФ СО РАН является одним из ведущих научных центров, разрабатывающим эти вопросы. Здесь предложена концепция компактной двухапертурной сверхпроводящей квадрупольной линзы финального фокуса с градиентом 100 Т/м и более. Успешно исследуются вопросы моделирования магнитного поля финального поля с учетом основного соленоида детектора и элементов, компенсирующих его влияние на динамику пучка. С помощью уникальных моделирующих программ изучается движение заряженных частиц высоких энергий в магнитном поле сложной конфигурации.

Полученные результаты важны как для российского проекта Супер Чарм-Тау фабрики, так и для установок со встречными пучками, разрабатываемыми в ЦЕРН и в ИФВЭ (Пекин).

Список использованных источников

- [1] Zobov M., Drago A., Gallo A., Milardi C., Shatilov D., Valishev A. Simulation of Crab Waist collisions in DAFNE with KLOE-2 interaction region. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 229-232.
- [2] Bogomyagkov A., Levichev E. Interaction region for Crab Waist scheme of the future electron-positron collider (CERN). 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 2034-2036.
- [3] Benedikt M., Holzer B., ... Bogomyagkov A., Levichev E., Shatilov D. et al. Combined operation and staging for the FCC-ee collider. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 2169-2172.
- [4] Koratzinos M., ... Bogomyagkov A., Shatilov D., Levichev E. et al. The FCC-ee study: progress and challenges. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 2165-2168.
- [5] Bacha B., Bassi G., ..., Kiselev V., Sinyatkin S., Zhuravlev A. et al. NSLS-II injector commissioning and initial operations. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 1944-1946.
- [6] Levichev E. B., Skrinsky A. N., Tikhonov, Yu A. et al. High-precision particle mass measurements using the KEDR detector at the VEPP-4M collider. PHYSICS-USPEKHI. Vol. 57, Issue: 1, P. 66-79.
- [7] Fartoukh S., Valishev A., Shatilov D. An alternative high luminosity LHC with flat optics and long-range beam-beam compensation. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, 2015, pp. 2199-2202.

№ 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. Основные направления – материаловедение, исследование взрывных процессов, археология, нанотехнологии и т.д.

На накопителе ВЭПП-3 продолжают эксперименты по ядерной физике на внутренней газовой мишени, позволяющие получить информацию о структуре и свойствах протона.

Кроме того, на комплексе ВЭПП-4 регулярно проводятся эксперименты по исследованию динамики пучка и физики ускорителей.

Планируемые к выполнению работы нацелены на получение новых знаний и результатов в таких областях, как физика высоких энергий, ядерная физика, физика пучков заряженных частиц и ускорителей, исследования с использованием синхротронного излучения.

1 Настройка режима генерации жесткого рентгеновского излучения из «змейки»

В 2015 году активно велись работы по запуску канала вывода синхротронного излучения (СИ) из семиполусного вигглера уста-

новленного на ВЭПП-4М для генерации мощных пучков СИ.

Для тонкой юстировки канала вывода в экспериментальном зале СИ была выставлена геодезическая сеть, совмещенная с геодезической сетью комплекса ВЭПП-4М. В экспериментальном зале, а также в подсобных технических промежутках было установлено пятнадцать геодезических маркеров, позволяющих производить точные измерения положения конструктивных элементов каналов вывода СИ (коллиматоров излучения, затворов, поглотителей и т.п.) относительно медианной плоскости накопителя.

Даная геодезическая сеть позволила провести первоначальную выставку канала вывода вигглерного излучения (канал №8) с точностью лучше 1 мм. Результаты выставки были проверены с использованием безопасного режима работы источника СИ с рабочим током пучка 100 мкА. Данная величина тока является компромиссом, позволяющим сочетать безопасную трассировку пучков СИ (с использованием люминофорных датчиков положения пучка) с уверенным функционированием системы стабилизации электронного пучка в накопителе ВЭПП-4М.

Данный режим выставки канала позволил окончательно настроить положение критических элементов подготовки пучка СИ вдоль всей длины экспериментального зала (около 35 м). Также были проведены точные выставки радиационно-защищенных объемов экспериментальных станций, использующих излучение вигглера.

Окончательная проверка качества выставки была подтверждена работой в нормальном режиме работы с токами пучка в накопителе около нескольких миллиампер со всеми установками элементов радиационной защиты.

Для обеспечения возможности работы с высокоинтенсивными пучками СИ на вигглерном канале радиационный затвор канала был усилен установкой дополнительного поглотителя излучения с водным охлаждением запорного элемента. Поглотитель был успешно испытан во всех рабочих режимах.

2 Настройка режимов подъема энергии в накопителе ВЭПП-4М до 4 ГэВ

Максимальная энергия инжекции в накопительное кольцо ВЭПП-4М составляет 1.85 ГэВ. Для проведения экспериментов по физике высоких энергий с детектором КЕДР, экспериментов с пучками синхротронного излучения и пучками жестких гамма-квантов на

установке «выведенный пучок», требуется ускорение пучков электронов и позитронов в ВЭПП-4М до энергии 4 ГэВ. Для этой цели была осуществлена настройка оптики накопителя на промежуточных энергиях. Необходимые данные (токи источников питания магнитной системы накопителя, ВЧ системы, т.д.) записаны в специальные файлы – режимы накопителя ВЭПП-4М.

Настройка оптики накопителя включает: коррекцию замкнутой орбиты пучков частиц, коррекцию частоты бетатронных колебаний, коррекцию оптических функций накопителя (бетатронной и дисперсионной) малым числом квадрупольных линз, коррекцию хроматизма частот, коррекцию коэффициента связи бетатронных колебаний с помощью скью-квадрупольных линз, и т.д. Так как максимальный ток распределенной в элементах периодичности секступольной компоненты, необходимый для коррекции вертикального хроматизма, ограничен значением в 600А, то данная компонента насыщается при энергии равной 3 ГэВ. Для работы на более 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 разработана и внедрена в автоматизированную систему управления комплексом процедура динамической коррекции оптики накопителя в процессе ускорения частиц. Различные магнитные элементы накопителя обладают разными магнитными характеристиками, что приводит к разному времени подъема поля и, в свою очередь, к рассогласованию оптики накопителя в процессе ускорения. Экспериментальным путем были определены значения дипольной и квадрупольной коррекции оптики, что позволило повысить скорость ускорения частиц в три раза и достичь значения 10 МэВ/с.

3 Настройка режима генерации жесткого рентгеновского излучения из «змейки»

В экспериментах на накопителе ВЭПП-4М с пучками синхротронного излучения для генерации жесткого рентгеновского излучения используется 7-полюсная электромагнитная змейка с полем 13 кГс. Эксперименты с излучением из змейки проводятся на станциях синхротронного излучения «Фазоконтрастная рентгеноскопия и рентгенофлуоресцентный 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. Так как экспериментальная программа накопителя ВЭПП-4М направлена на разных пользователей, процесс ускорения пучков частиц настроен без поля змейки. Включение змейки (ввод поля) происходит уже на высокой энергии ВЭПП-4М. В виду того, что интеграл поля вдоль оси змейки скомпенсирован только на максимальном поле, для повышения стабильности циркулирующего пучка при подъеме поля змейки, был создан промежуточный режим с половинным полем змейки. Искажение замкнутой орбиты в этом режиме было скорректировано близлежащими дипольными корректорами. Для получения основного режима с максимальным полем в змейки была произведена коррекция оптики накопителя орбита, бетатронные частоты, хроматизм и т.д.). Так как 7 полюсная змейка расположена в месте электростатического разведения пучков электронов и позитронов, необходимого для работы накопителя в режиме установки со встречными пучками (коллайдер), а канал вывода СИ расположен в медианной плоскости накопителя, для получения генерации излучения из змейки электростатическое разведение отключается.

Для увеличения интенсивности рентгеновского излучения из змейки, требуется увеличить интенсивность электронного пучка. Максимальное число частиц в сгустке ограничено односгустковой вертикальной неустойчивостью. Для повышения этого порога используется система подавления дипольных вертикальных колебаний.

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), с четырьмя сгустками, расположенными через четверть периметра накопителя (0.3 мксек). Работа с большим числом сгустков в настоящее время возможно только без системы подавления поперечных дипольных колебаний. Таким образом, максимальный ток в одном сгустке будет ограничен на уровне 5 мА.

Для проведения долговременных экспериментов с пучками синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М была разработана и внедрена в систему управления комплекса процедура автоматической стабилизации орби-

ты пучка электронов (по вертикали и по горизонтали). Измерения орбиты производится по датчикам положения пучка, а коррекция осуществляется малым числом корректоров.

Заключение

При выполнении научно-исследовательской работы по теме № 15.3.2 «Развитие методов получения высокой интенсивности электронных и позитронных пучков ускорительного комплекса ВЭПП-4 для экспериментов по ФВЭ, ядерной физике и СИ» (№ 0305-2014-0012), выполненной в 2015 году, были получены следующие результаты:

1. Осуществлена настройка процесса ускорения пучков частиц в накопителе ВЭПП-4М до максимальной энергии. Получены режимы работы накопителя на промежуточных энергиях. Выполнена коррекция оптики накопителя.
2. Разработана и реализована процедура динамической коррекции оптики накопителя ВЭПП-4М в процессе ускорения частиц.
3. Получены режимы работы накопителя ВЭПП-4М с различным временным разрешением (различное число следования сгустков).
4. Получена генерация жесткого рентгеновского излучения из 7-полюсной змейки. Настроены режимы для автоматического включения змейки (подъема поля).
5. Произведена геодезическая выставка канала синхротронного (вигглерного) излучения № 8. Произведена точная юстировка канала с пучком жестких рентгеновских квантов. Выполнена проверка работы канала на большом токе циркулирующего пучка электронов.
6. Выполнена точная выставка радиационно-защищенных объемов экспериментальных станций, использующих излучение из змейки.
7. Разработана и реализована процедура автоматической стабилизации горизонтальной и вертикальной орбиты циркулирующего пучка в ВЭПП-4М по измерениям с датчиков положения пучка с помощью дипольных коррекций.

Список использованных источников

- [1] Толочко Б.П., Шарафутдинов М.Р., Евдоков О.В., Жогин И.Л., Тен К.А., Косов А.В., Панченко В.Е., Золотарев К.В., Мезенцев Н.А., Аульченко В.М., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Хлестов В.Б., Пиминов П.А., Левичев Е.Б. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ ДЕТОНАЦИЯ НА КАНАЛЕ 7-МИ ПОЛЮСНОЙ

ЗМЕЙКИ ВЭПП-4. В книге: Использование синхротронного и терагерцового излучения для исследования высокоэнергетических материалов Школа по подготовке молодых специалистов. Новосибирск, 2015.

- [2] Тен К.А., Титов В.М., Кулипанов Г.Н., Аульченко В.М., Купер К.Э., Толочко Б.П., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Косов А.Н., Евдоков О.В., Шарафудин М.Р. Новые возможности исследования детонационных процессов на базе коллайдера ВЭПП-4. "XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter", March 1-6, 2015, Elbrus, Russia. Book of Abstracts. Moscow@Chernogolovka@Nalchik, 2015. ISBN 978-5-94691-536-6.
- [3] Титов В.М., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Толочко Б.П. Динамическая регистрация взрывных процессов разных масштабов. Международная конференция XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 23-27 марта 2015г. г., Сборник тезисов докладов. Саров. ВНИИЭФ.
- [4] Тен К.А., Титов В.М., Кулипанов Г.Н., Аульченко В.М., Купер К.Э., Толочко Б.П., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Косов А.Н., Евдоков О.В., Шарафудин М.Р. Экспериментальная станция по исследованию быстропротекающих процессов на базе коллайдера ВЭПП-4. Международная конференция XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 23-27 марта 2015г. г., Сборник тезисов докладов. Саров. ВНИИЭФ.
- [5] Титов В.М., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Рубцов И.А., Кулипанов Г.Н., Аульченко В.М., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Толочко Б.П., Шарафудин М.Р., Рыкованов Г.Н., Музыря А.К., Аминов Ю.А., Смирнов Е.Б., Просвирнин К.М. "Динамическая регистрация выброса наночастиц при взрывном ускорении металлических фольг. VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, "ЛАВРЕНТЬЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО МАТЕМАТИКЕ, МЕХАНИКЕ И ФИЗИКЕ", 7-11 сентября 2015 г., Тезисы докладов. Новосибирск, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, ISBN 978-5-94671-091-0.

№ 15.3.3 Развитие метода круглых пучков при работе коллайдера ВЭПП-2000 для экспериментов по физике высоких энергий в широком диапазоне энергий

Введение

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 использует концепцию круглых встречных пучков, предложенную и реализованную в ИЯФ СО РАН с целью превзойти фундаментальные ограничения светимости, навязываемые т. н. эффектами встречи. На первой стадии коллайдер использовал инфраструктуру своего предшественника — ускорительного комплекса ВЭПП-2М. Это позволило продемонстрировать работоспособность концепции, получить рекордные интенсивности встречных сгустков и светимость в области низких энергий (до 500 МэВ в пучке). ВЭПП-2000 успешно отработал три сезона по набору экспериментальных данных детекторами СНД и КМД-3. Однако для достижения проектных параметров во всём диапазоне энергий (до 1 ГэВ в пучке) необходимо произвести модернизацию инжекционной цепи, подключиться к новому источнику интенсивных пучков электронов и позитронов. Эта работа легла в основу данного отчёта.

1 Модификация магнитных элементов БЭП с целью повышения уровня поля и компенсации хроматизма фокусировки во всём диапазоне энергий

Дипольные магниты БЭП

Основная цель переделки магнитов — достижение поля 26 кГс для работы на энергии 1 ГэВ, что нетривиально, поскольку железо магнитов сильно насыщается в таком поле. Корректирующие обмотки перенесены на ярмо магнитопровода. Проведено заужение полюса со 120 мм до 90 мм для концентрации потока и увеличении поля. Кроме того, для снижения насыщения магнитопровода установлены изогнутые пластины толщиной 50 мм на внутренний радиус ярма магнита. Водоохлаждаемые обмотки основного питания остаются прежними.

Квадрупольные линзы БЭП

Базовая идея доработки квадрупольей такова: сохраняя обмотки основного питания, переобработать старый магнитопровод, чтобы задать новый профиль полюсов с меньшим

вписанным радиусом и усиленной секступольной компонентой (Рисунок 1 и 2).

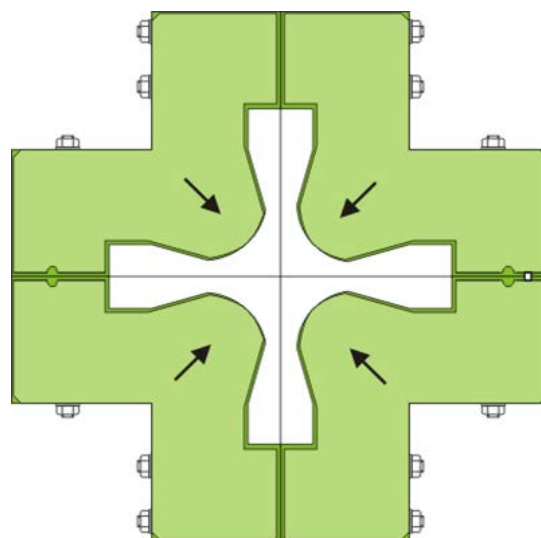


Рисунок 1. Новый профиль квадрупольной линзы БЭП.

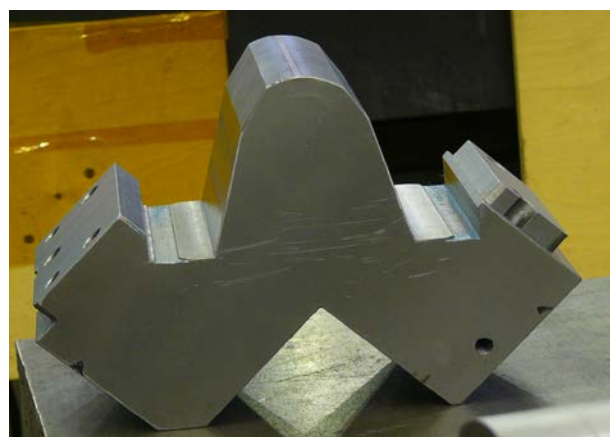


Рисунок 2. Одна четверть магнитопровода D-линзы после обработки. Хорошо виден асимметричный профиль полюса.

Секступольная компонента поля для коррекции хроматизма создается выбором профиля полюсов:

$$x(y) = -\frac{G}{S} \left(1 - \sqrt{1 \pm \frac{S}{G} \frac{R^2}{y} + \left(\frac{S}{G} \right)^2 \frac{y^2}{3}} \right),$$

где G и S — квадрупольный и секступольный градиенты, R — вписанный радиус, x и y — горизонтальная и вертикальная координаты. Целевые параметры градиентов следующие: $G_{QD} = -4,51$ кГс/см, $P_{6QD} = -0,175$ кГс/см², $G_{QF} = 3,21$ кГс/см, $P_{6QF} = 0,078$ кГс/см².

Особенность БЭП в том, что квадрупольи запитаны от одного источника с диполями. Имеющиеся коррекции, довольно слабые, становятся ещё слабее с насыщением железа. Таким образом, во всём рабочем диапазоне пита-

ющего тока нужно добиться схождения кривых насыщения и попасть в узкий коридор, обеспечиваемый этими коррекциями. Кроме того, кривые насыщения секступольной и квадрупольной гармоник очень сильно различаются, секступольная составляющая жёстко насыщается при токе свыше 6 кА (Рисунок 3).

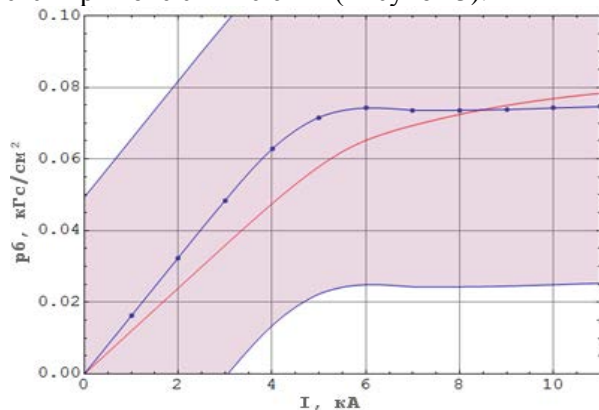


Рисунок 3. Кривая насыщения секступольной гармоники, в сравнении с квадрупольной.

Для небольшой поправки секступольного градиента на кольце предусмотрены слабые (очень короткие) корректоры, выполненные как отдельные элементы. В тесной обстановке кольца их магнитопроводы существенно влияют на интеграл градиента соседних квадрупольей, на уровне 3,5%, что было учтено при расчётах, и проверено магнитными измерениями.

Магниты ВУМР

Для искажения орбиты перед выпуском из БЭП и подведения пучка к ножу септум-магнита будут использоваться новые импульсные С-образные шихтованные магниты, т. н. ВУМР-магниты (Рисунок 4), расположенные в двух прямолинейных промежутках. Для этих участков также сконструирована и изготовлена новая вакуумная система, включающая порты вакуумной откачки.



Рисунок 4. ВУМР-магниты.

2 Проведение магнитных измерений, изучение распределения краевых полей

По каждому диполю делались измерения карты поля на токах 1 кА и 9,9 кА с помощью каретки датчиков Холла (Рисунок 5).

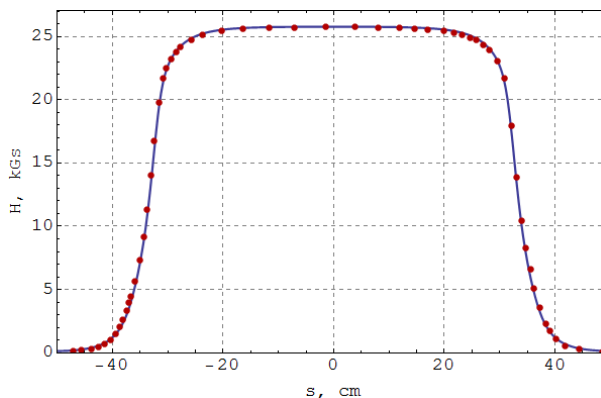


Рисунок 5. Типичное продольное распределение поля при токе 9,9 кА. Синяя линия — расчёт, красные точки — измерения.

Также с шагом 0,5 кА промерялась токовая зависимость поля в центре магнита. На следующем рисунке (Рисунок 6) представлены зависимости эффективного поля для всех 12 магнитов (голубые линии). Небольшое отличие от расчёта (красные точки) на уровне 0,5% связано с неточным знанием магнитных свойств железа магнитопровода в области экстремального насыщения и не является критичным. В то же время разброс между магнитами лежит в пределах 1×10^{-3} .

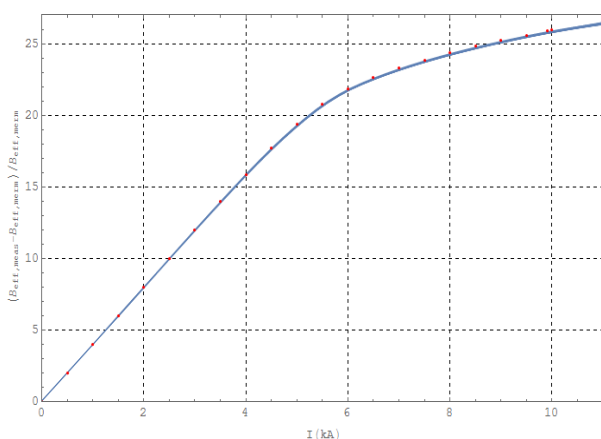


Рисунок 6. Зависимость эффективного ведущего поля от питающего тока, расчёт и измерения.

Измерения магнитного поля квадрупольных линз производилось на стенде с вращающимся валом, таким образом определялись мультипольные гармоники интегрального поля. Например, на Рисунке 7 представлена изме-

ренная зависимость отклонения секступольной компоненты поля от требуемого значения в относительных единицах как функция тока питания. Хорошо видно, что она насыщается в соответствии с предсказанием.

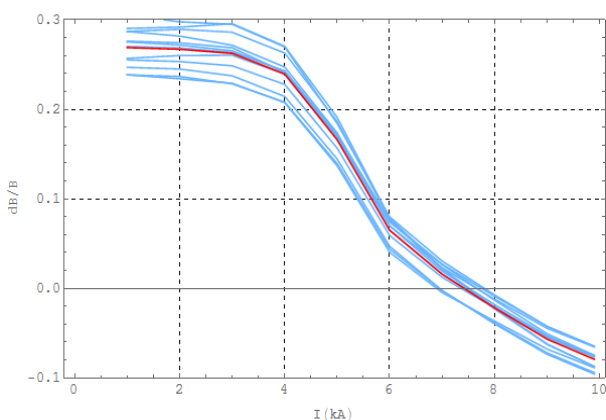


Рисунок 7. Зависимость от тока питания отклонения секступольной гармоники от требуемого значения.

3 Сборка и физический запуск бустерного накопителя БЭП

К концу декабря 2015 года БЭП был полностью собран. Сборка кольца началась с установки и прецизионной выставки 12 дипольных магнитов. Затем в дублиеты собирались пары квадрупольных линз: на шлифованной плите с помощью лазер-трекера по предварительно привязанным на координатной машине к профилю полюсов геознакам позиционировались F- и D-квадруполь и производилась их штифтовка. Требуемая точность выставки магнитных элементов составляет ± 50 мкм. После установки дублиетов на кольцо, верхние половинки всех магнитных элементов были сняты и собрана вакуумная камера (Рисунок 8). Как только был получен высокий вакуум на уровне 10^{-8} мбар, магнитная система вновь была собрана. Далее все магнитные элементы ошинованы медным водоохлаждаемым шинопроводом и подключены гибкими шлангами к системе водоохлаждения.

После механической сборки был произведен ряд контрольных электрических тестов, включение основного 10 кА источника питания и слаботочных источников питания корректоров. Проверка датчиком Холла полярности магнитного поля во всех элементах, а также коммутации и полярности всех корректирующих катушек (X-, Z-, QX-, QZ-корректоры).



Рисунок 8. Сборка вакуумной камеры.

4 Инжекция и захват пучков электронов и позитронов из канала К-500

Для инъекции в модернизированный синхротрон на энергии до 500 МэВ, вместо прежних 120 МэВ, были изготовлены и установлены два импульсных магнита: т. н. «доворачивающий» (PM1) и впускной (PM2). Длительность импульса магнитов составляет около 100 мкс. Для своевременного запуска к источникам питания этих магнитов приведён специальный импульс от блока, отвечающего за синхронизацию двух ВЧ-систем: Накопителя Охлаждителя ВЭПП-5 и бустера БЭП.

Инжекция в БЭП происходит по однооборотной схеме, для чего используется быстрый инфлектор (кикер), с длиной импульса около 100 нс. Физически кикер состоит из двух пластин, внешней и внутренней, на которые подаются импульсы от разных генераторов. На рисунке 9 приведены осциллограммы двух сигналов с пластин инфлекторов, полученных при настройке их синхронизации.

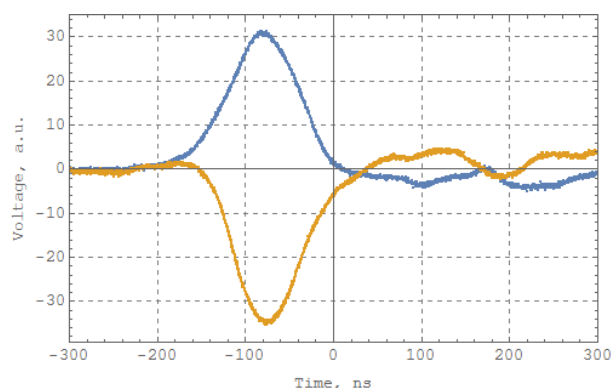


Рисунок 9. Осциллограмма импульсов на двух пластинах кикера.

5 Модернизация поворотных магнитов канала БЭП–ВЭПП-2000 для работы на энергии до 1 ГэВ

Для успешного перепуска пучков на энергии 1 ГэВ из бустера БЭП в кольцо ВЭПП-2000 нужна существенная модернизация перепускного канала. Основная переделка в канале перепуска БЭП–ВЭПП-2000 состоит в изготовлении новых «синих» магнитов и новых вакуумных камер в этих магнитах. Они запитаны последовательно с магнитами БЭП. Соответственно, аналогично разнотипным элементам кольца, здесь также надо подогнать кривые насыщения, чтобы синхронно работать с кольцом БЭП. Все магниты (4 «коротких» и 4 «длинных») изготовлены (Рисунок 10), проведено измерение краевого поля (Рисунок 11).

6 Модернизация зеркал вывода СИ для пучковой диагностики в кольце ВЭПП-2000

Важная работа по модернизации кольца ВЭПП-2000 — замена зеркал вывода СИ для диагностики. Старая конструкция зеркала — это медная, косвенно охлаждаемая призма с наклеенными пластинками зеркал. При нагреве от пучка зеркала отпадали. Поскольку планируется работать на 1 ГэВ и с большим током (до 200 мА), были сделаны новые зеркала: призма с расположенными под правильным углом отполированными гранями с необходимым покрытием (Рисунок 12). Были заменены все зеркала во всем кольце.



Рисунок 10. Короткий «синий» магнит.

7 Разработка программы обратной связи для автоматической настройки светимости

Настройка кольца ВЭПП-2000 состоит из нескольких этапов. Во-первых — это правка равновесной орбиты, которая состоит из такой

процедуры: набор матрицы откликов равновесной орбиты на вариацию градиентов линз, SVD анализ, расчет токов коррекций. Нужно провести 2–3 итерации, каждая из которых занимает примерно 10 минут. Затем производится процедура минимизации токов корректоров, после чего мы имеем орбиту в пределах 0,5 мм относительно заданной проектной орбиты. После этого производится настройка оптической схемы кольца: набор матрицы откликов в пикапах и ПЗС камерах на вариацию дипольных корректоров, SVD анализ, коррекция токов элементов (квадруполи и соленоиды), требуется 3–4 итерации по 10 минут. В первую очередь это связано с установкой новой системы ПЗС камер. Такой прогресс позволил считать эту процедуру рутинной, реальная настройка режима работы может занимать несколько часов, вместо нескольких дней в первых сезонах работы комплекса. В результате мы имеем ровные размеры, проектную β^* , нулевую дисперсию вне ахроматов. Кроме этого, на кольце производится коррекция связи бетатронных колебаний с помощью трех семейств скью-квадрупольных линз до уровня $v_1 - v_2 < 0.003$.

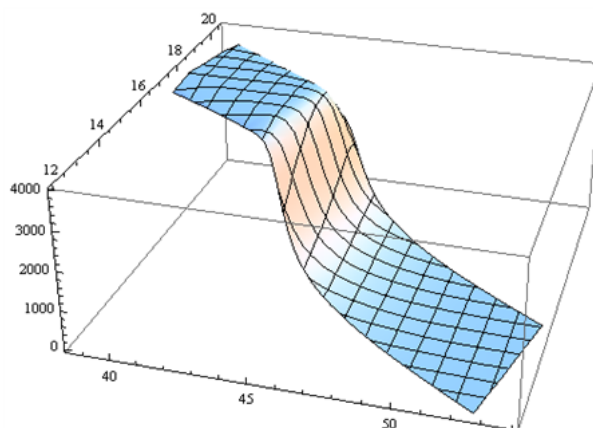


Рисунок 11. Измерение поля на торце «синего» магнита.

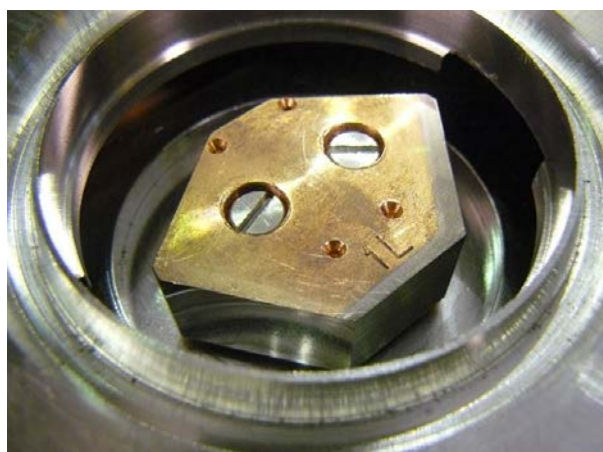


Рисунок 12. Новое зеркало вывода СИ.

Важность правки оптики поясняет рисунок 13. По сезонам 2010–2011 годов, когда эта процедура не была такой рутинной, до правки оптики светимость была на довольно низком уровне, после правки увеличение составило до 4–5 раз.

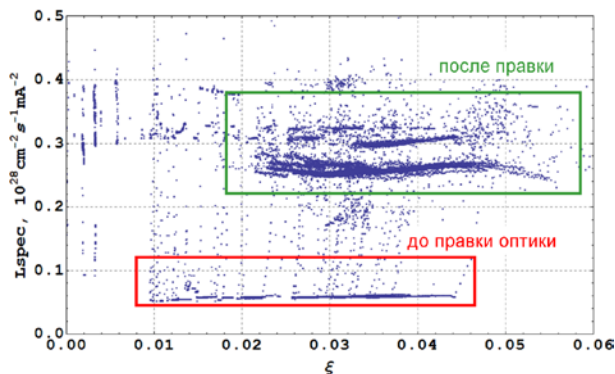


Рисунок 13. Зависимость удельной светимости от параметра ξ на энергии 900 МэВ

Заключение

Завершается модернизация ускорительного комплекса ВЭПП-2000. Она включает в себя подключение к новому Инжекционному комплексу ИЯФ через канал транспортировки пучков К-500, а также глубокую модернизацию бустерного синхротрона БЭП с целью повышения его максимальной энергии до 1 ГэВ. На кольце БЭП были модифицированы все магнитные элементы, проведены магнитные измерения, установлен новый впускной магнит и ВУМР-магниты, модифицирована вакуумная камера. Кольцо собрано и подготовлено к инжекции пучков.

Также ведутся работы по модернизации перепускного канала БЭП–ВЭПП-2000. На самом коллайдере ВЭПП-2000 проведена замена зеркал вывода синхротронного излучения для нужд диагностики, накопитель также готов к работе.

Список использованных источников

- [1] Shwartz D. V., Berkaev D. E., Kasaev A. S. et al. Recent Beam-beam Effects and Luminosity at VEPP-2000 // Proc. of IPAC'2014. 2014. P. 924–927.
- [2] Shwartz D. V., Berkaev D. E., Bochek D. V. et al. Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV // Proc. of IPAC'2014. 2014. P. 102–104.
- [3] Беркаев Д. Е., Шатунов П. Ю., Шварц Д. Б., и др. Управление энергией встречных электрон-позитронных пучков на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 // АВТОМЕТРИЯ. 2015. Т. 51. № 1. С. 4–11.
- [4] Сторожев И.С. Источник импульсного питания магнитов ускорительно-накопительных комплексов

№ 15.4.1 Разработка методов малоракурсной радиографии сверхплотных объектов на основе мощных сфокусированных пучков электронов

Введение

Развитие метода малоракурсной импульсной томографии объектов с большой оптической толщиной позволяет решить задачи поддержки и развития ядерного арсенала России в условиях действия договора о всеобщем запрете ядерных испытаний.

1 Разработка технологии пайки секций высоковольтного изолятора

На базе экспериментального производства ИЯФ СО РАН разработана отечественная технология пайки секционированных высоковольтных изоляторов диаметром 250 мм в высоковакуумном прогретом исполнении (рабочий вакуум порядка 10^{-10} торр). В 2015 году экспериментальным производством ИЯФ СО РАН освоено серийное производство изоляторов.

2 Разработка технологии сборки конденсаторов в формирующие линии

На базе экспериментального производства ИЯФ СО РАН разработана технология сборки, настройки, сушки и пропитки высоковольтных формирующих линий на основе плёночных конденсаторных ячеек производства Новосибирского конденсаторного завода. Начато серийное производство формирующих линий.

3 Расчеты и проектирование септум-магнита

Проведены расчёты магнитных полей септум-магнита и спроектирован его прототип.

4 Разработка и проектирование гидростатической системы определения положения элементов ускорителя

Разработана гидростатическая система определения положения элементов ускорителя, основанная на использовании четырёх датчиков. Конфигурация системы датчиков позволяет определять угловые и вертикальное откло-

нения в расположении измеряемого узла относительно заложенных в проектной документации.

Заключение

В ИЯФ СО РАН активно развивается метод малоракурсной импульсной томографии сверхплотных объектов. Данные работы являются пионерскими и коллектив ИЯФ СО РАН занимает лидирующие позиции по этой методике в мире.

Разработка технологий пайки высоковольтных изоляторов и сборки формирующих линий, разработка и проектирование септум-магнита и гидростатической системы определения опложения узлов ускорителя, выполненные в рамках настоящей работы, являются значительным заделом для решения поставленной комплексной задачи развития метода радиографии.

№ 15.4.2 Исследование и оптимизация эффективности инъекции электронов и позитронов инжекционного комплекса ВЭПП-5

Введение

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН предназначено 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 каналы транспортировки частиц.

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 Настройка оптики накопителя-охладителя для обеспечения режима максимального накопления электронов и позитронов

Накопитель-охладитель Инжекционного комплекса ВЭПП-5 представляет собой ускорительное кольцо периметром 27.4 метра и способно 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.

Настройка оптики накопителя охладителя производилась с помощью компьютерной программы «sixdsimulation», разработанной ранее в ИЯФ СО РАН для коллайдера ВЭПП-2000 и интегрированной в систему управления Инжекционного комплекса. Были произведены коррекции, как равновесной орбиты, так и магнитной (электронно-оптической) структуры этого накопителя. Это позволило значительно увеличить пороговые токи накапливаемых пучков и существенно повысить скорость их накопления. Скорректированные структурные функции кольца накопителя-охладителя (бета-функции) представлены на рис. 1.

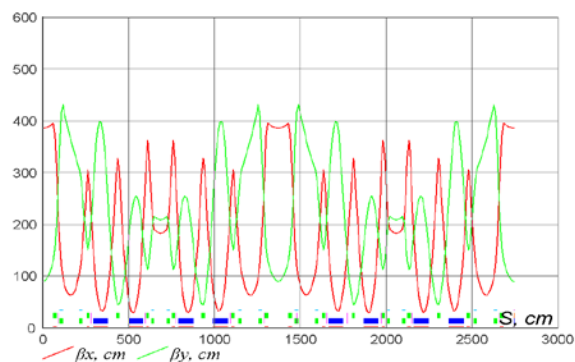


Рисунок 1. Бета-функции электроно-оптической структуры кольца накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5 после коррекции.

2 Ввод в работу импульсных систем транспортного канала в ВЭПП-3 (комплекс ВЭПП-3-ВЭПП-4М) и в БЭП (комплекс ВЭПП-2000)

Транспортные каналы предназначены для транспортировки накопленных в накопителе-охладителе пучков электронов и позитронов непосредственно для инъекции в магнитные структуры коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. В обоих случаях инъекция происходит в промежуточные (бустерные) накопители ВЭПП-3 и БЭП, соответственно, которые являются составными частями (подсистемами) этих физических установок.

Проект данных каналов предусматривает использование импульсных магнитных элементов: поворотные магниты, фокусирующие элементы (квадрупольные линзы) и корректирующие магниты. Для питания данных магнитов в ИЯФ СО РАН была разработана и создана серия импульсных источников питания ГИД-25. В настоящий момент все необходимые магнитные элементы и их источники установлены на Инжекционном комплексе и используются для проводки пучков на ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. На рис. 2 и 3 представлены стойки источников и специально созданная компьютерная программа, которая отслеживает состояние источников питания и стабильность их работы.

3 Проработка вариантов быстрого перехода между режимами накопления электронов и позитронов

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.

Следовательно, для увеличения зарядовой 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.



Рисунок 2. Стойка (крейт) с источниками ГИД-25.

Так же был создан программный автомат, реализующий цикл инжекции-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.

В настоящее время автомат инжекции-экстракции настраивается при помощи графического интерфейса. Для полноценной работы с потребителями требуется планировщик – программа, которая принимает запросы от потребителей и передает команды автомату на выполнение нужных процессов.

Позеленить всё									
5L7:-0.82471									
E:0.0 Позеленено:29.12.2015 00:00:09									
Rack 1									
5L1	-4.5	5L2	0.3	5L3	0.1	5L4	0.0		
-3920.6	▼	5860.4	▼	11029.6	▼	0.6	▼		
5L5	0.0	5L6	0.2	5L7	0.2	5L8	0.1		
-1.0		-1.1	▲	-1.0	▲	-0.8	▲		
Rack 2									
5KL2X	-0.0	5KL3Z	1.0	5L9	0.4	5L10	0.0		
-2.7	▼	-3.2	▼	-0.6	▲	-1.5	▲		
Test1	0.0	Test2	0.0	Test3	0.0	Test4	0.0		
-1299.8	▼	-1398.5	▼	11683.4	▼	4064.3	▼		
Rack 3									
6L-1	0.3	6L-2	0.0	6L-3	0.2	6L-4	0.2		
-7465.0	▼	10836.8	▼	-5778.1	▼	-429.5	▼		
6L-5	0.3	6KZL-1	0.3	6KXL-2	0.2	6KZL-3	0.1		
-6478.1	▼	10.1	▼	0.7	▼	-0.8	▼		
Rack 4									
6L-6	-0.5	6L-7	-0.2	6L-8	-0.1	6L-9	0.3		
-3726.9	▼	-1112.3	▼	2353.3	▼	2226.0	▼		
6L-20	0.1	6L-21	0.4	6L-32	-0.1	6L-33	-0.2		
2342.6	▼	2203.3	▼	2209.2	▼	2376.9	▼		
Rack 5									
6L-42	0.3	6L-43	-0.9	6L-51	0.1	6L-52	0.3		
2134.4	▼	2552.4	▼	-2512.1	▼	2372.5	▼		
6L-53	0.2	6L-54	-0.1	6L-Test7	0.5	6L-Test8	-0.3		
-5428.9	▼	-2527.3	▼	-2.2	▲	-2.5	▲		
Rack 6									
Таймер: 45:41									

Рисунок 3. Стабильность работы источников питания.

Рисунок 4. Упрощенная схема генератора запускающих импульсов Инжекционного комплекса.

4 Разработка программного комплекса для обеспечения взаимодействия с потребителями электронного и позитронного пучков

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).

На рис. 5 приведён пример параметров ИК ВЭПП-5 во время настройки и работы комплекса на коллайдере ВЭПП-2000.

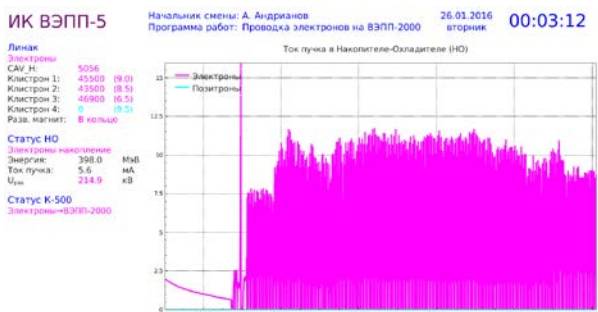


Рисунок 5. Ток электронов в накопителе-охладителе во время рабочего цикла (на графике можно видеть: 18:30 – 19:20 – подготовка к работе, 19:20 – 19:30 – настройка режимов транспортировки частиц, 19:30 – 24:00 – работа на ускорительный комплекс ВЭПП-2000).

Заключение

В 2015 году благодаря усилиям команды ВЭПП-5 и сотрудников ИЯФ СО РАН Инжекционный комплекс был торжественно запущен в эксплуатацию (рис. 6). Пучки частиц успешно доставляются до действующих в ИЯФ СО РАН коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Предстоит дальнейшая работа по совершенствованию систем Инжекционного комплекса и настройке всех режимов совместной эффективной работы, рассчитанной на долгосрочную перспективу.



Рисунок 6. Торжественное открытие Инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН 18.12.2015. (Слева направо: Мэр г. Новосибирск А.Е. Локоть, Губернатор Новосибирской Области В.Ф. Городецкий, Руководитель ФАНО России М.М. Котюков и Директор ИЯФ СО РАН, чл.-корр. РАН П.В. Логачёв)

Список использованных источников

- [1] Gambaryan V., Starostenko A. FAST KICKER. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015. С. 1001-1003.
- [2] Dmitry Bolkhovityanov, Pavel Cheblakov, Fedor Emanov. CXv4, A MODULAR CONTROL SYSTEM. Proceedings of ICALEPCS2015, Melbourne, Australia. 2015
- [3] А.А. Старостенко, П.В. Логачев, О.И. Мешков, Д.А. Никифоров, А.В. Андрианов, А.Е. Левичев, Ф.А. Еманов., К.В. Астрелина, М.Ф. Блинов, А.С. Цыганов, Д.Е. Беркаев, И.А. Кооп, Д.Ю. Болховитянов, В.Л. Дорохов. СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ИЯФ. XI Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева. 7 - 11 сентября 2015, Алушта, Россия.

№ 15.4.3 Исследование новых методов ускорения заряженных частиц

Введение

Есть три направления развития плазменных методов ускорения. Эти направления различаются типом драйвера, то есть объекта, создающего в плазме ленгмюровскую волну большой амплитуды, способную ускорять заряженные частицы. В качестве драйвера может использоваться короткий лазерный импульс, лептонный пучок (электронный или позитронный) или протонный пучок. По всем трем направлениям в течение 2015 года было достигнуто существенное продвижение. Моделирование захвата электронов в слабонелинейную кильватерную волну при их сторонней инжекции относится к протонному направлению и ориентировано на эксперименты в ЦЕРН (Швейцария), проводимые международной коллаборацией. Разработка теории прохождения мощного лазерного импульса по узкому металлическому капилляру относится к лазерному направлению и ориентировано на эксперименты в Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск). Оптимизация электронно-оптической системы для экстремальной фокусировки пучка с учетом экспериментально полученных параметров пучка и разработка диагностики электронного пучка на входе в плазменную секцию относятся к лазерному направлению и ориентированы на эксперименты в Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск).

1 Моделирование захвата электронов в слабонелинейную кильватерную волну при их сторонней инжекции

Задача о захвате электронов в слабонелинейную кильватерную волну возникла в рамках сотрудничества с ЦЕРН (проект AWAKE по плазменному кильватерному ускорению частиц с протонным драйвером). Проблема состоит в том, что на концах плазменной секции есть отверстия, через которые плазма вытекает в прилегающие буферные объемы. Точнее, вытекает газ, из которого ионизирующий лазер делает плазму как внутри, так и снаружи плазменной секции. Образуется переходная область с плавным изменением плотности плазмы. Из-за малого диаметра отверстий плотность плазмы быстро падает снаружи, однако ее достаточно для того, чтобы протон-

ный пучок возбудил в ней кильватерную волну. Эта волна всегда дефокусирует те электроны, которые предполагается ускорять (Рис.1). Амплитуда дефокусирующей силы примерно постоянна в широком (почти четыре порядка) интервале плотностей плазмы, от $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до номинального значения $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, которое достигается внутри плазменной секции. Длина переходной области составляет 15 см, и ее достаточно, чтобы сообщить инжектированным электронам поперечный импульс масштаба 0.5 МэВ/с и сделать невозможным их последующий захват в плазменную волну.

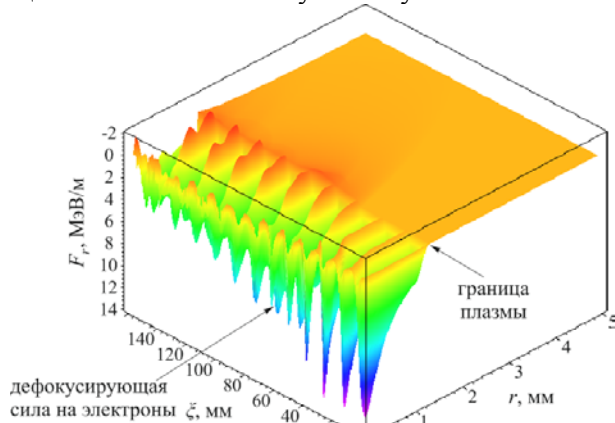


Рисунок 1. Радиальная сила, действующая на релятивистские электроны в плазме плотности $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Ионизирующий лазерный импульс находится при $\xi = z - ct = 0$. Вертикальная ось инвертирована для лучшей видимости поверхности.

К счастью, область дефокусировки не распространяется за пределы плазменного столба (Рис.1). Электроны, которые проходят переходную область по неионизованному газу, двигаются свободно или даже получают небольшую фокусирующую добавку к импульсу. Потери электронов на входе можно избежать с помощью наклонной инжекции (Рис.2). В этой схеме электроны приближаются к оси там, где плотность плазмы уже вышла на константу, и возможен захват. Численным моделированием [1,2] были найдены оптимальные параметры наклонной инжекции: задержка электронного сгустка $\xi_e = 11.5 \text{ см}$, угол инжекции $\alpha_i = 2.8 \text{ мрад}$, точка фокусировки $z_f = 140 \text{ см}$.

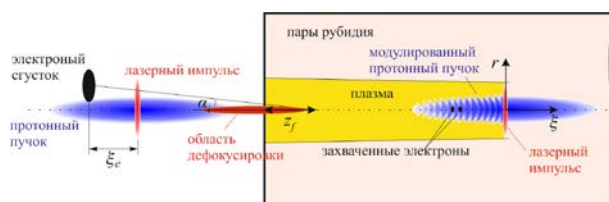


Рисунок 2. Схема наклонной инжекции.

Область хорошего захвата весьма широка в пространстве параметров инжекции по сравнению с размерами электронного пучка (Рис.3), поэтому не требуется точно попадать в оптимальные значения. Как видно из рисунка, электроны, инжектированные строго по оси, не захватываются вообще.

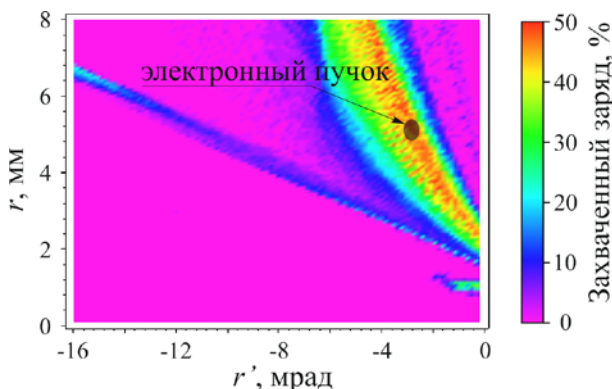


Рисунок 3. Акцептанс кильватерной волны. Цветом показана доля электронного заряда, которая вошла в буферный объем (при $z=-40$ см) на радиусе r под углом r' , захватилась в волну и ускорилась до энергии более 1 ГэВ. Затемненная область показывает электронный пучок при оптимальных параметрах инжекции.

2 Разработка теории прохождения мощного лазерного импульса по узкому металлическому капилляру

При исследованиях прохождения мощного лазерного импульса по узкому металлическому капилляру (в Институте лазерной физики СО РАН) наблюдалось существенное падение коэффициента пропускания за характерное количество импульсов от нескольких сотен до нескольких тысяч, зависящее от их энергии на входе волновода. При анализе состояния поверхностей волновода после прохождения серии импульсов обнаружен эффект «зарастания каналов», приводящий к падению пропускания волноводов [3].

Для объяснения эффекта «зарастания канала» предложена модель [4,5], описывающая изменение радиуса капилляра, связанное с перераспределением внутри него вещества, мгновенно испаренного проходящим излучением. Роль лазерного импульса сводится к мгновенному локальному нагреву стенок капилляра и испарению некоторого количества вещества. В модели учитывается изменение профиля энерговыделения по длине при изменении радиуса волновода и перераспределение вещества внутри капилляра в предположении,

что количество испаренного вещества пропорционально локально поглощенной погонной мощности.

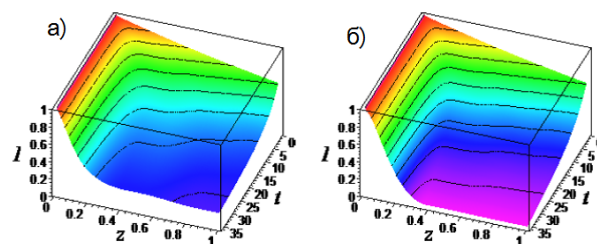


Рисунок 4. Качественная зависимость проходящей по капилляру мощности излучения I от времени t и продольной координаты z для двух способов усреднения.

В случае капилляра, закрытого с торцов и остывающего медленно, давление газа выравнивалось бы вдоль капилляра, и количество осевшего вещества было бы пропорционально сечению в этом месте. В случае открытого капилляра, выравнивания давлений не происходит. В модели, предполагающей, что продольный профиль давления не успевает полностью выравниваться, а сглаживается только на коротких отрезках с некоторым характерным размером, канал не перекрывается полностью даже при больших временах воздействия. Интенсивность прошедшего сквозь капилляр излучения падает с появлением узкой области (Рис.4а), но не до нуля. Это связано с предположением одновременности остывания капилляра во всех сечениях. В действительности же, узкие области должны остывать быстрее и вещество из широких областей должно свободно в них проникать и осаждаться на стенках. Такому распространению вещества соответствует другой закон усреднения, пропорциональный только локальному энерговыделению. В этом случае с течением времени канал полностью перекрывается (Рис.4б). Подобная картина качественно согласуется с полученными экспериментальными данными.

3 Оптимизация электронно-оптической системы для экстремальной фокусировки пучка с учетом экспериментально полученных параметров пучка

На рис 5 показана конструкция установки плазменного ускорения в ИЯФ СО РАН. Основными элементами установки являются фокусирующая система I, состоящая из четырех квадрупольных линз, и плазменная секция II.

Вид изготовленной плазменной секции показан на рисунке 6.

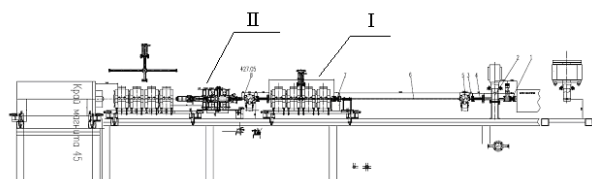


Рисунок 5. Схема конструкции установки по плазменному ускорению в ИЯФ СО РАН: I – фокусирующая система из четырех квадрупольных линз



Рисунок 6. Вид изготовленной плазменной секции во время монтажа на установке по кильватерному ускорению

Фокусирующая система необходима для поперечного сжатия пучка электронов, поступающего из кольца накопителя инжекционного комплекса ВЭПП-5, для получения неустойчивости в плазменной секции. Измеренный продольный профиль пучка накопителя показан на рисунке 7. Параметры пучка перед установкой с плазменной секцией представлены в таблице 1. Результаты расчета среднеквадратичного поперечного отклонения пучка в плазменном канале с учетом уточненных начальных параметров показано на рисунке 8.

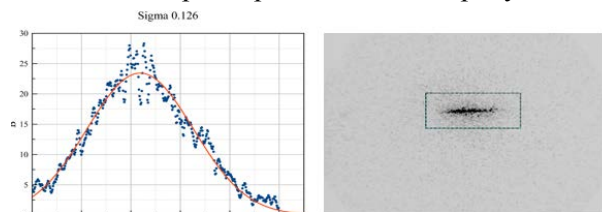


Рисунок 7. Измеренная длина одного сгустка электронов в накопителе. Время развертки стрик камеры составило 1.5 нс. Справа – изображение с люминофора стрик камеры, оцифрованное ПЗС камерой, слева – обработанное изображение развертки пучка. Длина пучка (Sigma) составила примерно 126 пикосекунд.

Таблица 1. Параметры пучка перед установкой кильватерного ускорения

Параметры	Значения
Горизонтальный эмиттанс	23 нм*рад
Вертикальный эмиттанс	5 нм*рад
Горизонтальная бета-функция	12.4529 м
Вертикальная бета-функция	19.8101 м
Горизонтальная альфа-функция	-1.67534
Вертикальная альфа-функция	-8.31531
Горизонтальный среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.535 мм
Вертикальный среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.3147 мм
Дисперсионная функция	0.002516 м
Энергетический разброс в пучке	1%
Средняя энергия электронов	400 МэВ

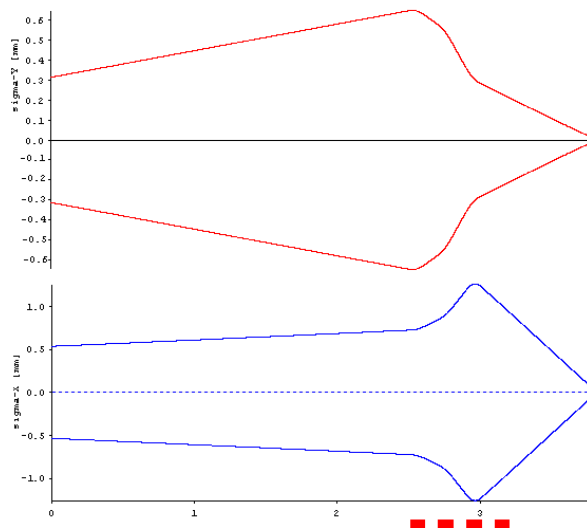


Рисунок 8. Результаты расчета среднеквадратичного поперечного отклонения пучка в плазменном канале с учетом уточненных начальных параметров

В результате моделирования удалось достигнуть параметры пучка в плазменной секции, представленные в таблице 2. При этом необходимые жесткости линз составили (нумерация линз по ходу пучка):

$$\begin{aligned}
 K1 &= -9.95809 \text{ 1/м}^2 \\
 K2 &= -14.1216 \text{ 1/м}^2 \\
 K3 &= 28.83442 \text{ 1/м}^2 \\
 K4 &= 0.3299651 \text{ 1/м}^2
 \end{aligned}$$

Таблица 2. Выходные параметры пучка

Параметры	Значения
Горизонтальный эмиттанс	23 нм*рад
Вертикальный эмиттанс	5 нм*рад
Горизонтальная бета-функция	0.00996387 м
Вертикальная бета-функция	0.0409695 м
Горизонтальная альфа-функция	0
Вертикальная альфа-функция	0
Горизонтальный среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.015 мм
Вертикальный среднеквадратичный поперечный размер пучка	0.014 мм
Дисперсионная функция	-0.000128592 м
Энергетический разброс в пучке	1%
Средняя энергия электронов	400 МэВ

4 Разработка и изготовление диагностики электронного пучка на входе в плазменную секцию

Для диагностики пучка в плазменной секции планируется использовать переходное излучение, возникающее при прохождении пучка заряженных частиц через фольгу. По пятну переходного излучения можно измерять поперечный профиль сфокусированного пучка. Для этих целей был разработан специальный вакуумный узел, который располагается на входе в плазменную секцию, как показано на рисунке 9 под номером 1.

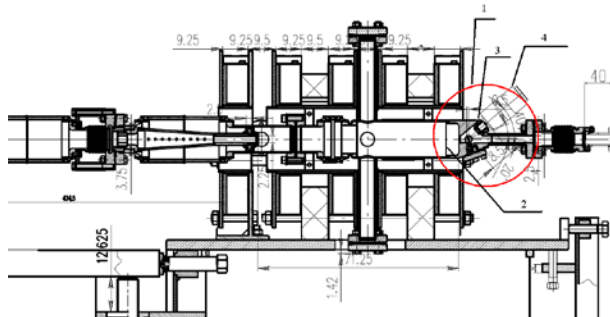


Рисунок 9. Плазменная секция с системой диагностики пучка

В данном узле имеются следующие основные элементы: 2 - алюминиевая фольга, через которую пролетает пучок, 3 - вакуумный фланец со стеклянным окошком, к которому крепится система визуального наблюдения 4.

Описанное устройство было изготовлено и показано на рисунке 10.



Рисунок 10. Изготовленный узел диагностики пучка

В настоящий момент вся система монтируется в зале III инъекционного комплекса ВЭПП-5 для начала работы с пучком.

Список использованных источников

- [1] K. V. Lotov, I. V. Timofeev, E. A. Mesyats, A. V. Snytnikov, and V. A. Vshivkov, Note on quantitatively correct simulations of the kinetic beam-plasma instability. *Phys. Plasmas*, 22, 024502 (2015).
- [2] П.В.Туев, Влияние неоднородности плотности плазмы на захват электронов кильватерной волной в эксперименте AWAKE. Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015, с. 21.
- [3] K. V. Lotov, K. V. Gubin, V. E. Leshchenko, V. I. Trunov, and E. V. Pestryakov, Guiding femtosecond high-intensity high-contrast laser pulses by copper capillaries. *Physics of Plasmas* 22, 103111 (2015).
- [4] Р.И.Спицын, Эволюция лазерного импульса в рамках квазистатической модели плазменного кильватерного ускорителя. Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015, с. 20.
- [5] К.В.Губин, В.И.Трунов, В.Е.Лещенко, К.В.Лотов, Е.В.Пестряков, Распространение мощного фемтосекундного лазерного излучения в капиллярном металлическом волноводе. Материалы 6-й всероссийской конференции "Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине" (Новосибирск, 2015), т.1, с.79-83.

№ 15.5.1 Разработка протонных и ионных ускорителей для научных, технологических, медико-биологических исследований и терапии рака

Введение

Электронные и ионные пучки, генерируемые ускорителями заряженных частиц, востребованы как для фундаментальных исследований, так и для технологических применений. Особенно важным направлением является развитие ускорительных технологий для медико-биологических исследований и лечение онкологии ионными пучками.

В ИЯФ, в этой области, ведутся исследования по двум направлениям:

- 1) Разработка терапевтического ускорителя протонов и ионов углерода с электронным охлаждением
- 2) Развитие Ускорительного Масс Спектрометра и создание стенда подготовки биомедицинских образцов для исследования фармакинетики лекарственных препаратов и диагностики заболеваний.

Ионные пучки с использованием электронного охлаждения впервые были продемонстрированы в ИЯФ в 1974г. Научный задел, накопленный в ИЯФ по установкам для охлаждения ионных пучков, позволяет создавать системы охлаждения на высоком научно технологическом уровне. Были созданы установки охлаждения для Германии, Китая, Швейцарии. Углеродный пучок, накопленный с помощью электронного охлаждения и затем ускоренный, используется для лечения пациентов в Институте Современной Физики Ланджоу, Китай. Опыт создания этого ускорителя можно воплотить в проект терапевтического ускорителя.

В ИЯФ создан первый в России УМС и в настоящее время проводятся рутинные датировки археологических образцов. Освоение методов УМС для биомедицинских применений открывает широкие возможности для исследований.

1 Исследование комбинации ионного ускорителя с электронным охлаждением и современных сертифицированных методов облучения

В рамках развития проекта ионного синхротрона с электронным охлаждением для терапии рака, исследовались особенности соот-

ветствия выпускаемого пучка и современных сертифицированных методов облучения [1-3]. В проектируемом синхротроне удалось совместить несколько схем выпуска, обеспечивающие, 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 рекомбинации, и порционный выпуск. В то же время, параметры пучков, выпускаемых с применением стандартных схем, при наличии электронного охлаждения, значительно улучшаются. Увеличивается стабильность выпущенного тока, растет качество терапевтического пучка. Все это, с одной стороны, удовлетворяет требованиям современных сертифицированных методов облучения, а с другой стороны, позволяет, после экспериментального подтверждения, подготовить новые прорывные протоколы облучения.

2 Исследование прототипа дипольного магнита бустерного синхротрона

В 2015 году завершено исследование прототипа дипольного магнита быстроциклирующего бустерного синхротрона. Особенностью бустерного диполя является наличие знакопеременной (FDF) структуры градиента магнитного поля. На заключительной стадии определялась оптимальная форма торцевой фаски.



Рисунок 1. Наборная торцевая фаска прототипа.

Торцевая фаска прототипа выполнена в виде набора подвижных шимов, изготовленных из стали, аналогичной используемой при изготовлении сердечника. Торцевая фаска подбиралась для устранения ошибки интеграла магнитного поля и ошибки интеграла градиента

магнитного поля. При производстве серийных магнитов фаска на сердечнике будет изготавливаться в соответствии с полученным образцом.

3 Создание прототипа электростатического септума бустерного синхротрона

Изготовлен прототип впускного электростатического септума бустерного синхротрона. Отличительной особенностью септума является то, что он, также является электростатическим поворотом. Таким образом отпадает необходимость в магнитном септуме, экономится место, достигается компактность установки.

Септум представляет из себя искривленный, в соответствии с орбитой поворачиваемого пучка, электростатический поворот. Заземленный электрод одним краем равномерно утоньшается и формирует тонкий нож септума. Толщина ножа 0.1 мм.

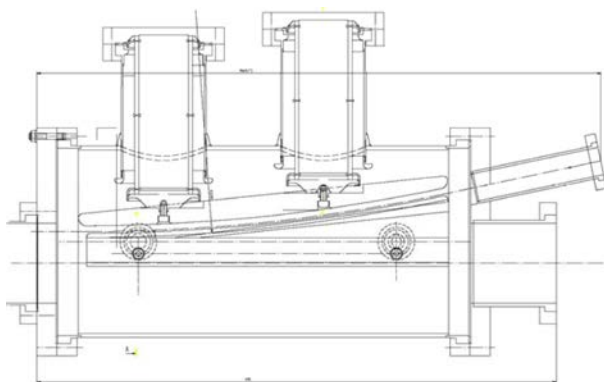


Рисунок 2. Сечение септума.



Рисунок 3. Вакуумный объем септума

4 Исследование многозарядного ионного источника для ускорительного масс-спектрометра

В 2015 году, проводилась оптимизация параметров работы ионного источника в режи-

ме стационарного стенда. Работы включали в себя, оптимизацию подачи паров цезия, нагрева ионизатора, формирования электростатических полей для распыления образца, и формирования пучка отрицательных ионов.

На Рис.2. приводится пример измерения спектра отрицательных ионов при распылении графита МПГ.

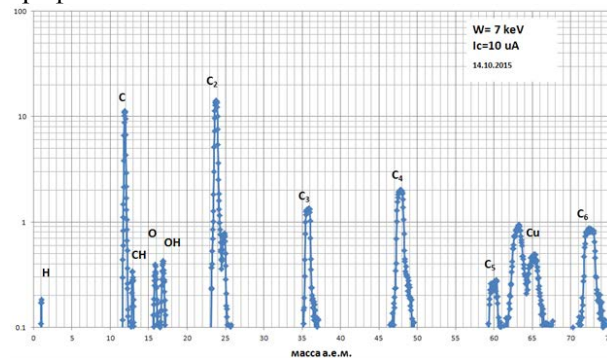


Рисунок 4. Спектр отрицательных ионов при распылении графита МПГ.

Спектр отрицательных ионов на выходе стенда ионного источника состоит, в основном, из углеродных кластеров. Новый стенд ионного источника позволяет хорошо разделять атомарные и молекулярные ионы, при этом величина атомарного пучка отрицательных ионов углерода достигает 10 мкА для 7 кэВ энергии пучка. Следует отметить высокую стабильность работы ионного источника, в режиме распыления стационарного образца, без резких «скачков» тока углерода. Долговременная стабильность тока достигается за счет регулирования температуры печи с цезием.

Экспериментальные исследования образцов биоматериалов на ускорительном масс-спектрометре

В 2015 году, по программе биомедицинских исследований, был проведен УМС-анализ более 1000 образцов. Это стало возможным, благодаря модернизации УМС ИЯФ [4], 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 составляет 4 часа для барабана с 23 образцами, измерение одного оборота барабана – около 20 минут.

На Рис.5 приводится типичный пример набора статистики ионов радиоуглерода при УМС-анализе.

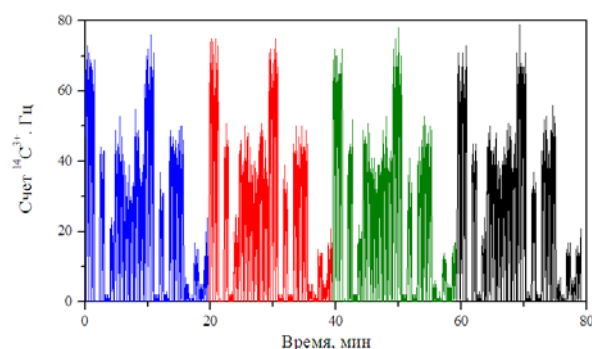


Рисунок 5. Набор статистики ионов радиоуглерода, для биомедицинских исследований.

Биомедицинские исследования проводились совместно с биологами НГУ. Работы включали в себя первые уреазные дыхательные тесты по определению содержания бактерии *Helicobacter pylori* на добровольцах, исследование проникновения органических аэрозолей в органы лабораторных мышей, при дыхании, в естественных условиях, изучение природного содержания радиоуглерода в органических материалах и др.

Заключение

В 2015 году активно продолжались исследовательские работы по теме «Разработка протонных и ионных ускорителей для научных, технологических, медико-биологических исследований и терапии рака».

В рамках проекта ионного синхротрона с электронным охлаждением для терапии рака рассмотрены вопросы согласования терапевтического синхротрона нового типа с коммерчески доступными, сертифицированными системами облучения. Также закончена отработка прототипа дипольного магнита бустера, и начинаются работы с прототипом инжекционного септума бустерного синхротрона. Таким образом критические элементы бустера, первой ступени терапевтического комплекса, будут полностью отработаны.

Благодаря проведенной модернизации УМС ИЯФ, позволившей увеличить скорость набора статистики по ионам радиоуглерода, значительно повысилась скорость обработки биомедицинских образцов. Освоенное направление вызывает большой интерес ученых из смежных и других областей.

Список использованных источников

[1] W. Schlegel, T. Bortfeld, A.-L. Grosu (Eds), NEW TECHNOLOGIES IN RADIATION ONCOLOGY, 2006.

- [2] G. Kraft, Tumortherapy with Ion Beams, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICAL RESEARCHES, A454:725(1) (2000).
- [3] K. Peach, Novel technologies in radiation therapy, PROCEEDINGS OF PHYSICS FOR HEALTH IN EUROPE WORKSHOP, CERN, 2010.
- [4] В.В. Пархомчук и др. Ускорительный масс-спектрометр СО РАН. ЖТФ, 2009, том 79, вып. 9.

№ 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 не-

обходимым 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 использования 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.

Следует отметить, что один из крупнейших российских проектов - НИКА (ОИЯИ, г. Дубна), посвящен исследованию в области горячей и плотной барионной материи — состояния, в котором она пребывала вскоре после Большого взрыва. Для получения ионных пучков, которые позволят осуществить данную научную программу необходимо электронное охлаждение, обеспечивающие малый размер пучков и высокую плотность материи.

1 Разработка стенда для проверки основных элементов установки электронного охлаждения на 4-8 МэВ.

Максимальная энергия электронов, в большинстве электронных охладителей, составляет 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 “незамагнитенной” (отсутствие сильного продольного поля) оптики пучка. Эксперименты с внутренней мишенью 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 отработки критических элементов конструкции разработан технический проект стенда для испытаний высоковольтного модуля электронного охлаждения на 4-8 МэВ (рис. 1). Наиболее существенными элементами в нем, являются прототипы магнитного соленоида

рис. 2 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 высоковольтных блоках, предназначенных для электронно-лучевой сварки [1], которые были разработаны и испытаны в ИЯФ СО РАН. Отработка данных элементов будет продолжена в следующем году.

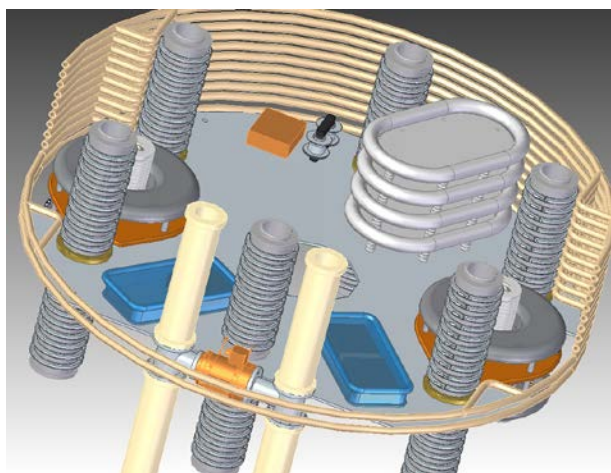


Рисунок 1. Проект стенда для проверки основных элементов установки электронного охлаждения на 4-8 МэВ.

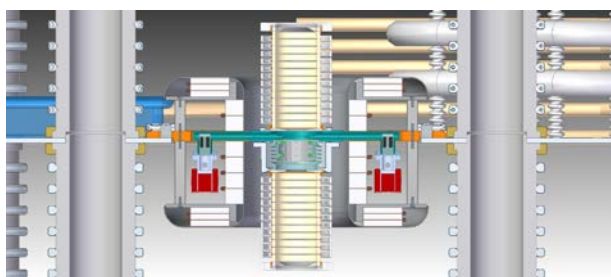


Рисунок 2. Проект магнитного элемента оптического тракта канала ускорения для установки электронного охлаждения на 4-8 МэВ.

2 Расчет основных технических параметров, распределение магнитных и электрических полей в одной секции установки электронного охлаждения.

В системах электронного охлаждения в большинстве случаев используется сильное сопровождающее магнитное поле. Для его создания в электростатическом ускорителе прямого действия на 4-8 МэВ планируется использование системы из 4 соленоидов и двух магнитных полюсов (рис. 2) для формирования заданного

профиля магнитного поля. Данный магнитный элемент установлен на несущей платформе и имеет один источник питания в виде пневмогенератора, который способен работать, не имея электрической связи с земляным потенциалом. При проектировании магнитного элемента необходимо учесть следующие разнородные требования. С одной стороны, необходимо увеличить зазор между поверхностями соседних соленоидов для уменьшения напряженности магнитного поля и увеличения электростатической прочности данного промежутка. С другой стороны, необходимо уменьшить вариации магнитного поля с целью улучшения качества оптики пучка. Одновременно с этим необходимо следить, чтобы потребляемая магнитным элементом мощность оставалась на достаточно низком уровне (не более 1.5 кВт на один элемент). Полученная в результате нескольких итераций система обладает свойствами, изображенными на рисунке 3. Вариации магнитного поля значительно меньше 10 %, напряженность электрического поля не превышает значения 40 кВ.

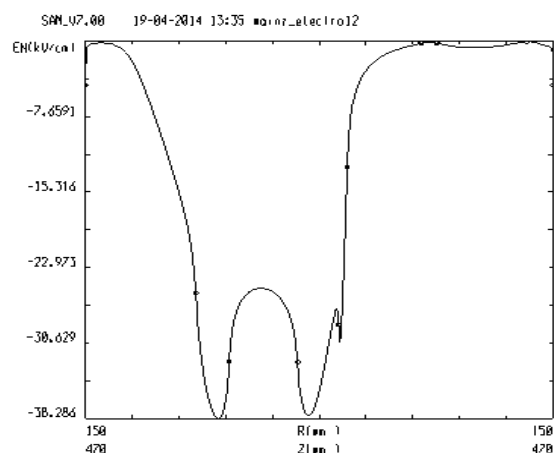
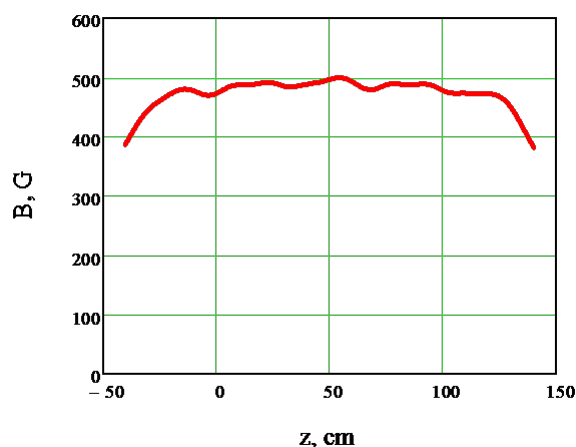


Рисунок 3. Распределение магнитного поля вдоль ускорительного канала установки электронного охлаждения (слево). Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности одного из соленоидов (справа).

3 Выбор метода передачи энергии для установок электронного охлаждения к электронным модулям, расположенным под высоким потенциалом.

Одно из предложений для передачи энергии под высокий потенциал для установок электронного охлаждения мегавольтного диапазона основывается на использовании сжатого газа в качестве переносчика энергии. Механические устройства, использующие энергию сжатого газа, широко распространены в промышленности, что дает возможность использования коммерчески доступных элементов, таких как компрессора большой мощности, генераторы, элементы транспортных каналов, измерительное оборудование и др. По сравнению с использованием вала [2] сильно упрощается система подвода энергии к конкретной секции, которую можно сделать гибкими шлангами и исчезают жесткие требования на точность крепления электрогенератора в секции. Улучшается ситуация с механическими вибрациями, так как скорость вращения пневматической турбины может быть достаточно велика и отсутствует механическая связь между секциями. В рамках данного проекта прототип турбины был разработан и изготовлен немецкой фирмой DEPRAG на мощность 5 кВт, которая в настоящее время проходит цикл испытаний в немецком университете г. Майнц [3]. Аналогичная турбина, но на существенно меньшую мощность (200-500 Вт) была разработана и успешно эксплуатируется на установке "Ускорительный масс спектрометр СО РАН" [4] (рис. 4).

4 Развитие новых подходов к реализации электронного охлаждения на высокой энергии

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. Планируемая установка электронного охлаждения на энергию до 2.5 МэВ (рис. 5) позволит получить требуемое качество ионных пучков для проведения уникальных экспериментов. Данная система электронного охлаждения будет первой в

мире, в которой будет производиться одновременное охлаждение встречных пучков в коллайдере.

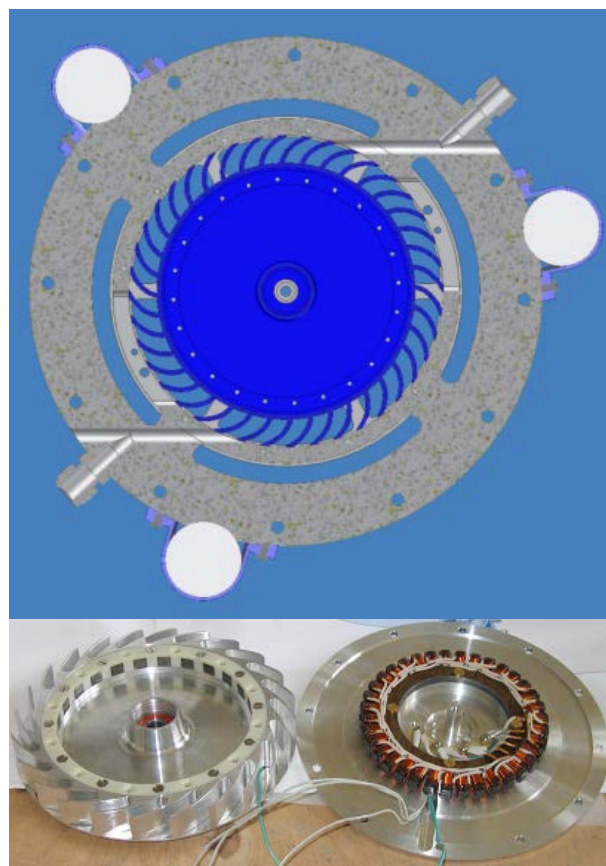


Рисунок 4. Конструкция и фотография пневмогенератора, изготовленного в ИЯФ СО РАН

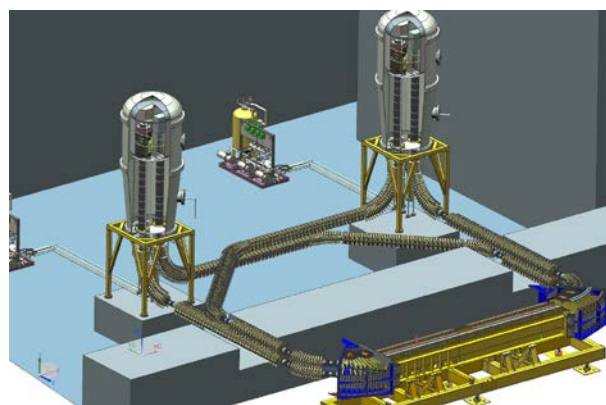


Рисунок 5. Эскиз проекта установки электронного охлаждения для ускорительного комплекса НИКА.

Список использованных источников

- [1] Senkov D.V., Gusev I.A., et al. High-voltage source with output voltage up to 60 kV with power up to 15 kW // Proc. of RUPAC, Novosibirsk, 2006, p.301-303.
- [2] 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://ss.fnal.gov/archive/test-tm/2000/fermilab-tm-2319-ad.pdf>.
- [3] A.Hofmann, K.Aulenbacher, M.W.Bruker, J.Dietrich, W.Weilbach (Helmholtz-Institut, Germany), M.I.Bryzgunov, A.P.Denisov, V.Panasyuk, V.V.Parkhomchuk, V.B.Reva (BINP SB RAS, Russia). Turbo generators for powering HV-solenoids at the HESR electron cooler. Proceedings of IPAC 2014 (5th International Particle Accelerator Conference), Dresden, Germany, June 15-20 2014, MOPME051, p. 492-494, ISBN 978-3-95450-132-8.
- [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] E.V. Ahmanova, A.G., Kobets, I.N. Meshkov, et al. Electron cooler for the NICA collider. Proceedings of COOL 2013 Murren, Switherland, June 10-14 2013, WEPP008, p. 113-115, ISBN 978-3-95450-140-3.

№ 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 ЭЛВ 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, Япония и Китай выпускают собственные ускорители аналогичного класса, но стоимость их существенно выше. 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.

В 2015г. был произведен монтаж ускорителя ИЛУ-8 в ОАО ОКБ КП, г. Мытищи. Этот ускоритель предназначен для радиационной обработки проводов и кабелей.

В 2015г. был произведен монтаж ускорителя ИЛУ-10М в Институте ядерной физики, г. Алма-Ата, Казахстан.

В 2015г. был подписан контракт на поставку второго ускорителя ИЛУ-8 в ОАО «Завод Чувашкабель», г. Чебоксары, для обработки кабельной продукции. Начато изготовление ускорителя.

1 Разработка и изготовление новой системы управления ускорителем ИЛУ-6

В 2014 году был разработан проект новой системы управления на основе модулей CompactRio, определен набор модулей. Были приобретены все запланированные комплектующие. Новая система управления ускорителем ИЛУ-6 обеспечивающая полную замену элек-

тронных блоков старой системы управления была собрана в макетном варианте для предварительной наладки без подключения к ускорителю. Система управления собрана на модулях серии CompactRio производства National Instruments, она имеет 110 каналов ввода/вывода. Для управления ускорителем задействованы 58 каналов ввода/вывода.

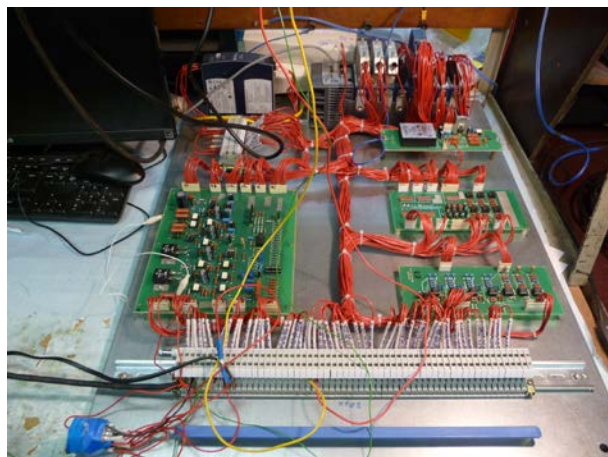


Рисунок 1. Новая система управления ускорителем ИЛУ-6 подготовленная для наладки и проведения испытаний.

На рис. 1 показана новая система управления, подготовленная для наладки и проведения испытаний.

Для работы с новой системой управления была произведена модернизация системы питания работающего ускорителя ИЛУ-6, были установлены новые шкафы для размещения элементов и блоков системы управления, произведена модернизация некоторых узлов. Наладочные работы завершены и ускоритель запущен в работу с модернизированной системой питания к которой можно будет подключить новую систему управления.

2 Разработка и отладка программы управления ускорителем ИЛУ-6 для новой системы управления

Были разработаны 2 варианта прототипа программы управления для последующей проверки и отработки вначале на компьютере и подключенной макетной системе, а потом и на работающем ускорителе ИЛУ-6.

3 Разработка проекта новой системы развертки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10

Были изготовлены прототипы основных элементов системы выпуска электронного пуч-

ка для ускорителя ИЛУ-10: сканирующего электромагнита, электромагнита коррекции сканирующего поля и доворотных электромагнитов (линзы Пановского). Были сняты реальные распределения магнитных полей изготовленных прототипов и сопоставлены с расчетными распределениями. На рис.2 приведена фотография изготовленного прототипа сканирующего электромагнита.



Рисунок 2. Фотография прототипа сканирующего электромагнита.

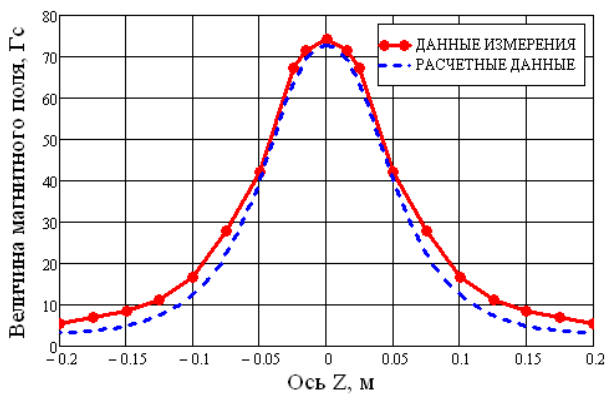


Рисунок 3. Графики расчетного и измеренного распределений магнитного поля прототипа сканирующего электромагнита (здесь 0 означает среднюю плоскость электромагнита поперек оси Z).

На рис. 3 приведено сравнение реального распределения напряжённости магнитного поля в прототипе сканирующего электромагнита вдоль направления движения пучка (ось Z) и результатов численного моделирования с использованием программы «Megmaid», видно хорошее совпадение результатов. В ходе эксперимента катушки электромагнита были запитаны постоянным током величиной 10А (это же значение использовалось в расчетах). При больших токах питания (до 150 А) можно получить необходимое для сканирования пучка максимальное значение напряжённости магнитного поля 1 кГс.

Те же измерения и сравнение их результатов с расчетными данными были проделаны для прототипа электромагнита коррекции. На рис. 4 видно, что оба распределения (экспериментальные данные и результаты численного моделирования) совпадают, максимальное значение напряжённости поля равно 60 Гс. При больших токах питания можно получить значение напряжённости магнитного поля до 200 Гс, обеспечивающее необходимую равномерность плотности тока пучка вдоль выпускного окна ускорителя.

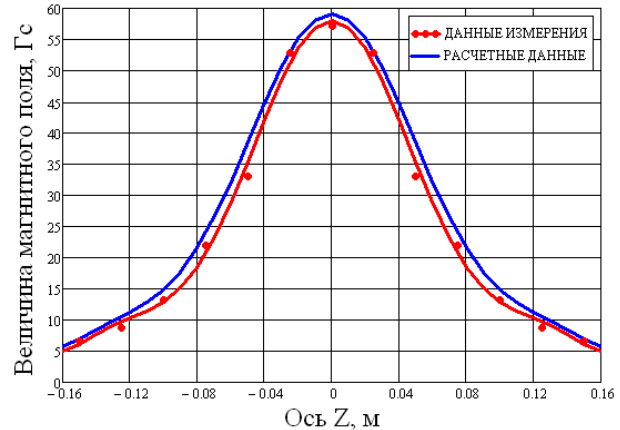


Рисунок 4. Графики измеренного и расчетного распределений магнитного поля прототипа сканирующего электромагнита (здесь 0 означает среднюю плоскость электромагнита поперек оси Z).

После этого было снято распределение магнитного поля между пластинами прототипа доворотного электромагнита (линзы Пановского) по направлению движения пучка в электронно-оптическом тракте (ось Z) на расстоянии 20 см от центра пластин (поле в центре пластин равно 0). Рис. 5 показывает, что оба распределения имеют примерно одинаковое максимальное значение напряжённости поля около 200 Гс.

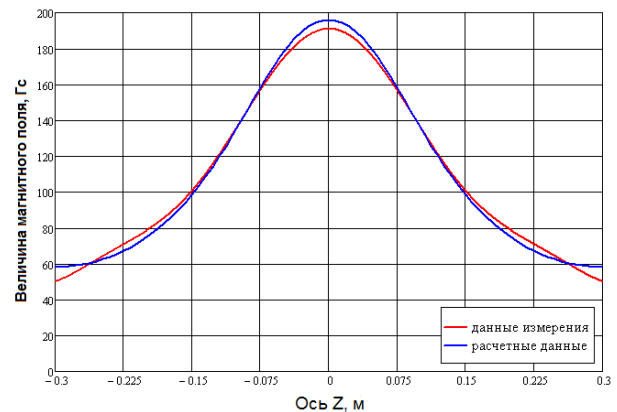


Рисунок 5. Графики измеренного и расчетного распределений поля направляющего магнита (здесь 0 означает среднюю плоскость электромагнита поперек оси Z).

Необходимо добавить, что максимальная измеренная напряжённость магнитного поля (на краях пластин линзы) составляет величину около 500 Гс. Это значение соответствует градиенту магнитного поля 1 кГс/м, достаточному для такого доворота пучка, чтобы траектории электронов проходили вертикально через выпускное окно, обеспечивая также вертикальное падение электронного пучка на обрабатываемые изделия.

4 Моделирование проводки пучка в выпускном устройстве для ускорителя ИЛУ-10

Моделирование проводки пучка в выпускном устройстве ускорителя ИЛУ-10 проводилось в рамках работы по расчёту магнитной отклоняющей системы с целью определения параметров поля отклоняющих и корректирующих электромагнитов.

5 Испытания ускорителя ЭЛВ с энергией 0,6 МэВ и током 25мА

Подготовлен и испытан на экспериментальном стенде ускоритель, разработанный и изготовленный на предыдущем этапе работы, предназначенный для радиационного модифицирования резинотехнических изделий. Особенности этого ускорителя является повышенная равномерность дозы облучения и то, что он разработан в локальной защите. Равномерность дозы $\pm 5\%$ достигнута за счет изменения формы тока продольного сканирующего магнита.

6 Исследование факторов, влияющих на параметры пучка ускорителя для экспериментов по быстрой томографии

Основными факторами, влияющими на параметры пучка ускорителя, используемого для генерации гамма-излучения в быстрой томографии, являются пульсации энергии и пульсации тока.

Пульсации энергии приводят как к нежелательным флуктуациям положения и размера пучка, так и к модуляции интенсивности рентгеновского излучения. В конечном итоге это снижает разрешающую способность и делает невозможным обнаружение таких слабоконтрастных объектов, как, например, пластиковые включения и пустоты.

Для уменьшения пульсаций напряжения использовалась схема с (схема с последовательно-параллельным соединением выпрямительных секций) увеличенной емкостью вы-

прямительной колонны, что позволило ограничить пульсации на уровне 6%. Увеличение фильтрующей емкости на входе преобразователя частоты позволило еще уменьшить пульсации энергии до $\pm 5\%$ при токе пучка 100 мА, на энергии 1 МэВ. $C_{\phi} = 4130$ мкФ.

Электрическое поле на катоде имеет переменную составляющую из-за пульсаций энергии. Величина переменной составляющей электрического поля определяется емкостным делителем. Это приводит к возникновению аномального эффекта Шоттки. Увеличив емкость на вытягивающих зазорах (емкостной делитель) удалось снизить пульсации тока пучка до $\pm 2\%$.

Уменьшения пульсации энергии до $\pm 5\%$ и пульсаций тока до $\pm 2\%$, позволяет использовать ускорители ЭЛВ для быстрой томографии.

7 Совершенствование системы управления ускорителями ЭЛВ со сфокусированным пучком

Основными факторами, определяющими выпуск в атмосферу воздуха сфокусированного пучка электронов до 1 мм через диафрагму, является стабильность энергии и системы питания электромагнитной системы проводки пучка. С целью уменьшения пульсаций на выходе, последняя короткофокусная электромагнитная линза заменена на линзу с постоянными магнитами.

Была разработана и изготовлена линза с радиально секционированными постоянными неодимовыми магнитами марки N45SH с остаточной намагниченностью 1,32–1,38 Тл. Интеграл поля по оси линзы составляет 0,218 Тл²·см. Фокусное расстояние при энергии электронов 1,4 МэВ составляет 7 см. Результаты испытаний показали, что срок службы диафрагмы увеличивается с 2–3 месяцев до 4–5 месяцев. В настоящее время эта линза используется в составе уникальной научной установки «Экспериментальный стенд на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6 по обработке материалов концентрированным электронным пучком, выпущенным в атмосферу (Стенд ЭЛВ-6)» [1-3].

8 Исследование способов повышения электрической прочности ускорительных трубок

Для повышения прочности ускорительных трубок ускорителей серии ЭЛВ был проведён ряд исследований. Изучалось влияние на прочность трубок таких параметров как: ваку-

умные условия в трубке, попадание электронов на керамические кольца вблизи катода, развитие обменных процессов в трубке. В результате исследований было выяснено, что в трубках ускорителей серии ЭЛВ наибольшее влияние на прочность трубки оказывает развитие обменных процессов.

Для подавления обменных процессов в ускорительных трубках было предложено сформировать специальное распределение электрических полей, которое позволяет захватывать большую часть вторичных электронов, рожденных в результате попадания ионов на электроды трубки рис. 6.

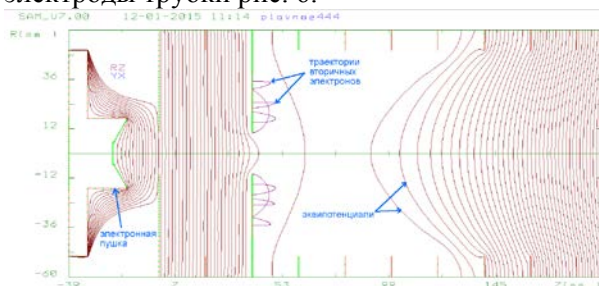


Рисунок 7. Система электродов и распределение электрических полей

позволяет захватывать большую часть вторичных электронов и подавляет обменные процессы в ускорительной трубке, приводящих к высоковольтным пробоям.

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.

9 Изучение свойств нанопорошков и их применений

Для использования в получении нанопорошков способом испарения твердых оксидов разработан метод оценки температуры испарения на основе закона Рауля для растворов с использованием данных химического элементного анализа. Сформулированы отличия в строении нанопорошков диоксида кремния получаемых способом испарения электронным пучком. Проведена модернизация опытно-промышленной установки для получения оксидов.

Для различных жидкостей с нанопорошками диоксида кремния различных размеров и способов производства показано, что применимость формулы Бэтчелора для предсказания вязкости жидкостей с микрочастицами, можно расширить на диапазон наноразмеров, если учесть взаимодействие между жидко-

стью-носителем и наночастицей. По предположению авторов, результатом этого взаимодействия является слой на поверхности наночастицы, составляющий с ней механически цельную систему. Этот результат может быть важен для предсказания свойств конструкционных композиционных полимерных материалов, модифицированных нанопорошками (наночастицами). Получены данные о существенном влиянии наночастиц на электрооптические свойства полимерно дисперсных жидких кристаллов.

Заключение

По направлению развития ускорителей типа ЭЛВ (Рук. Н.К. Куксанов) продолжались работы по следующим направлениям.

1. Совершенствование ускорителей электронов типа ЭЛВ, это работы Гл.7. Совершенствование системы управления ускорителями ЭЛВ со сфокусированным пучком. Гл.5. Испытания ускорителя ЭЛВ с энергией 0,6 МэВ и током 25мА.
2. Создание новых модификаций ускорителей и проблемы физики ускорителей заряженных частиц, работы: Гл.6. Исследование факторов, влияющих на параметры пучка ускорителя для экспериментов по быстрой томографии. Гл.8. Исследование способов повышения электрической прочности ускорительных трубок.
3. Создания научного и научно-технического задела для развития наукоемких технологий: Гл.9. Изучение свойств нанопорошков и их применений, полученных при помощи сфокусированного пучка.

По направлению развития ускорителей типа ИЛУ (Рук. А.А. Брызгин) продолжались работы по следующим направлениям.

4. Совершенствование ускорителей электронов типа ИЛУ, это работы
5. Гл.1. Разработка и изготовление новой системы управления ускорителем ИЛУ-6.
6. Гл.2. Разработка и отладка программы управления ускорителем ИЛУ-6 для новой системы управления.
7. Гл.3. Разработка проекта новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10.
8. Гл.4. Моделирование проводки пучка в выпускном устройстве для ускорителя ИЛУ-10.

9. Создание новых модификаций ускорителей и проблемы физики ускорителей заряженных частиц, работы:
10. Гл.3. Разработка проекта новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10.

Завершено проектирование новой системы развёртки и выпуска электронного пучка для ускорителя ИЛУ-10 с учётом результатов моделирования. Проведены измерения параметров прототипов электромагнитов. Новая система находится в стадии изготовления. Она будет поставлена на ускоритель ИЛУ-10, работающий в ИЯФе.

Поставленные задачи выполнены, цели на 2015 год достигнуты.

Список использованных источников

- [1] Avilov, M., Fadeev, S., Fernandes, S., Golkovsky, M., Mittig, W., Pellemoine, F., Schein, M. A 50-kW prototype of the high-power production target for the FRIB *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Volume 305, Issue 3, pp. 817-823.
- [2] Lenivtseva, O.G., Bataev, I.A., Golkovskii, M.G., Bataev, A.A., Samoilenko, V.V., Plotnikova, N.V. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon *Applied Surface Science*, Volume 355, 2015, pp. 320-326.
- [3] Poletika, I.M., Ivanov, Y.F., Golkovskii, M.G., Krylova, T.A., Teresov, A.D., Makarov, S.A. Development of a new class of coatings by double electron-beam surfacing *Inorganic Materials: Applied Research*, Volume 2, Issue 5, 2015, pp. 531-539.
- [4] Dubrovin A.N. Mermaid manual, 1995.

№ 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 проведения 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 Исследование возможности работы ускорителя – тандема с модернизированным источником отрицательных ионов

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 (рис. 1).

Источник отрицательных ионов генерирует пучок с током до 15 мА при энергии 32 кэВ, угловая расходимость пучка $\pm 0,1$ радиана, диаметр эмиссионного отверстия 3,5 мм. Поворотный магнит крепится на общем с источником фланце, позволяющем осуществлять юстировку магнита относительно источника. При этом магнит и источник вместе могут юстироваться по азимуту относительно откачной камеры и остальных элементов тракта транспортировки пучка. Применение поворотного

магнита позволяет решить несколько задач: отделить пучок ионов от потока сопутствующих частиц – электронов, потока паров цезия; осуществить фокусировку сильно расходящегося пучка максимально близко к ионному источнику, пока поперечные размеры пучка невелики; направить пучок на ось инжекции.

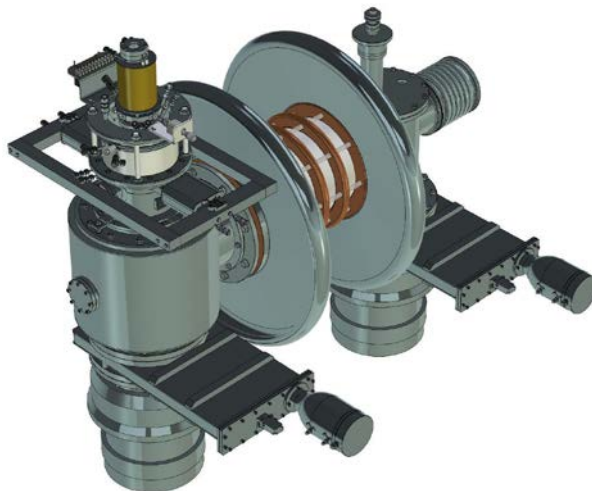


Рисунок 1. Концептуальная схема инжектора, тракта транспортировки пучка с предускорением.

Откачная камера содержит охлаждаемые жалюзи, предназначенные для осаждения паров цезия и недопущения их попадания в турбомолекулярный насос, установленный ниже. Для откачки используется турбомолекулярный насос с производительностью 2000 л/с по водороду, подключаемый к камере снизу через соответствующий шибер.

Пучок отрицательных ионов водорода, поворачиваемый на ось инжекции поворотным магнитом, проходит через охлаждаемую диафрагму пучка, устанавливаемую на выходной фланец откачной камеры. Использование диафрагмы позволяет осуществить дифференциальную откачку тракта пучка. Кроме того, на диафрагму пучка устанавливается группа вторично-эмиссионных датчиков и терморезисторов, позволяющих контролировать отклонения пучка от оси инжекции.

После диафрагмы пучок проходит ускорительную трубку, рассчитанную на работу с напряжением до 200 кВ. Имеющийся источник высоковольтного питания позволяет подать на трубку 150 кВ, что позволяет получить на выходе 180 кэВ пучок. Стыковка тракта транспортировки ионного пучка с ускорительным объемом происходит через сильфонный узел, через который также осуществляется откачка ускорительной трубки силами криогенного насоса, установленного на входе в ускоритель.

Методом численного моделирования определено, что эмиттанс пучка отрицательных ионов водорода на выходе согласуется с аксептансом газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Применение модернизированного источника отрицательных ионов водорода позволит увеличить ток протонного пучка в ускорителе.

2 Моделирование и анализ условий формирования терапевтического пучка эпитепловых нейтронов в системе с модернизированным замедлителем.

Проведен критический анализ принятых ранее решений в конструкции системы формирования пучка нейтронов (СФП), сделаны предложения по улучшению качества терапевтического пучка нейтронов и проведена оптимизация СФП.

Для получения терапевтического пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей на ускорительных источниках нейтронов применяют систему формирования пучка [1-9], состоящую из замедлителя, отражателя и поглотителя (рис. 2).

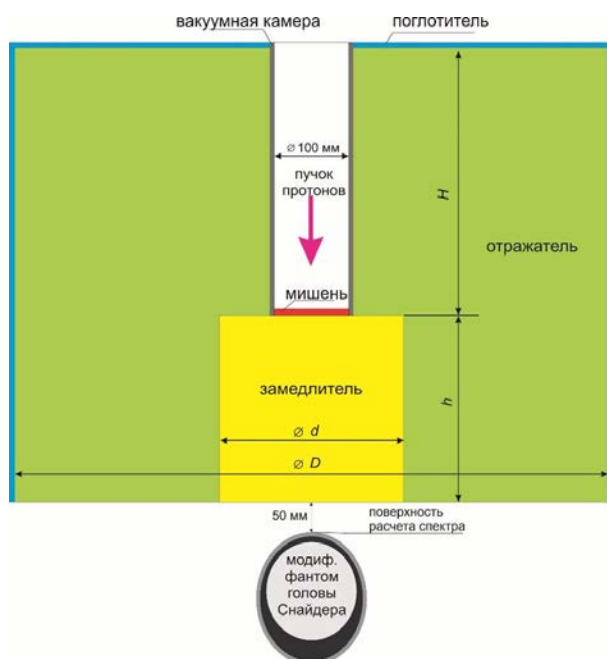


Рисунок 2. Система формирования пучка нейтронов.

Расчёты проведены кодом NMC, предназначенным для моделирования переноса нейтронов в трёхмерной геометрии с помощью метода Монте-Карло, используя базу данных сечений ENDF-VII.

Впервые предложено использовать составной замедлитель: фторид магния – вблизи

нейтроногенерирующей мишени и фторид алюминия – вблизи выхода. Комбинация фторидов в СФП позволяет фактически свести преимущества каждого из них в одной схеме: плотность потока эпитепловых нейтронов почти такая же большая, как в случае применения фторида алюминия, зато поток быстрых нейтронов мал, как в случае применения только фторида магния.

Впервые предложено использовать составной отражатель: графит – в передней полусфере и свинец – в задней. Генерируемые вперёд нейтроны имеют значительно большую энергию, чем те, которые вылетают назад. Предлагается в передней полусфере применить графитовый отражатель, в котором отражение нейтронов будет сопровождаться их замедлением ($\xi = 0,158$), а в задней – свинцовый (без сурьмы), в котором отражение нейтронов будет происходить практически без потери энергии ($\xi = 0,01$). Это позволит сформировать поток нейтронов более монохроматический, что оптимально для БНЗТ.

Впервые предложено осуществлять генерацию нейтронов в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ при энергии протонного пучка 2.3 МэВ, а не 2,5 – 2,8 МэВ, обычно рассматриваемую. Мы предлагаем использовать протонный пучок с энергией 2.3 МэВ, с энергией, близкой к той, при которой достигается максимум сечения реакции. При увеличении энергии протонов выше этой, конечно, будет расти выход нейтронов, но уже не так быстро, и эти дополнительные нейтроны будут иметь большую энергию.

Т.о., методом численного моделирования переноса нейтронов и γ -излучения показано, что предложенные решения позволяют сформировать терапевтический пучок нейтронов в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям БНЗТ.

По результатам проведенных исследований подготовлена статья «Система формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии» и направлена для публикации в научный журнал «Приборы и техника эксперимента».

3 Экспериментальное определение возможности оперативного детектирования взрывчатых веществ с применением имитатора.

Для экспериментального определения возможности оперативного детектирования взрывчатых веществ с применением имитато-

ра разработаны, изготовлены и испытаны графитовые мишени.

Поскольку реакция $^{13}\text{C}(\text{p},\gamma)^{14}\text{N}$ имеет несколько резонансов, привлекательно создание тонкой мишени, позволяющей генерировать только спектральную линию с энергией 9,17 МэВ при энергии протонов 1,75 МэВ. Пролет протонов с такой энергией в графите составляет 4 мкм. Толщины графита порядка 0,1-1 мкм оказывается достаточно для генерации резонансных гамма-квантов, в то же время только относительно малая часть энергии протонов будет выделяться в самой мишени. Снижением поглощенной в мишени мощности можно добиться эффективного охлаждения поверхности мишени при помощи излучения, даже если мишень неподвижна. Такой мишени необходима подложка, не позволяющая тонкой графитовой плёнке разрушиться под действием собственного веса, а так же из-за разницы давлений газа в процессе вакуумной откачки камеры. В качестве подложки предложено использовать танталовую фольгу благодаря механической стойкости тантала и стойкости при облучении протонным пучком. Протоны, проходящие сквозь такую мишень, будут поглощаться в коллекторе, который может располагаться на некотором удалении от мишени и быть закрытым радиационной защитой. Использование такого коллектора позволит снизить уровень гамма-излучения с нерезонансными энергиями квантов и улучшить контрастность сканирования. Крепление мишени может осуществляться в охлаждаемой водой рамке, идентичной используемой для крепления толстых мишеней [10]. Для оперативной смены отработавшей мишени без вскрытия вакуумной камеры можно использовать барабан с несколькими мишенями. Для расчёта поглощенной в мишени энергии был использован код SRIM [11], предназначенный для численного моделирования рассеяния ионов в различных материалах. Модель мишени представляла собой тонкий слой графита толщиной 0,5 мкм, нанесённый на танталовую фольгу толщиной 5 мкм. Расчёт показывает, что в слое графита протоны теряют 0,7% своей энергии, а в танталовой подложке – 28%. Таким образом, суммарные потери энергии в мишени составляют величину ~30% от полной энергии протонов, в то время как остальные ~70% энергии поглощаются в коллекторе. При оценке способности мишени переизлучать выделяемую в ней энергию, следует принять во внимание различную степень черноты поверхностей графита ($\varepsilon_1 = 0,85$) и тантала ($\varepsilon_2 = 0,3$). При температуре

$T = 2100 \text{ K}$ плотность мощности излучения тонкой мишени составит $W_{\text{emit}} = 127 \text{ Вт/см}^2$. Это соответствует плотности мощности протонного пучка $W_p = W_{\text{emit}}/0,3 \sim 420 \text{ Вт/см}^2$, что в свою очередь соответствует плотности тока 0,24 мА/см² при энергии пучка 1,75 МэВ.

В соответствии с расчётной моделью экспериментальная мишень была изготовлена при помощи метода лазерной абляции, разработанного в ИЯФ СО РАН [9]. В составе мишени использовались изотопы углерода ^{12}C и ^{13}C в равных долях. Мишень проработала в эксперименте 100 минут при значениях энергии и тока пучка 1,75 МэВ и 0,2 мА, и сохранила работоспособность, несмотря на деформации (Рис. 3). Полученная мишенью доза облучения составила $0,89 \cdot 10^{19}$ ионов/см². Характерный размер пучка на мишени составил ~20 мм.

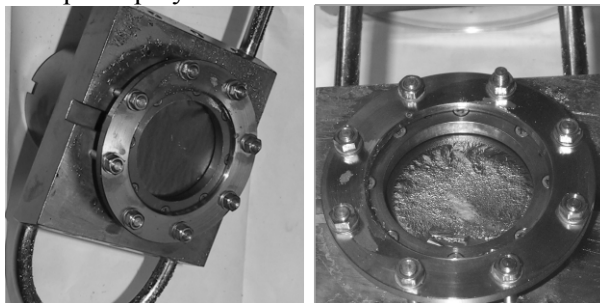


Рисунок 3. Фотографии тонкой мишени до и после эксперимента.

Стационарные мишени работали в экспериментах при токах пучка не превышавших 400-500 мкА. Для работы с большими токами необходимо создать подвижную мишень. С учётом существующей геометрии тракта пучка и сложности обеспечения охлаждения вращающейся конструкции принято решение создать толстую мишень, совершающую одномерные вертикальные колебания. Если при этом принять допустимой скорость испарения графита 500 мкм в сутки, то рабочую температуру мишени можно увеличить до 2500 К, при этом основным механизмом отдачи тепла станет излучение.

Основным элементом подвижной мишени является медная рамка с зафиксированными в ней кусочками графита. В медную рамку впаяны трубки для охлаждения мишени водой. Трубки для ввода и вывода воды заключены одна в другую, и введены в вакуум через стандартный сильфон производства компании Standard Bellows Company. Сильфон позволяет качать мишень в вертикальном направлении и имеет ресурс до 10^6 циклов при проектной частоте качания 1 Гц. Проектная амплитуда качания 10 см. По обеим сторонам подвижной рамки с графитом установлены изготовленные

из меди неподвижные коллекторы теплового излучения, в которых предусмотрены отверстия для прохождения протонного пучка. Оба коллектора охлаждаются водой. Для движения мишени используется стандартный электродвигатель, предназначенный для работы с вакуумными задвижками и сопряжённый с червячным редуктором, вращающим кривошипно-кулисный механизм, крепящийся на специальной рамке. Двигатель способен обеспечивать движение мишени с периодом 5 с и максимальной амплитудой 52 мм.

Для испытаний мишень была снаряжена брусочками прессованного мелкозернистого графита марки МПГ-6 без обогащения изотопом ^{13}C . При длительном облучении мишени током до 500 мкА никаких повреждений поверхности не выявлено. На рис. 4 показана фотография мишени после испытаний током пучка 1,6-1,8 мА в течение часа. Видны области быстрого испарения графита (глубина испарённых областей $\sim 0,5$ мм), которые соответствуют точкам остановки мишени в высшей и низшей позиции. При этом в области нормального движения мишени заметных повреждений поверхности не выявлено.

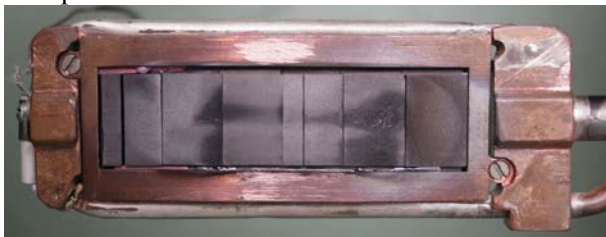


Рисунок 4. Подвижная мишень после испытаний мощным протонным пучком.

Таким образом спроектированы, изготовлены и испытаны в экспериментах графитовые мишени, предназначенные для генерации монохроматических гамма-квантов с энергией 9,17 МэВ в результате реакции $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ для проведения исследований по их резонансному поглощению на ядрах азота.

Разработанная тонкая графитовая мишень на танталовой подложке, несмотря на деформации, сохраняет работоспособность до флюенса $0,89 \cdot 10^{19}$ ионов/см² при её облучении протонным пучком энергией 1,75 МэВ с током 0,2 мА. Температурный режим мишени соответствует благоприятному и время её эксплуатации может достигать 1 суток.

Для возможности применения протонного пучка с током более 1 мА разработана подвижная охлаждаемая водой толстая графитовая мишень, совершающая одномерные осцилляции с частотой 1 Гц. При испытаниях мише-

ни током 1,8 мА отмечены небольшие разрушения в крайних точках движения.

Использование разработанных мишеней позволит выполнить исследования по генерации и последующему резонансному поглощению гамма-квантов на ядрах азота, представляющие практический интерес как способ автоматического, бесконтактного и неразрушающего обнаружения азотосодержащих (взрывчатых) веществ, а также как метод калибровки энергии ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, предназначенного для борнейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

По результатам проведенных исследований подготовлена статья «Графитовые мишени для экспериментов по обнаружению азотосодержащих веществ методом гамма-резонансного поглощения» и направлена для публикации в научный журнал «Прикладная физика».

4 Проведение экспериментов и анализ результатов по изучению энергетического спектра альфа-частиц в реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)^2\alpha$ фа.

Для генерации α -частиц была изготовлена мишень на основе керамической пластины из нитрида бора (плотность 2,18 г/см³), закреплённой в специальной оснастке (рис. 5). В конструкции мишени предусмотрена диафрагма, ограничивающая ток протонного пучка. Диаметр коллимационного отверстия у диафрагмы составляет 3 мм.

Спектральный анализ регистрируемых импульсов от полупроводникового детектора осуществляется с помощью быстродействующего спектрометрического АЦП, произведённого ООО "Парсек", устанавливаемого в компьютер как плата расширения. АЦП имеет разрешение 4096 каналов при амплитуде входных импульсов от -50 мВ до -4 В. Особенностью этих АЦП является нулевое мертвое время, и, соответственно, высокая скорость преобразования импульсов – до $4 \cdot 10^5$ имп/с. Программное обеспечение позволяет наблюдать за набором спектра в реальном времени, сохранять набранные и выводить на экран сохраненные спектры, задавать время экспозиции. Для калибровки детектора использован ^{238}Pu , имеющим 2 спектральные линии с энергиями 5,46 МэВ и 5,5 МэВ и относительной интенсивностью в % 28 и 72 соответственно.

Заключение

Методом численного моделирования определено, что эмиттанс пучка отрицательных ионов водорода на выходе согласуется с аксептансом газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Применение модернизированного источника отрицательных ионов водорода позволит увеличить ток протонного пучка в ускорителе.



Рисунок 5. Мишень с пластиной из нитрида бора.

Для получения терапевтического пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей на ускорительных источниках нейтронов применяют систему

формирования пучка, состоящую из замедлителя, отражателя и поглотителя. В проекте впервые предложено использовать составной замедлитель: фторид магния – вблизи нейтроногенерирующей мишени и фторид алюминия – вблизи выхода, использовать составной отражатель: графит – в передней полусфере и свинец – в задней, и осуществлять генерацию нейтронов в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ при энергии протонного пучка 2,3 МэВ. Методом численного моделирования переноса нейтронов и γ -излучения показано, что предложенные решения позволяют сформировать терапевтический пучок нейтронов в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям БНЗТ.

Спроектированы, изготовлены и испытаны в экспериментах графитовые мишени, предназначенные для генерации монохроматических гамма-квантов с энергией 9,17 МэВ в результате реакции ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$ для проведения исследований по их резонансному поглощению на ядрах азота. Разработанная тонкая графитовая мишень на танталовой подложке, несмотря на деформации, сохраняет работоспособность до флюенса $0,89 \cdot 10^{19}$ ионов/см² при её облучении протонным пучком энергией 1,75 МэВ с током 0,2 мА. Температурный режим мишени соответствует благоприятному и время её эксплуатации может достигать 1 суток. Для возможности применения протонного пучка с током более 1 мА разработана подвижная охлаждаемая водой толстая графитовая мишень, совершающая одномерные осцилляции с частотой 1 Гц. При испытаниях мишени током 1,8 мА отмечены небольшие разрушения в крайних точках движения. Использование разработанных мишеней позволит выполнить исследования по генерации и последующему резонансному поглощению гамма-квантов на ядрах азота, представляющие практический интерес как способ автоматического, бесконтактного и неразрушающего обнаружения азотосодержащих (взрывчатых) веществ, а также как метод калибровки энергии ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, предназначенного для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

Для изучения энергетического спектра альфа-частиц в реакции ${}^{11}\text{B}(p,\alpha){}^2\alpha$ разработана мишень на основе керамической пластины из нитрида бора.

По результатам проведенных исследований подготовлены 2 статьи, которые направлены для публикации в научные журналы «Приборы и техника эксперимента» и «Прикладная физика».

Список использованных источников

- [1] F. Palamara, F. Mattioda, R. Varone, V. Guisti. Proton accelerator-based epithermal neutron beams for BNCT. Research and Development in Neutron Capture Therapy. Eds.: W. Sauerwein, R. Moss, and A. Wittig. Monduzzi Editore, 2002, p. 283-292.
- [2] A. Hawk, T. Blue, J. Woolard and G. Gupta. Effects of target thickness on neutron field quality for an ABNS. Research and Development in Neutron Capture Therapy. Eds.: W. Sauerwein, R. Moss, and A. Wittig. Monduzzi Editore, 2002, p. 253-257.
- [3] O. Kononov, M. Bokhovko, V. Kononov, *et al.* Optimization of an accelerator-based neutron source for neutron capture therapy. Applied Radiation and Isotopes 61(4) (2004) 1009-1011.
- [4] G. Bengua, T. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Nakagawa. Optimization parameters for BDE in BNCT using near threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ direct neutrons. Applied Radiation and Isotopes 61 (2004) 1003-1008.
- [5] F. Stichelbaut, E. Forton, Y. Jongen. Design of a beam shaping assembly for an accelerator-based BNCT system. Advances in Neutron Capture Therapy (2006) 308-311.
- [6] K. Tanaka, T. Kobayashi, G. Bengua, *et al.* Characterization indexes of moderator assembly for accelerator-based BNCT using ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ neutrons at proton energy of 2.5 MeV. Advances in Neutron Capture Therapy (2006) 323-326.
- [7] R. Terlizzi, N. Colonna, P. Colangelo, *et al.* Design of an accelerator-based neutron source for neutron capture therapy. Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) S292-S295.
- [8] D. Minsky, A. Kreiner, A. Valda. AB-BNCT beam shaping assembly based on ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction optimization. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1668-1671.
- [9] A. Burlon, S. Girola, A. Valda, *et al.* Design of a beam shaping assembly and preliminary modelling of a treatment room for accelerator-based BNCT at CNEA. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1688-1691.
- [10] A.S. Kuznetsov, Yu.I. Belchenko, A.V. Burdakov, *et al.* The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 606 (2009), pp. 238-242.
- [11] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark. The Stopping and Range of Ions in Solids // Pergamon Press, New York, 1985.

№ 15.6.1 Развитие экспериментальных методов на Новосибирском лазере на свободных электронах

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 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 существенно расширяет диапазон, доступный для научных пользователей.

1 Монтаж и юстировка оптического резонатора лазера на свободных электронах на четвёртой дорожке ускорителя-рекуператора

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. смонтирован оптический резонатор третьего лазера на свободных электронах. Один из узлов зеркала оптического резонатора с вакуумной камерой, фланцем для крепления выходного окна и юстировочной подставки показан на рисунке 1.

Юстировка оптического резонатора проводилась при помощи лазера видимого диапазона. Его излучение проходило через центральные отверстия в зеркалах оптического резонатора частично отражаясь от зеркал.

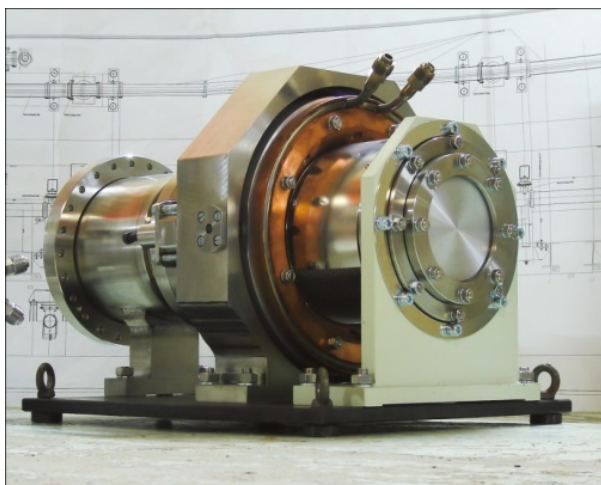


Рисунок 1 - Охлаждаемое водой медное зеркало в юстировочной подставке.

2 Запуск лазера на свободных электронах на четвёртой дорожке ускорителя-рекуператора

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 (см. рисунок 2).



Рисунок 2 - Отверстие в оргстекле, проделанное несфокусированным излучением третьего ЛСЭ.

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.

3 Модернизация анодного выпрямителя высокочастотного генератора

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», одна из которых показана на рисунке 3.



Рисунок 3 – Генераторный тетрод ТН 781.

Эти лампы работают при большем анодном напряжении. Поэтому для повышения анодного напряжения была проведена модернизация анодного выпрямителя высокочастотного генератора.

4 Разработка и создание новых пользовательских станций

Продолжались 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. Новые участки канала для вывода излучения на новые пользовательские станции показаны на рисунках 4 и 5.



Рисунок 4 – Новый участок канала для вывода излучения (1 этаж).



Рисунок 5 – Новый участок канала для вывода излучения (2 этаж).

Заключение

Работы, проделанные в 2015 г. позволят существенно улучшить параметры Новосибирского лазера на свободных электронах и расширить возможности проведения экспериментов с использованием мощного субмиллимет-

рового и инфракрасного излучения. Результаты, имеющие самостоятельное научное значение, опубликованы в статьях [1 – 4].

Список использованных источников

- [1] Miginsky, S., Jang, K.-H., Lee, K., Jeong, Y.U., Vinokurov, N., Mun, J., Shim, G.I., Gudkov, B. HE₁₁ mode in a waveguide THz FEL. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics](#), January 2015, Volume 79, Issue 1, pp. 31-35 (2015).
- [2] Seon Yeong Noh, Eun-San Kim, Ji-Gwang Hwang, A. Heo, Si won Jang, Nikolay A. Vinokurov, Young Uk Jeong, Seong Hee Park, and Kyu-Ha Jang. Development of an S-band cavity-type beam position monitor for a high power THz free-electron laser. *Review of Scientific Instruments* 86, 014703-1 - 014703-7 (2015).
- [3] Y. K. Wu, J. Yan, H. Hao, J. Y. Li, S. F. Mikhailov, V. G. Popov, N. A. Vinokurov, S. Huang, J. Wu. Widely Tunable Two-Color Free-Electron Laser on a Storage Ring. *Physical Review Letters*. – 2015, Vol. 115, P. 184801-1 - 184801-5.
- [4] Vasiliev, A.A., Palchikov, E.I., Kubarev, V.V., Chesnokov, E.N., Koshlyakov, P.V., Dolgikh, A.V., Krasnikov, I.Y. Investigating nonstationary waves from the combustion and detonation of a hydrogen-oxygen mixture in the optical and terahertz ranges. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, Volume 79, Issue 9, Pages 1202-1207 (2015).

№ 15.6.2 Разработка и изготовление специализированных генераторов синхротронного излучения с использованием сверхпроводящих или постоянных магнитов

Введение

Современные центры синхротронного излучения 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 синхротронного излучения (СИ), значительно увеличивает жёсткость излучения, на несколько порядков увеличивает яркость источников СИ. Использование сверхпроводящих поворотных магнитов вместе с нормально проводящими магнитами даёт 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 Разработка конструкции и создание полноразмерного (длиной около двух метров) сверхпроводящего многополюсного вигглера с чётным числом полюсов

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. Основное преимущество чётного числа полюсов заключается в компенсации поперечной неоднородности поля, возникающей вследствие конечного поперечного размера каждого полюса. В случае чётного числа полюсов для каждого полюса с положительным полем имеется полюс с точно таким же отрицательным полем. Соответственно, неоднородности в этих полюсах компенсируют друг друга. В случае же нечётного числа полюсов всегда остаётся один не скомпенсированный полюс, создающий не скомпенсированную секступольную компоненту поля, которая ограничивает динамическую апертуру накопителя.

Оптимизация конструкции проводилась на следующие параметры: период 48 мм, вели-

чина магнитного поля 2.5 Т при магнитном зазоре 19 мм. Испытания изготовленного полноразмерного магнита показали работоспособность выбранной конструкции, Заявленные параметры были продемонстрированы. На рис.1 представлен внешний вид сверхпроводящего вигглера.

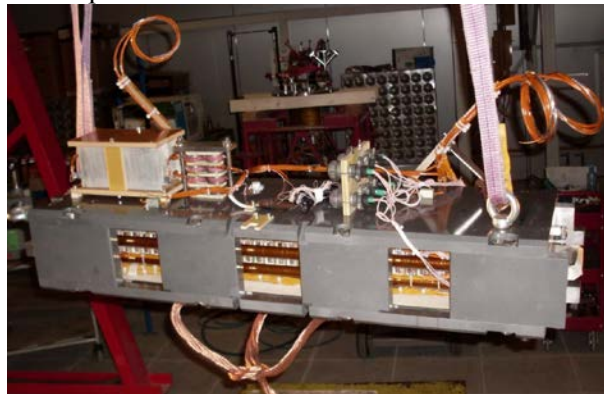


Рисунок 1. Магнитная система сверхпроводящего вигглера с чётным числом полюсов (максимальное поле 2.5 Тл, период 48 мм при магнитном зазоре 19 мм)

2 Исследование карты магнитных полей вигглера в испытательном погружном криостате. Моделирование влияния основных компонент магнитного поля вигглера на динамику электронного пучка в накопителе

Карта магнитных полей для вигглера с чётным числом полюсов снималась в погружном криостате с жидким гелием. В этом случае внутри магнитной системы вигглера отсутствует вакуумная камера, что существенно увеличивает свободное пространство для измерительной системы. Это позволило проводить вдоль магнитной системы вигглера каретку с пятью датчиками Холла, равномерно расположенными на линии, перпендикулярной продольной оси вигглера, что позволяет измерить поперечную неоднородность поля.

Основное преимущество чётного числа полюсов заключается в компенсации поперечной неоднородности поля и увеличении динамической апертуры накопителя – источника синхротронного излучения. Но при использовании чётного числа полюсов возникают некоторые дополнительные проблемы, связанные с занулением первого и второго интегралов поля, а также с расположением в вигглере траектории электронного пучка. Правильное расположение траектории электронного пучка в вигглере с чётным числом полюсов достигается только при использовании дополнительных полюсов с полем $\frac{3}{4}$ и $\frac{1}{4}$ от основного [1]. Про-

верить правильность расчёта дополнительных полюсов необходимо до сборки вигглера в собственном криостате. С этой точки зрения измерения в погружном криостате имеют важное значение, позволяя в случае необходимости своевременно скорректировать конструкцию дополнительных полюсов.

Правильное расположение траектории электронного пучка в вигглере с чётным числом полюсов приведено на рис.2 (второй интеграл магнитного поля равен нулю и траектория электронного пучка параллельна продольной оси вигглера).

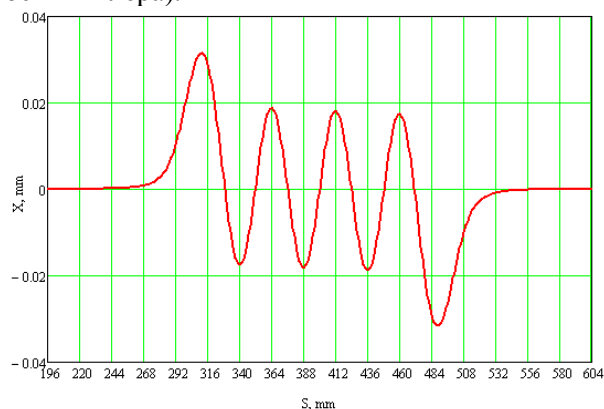


Рисунок 2. Расположение траектории электронного пучка в вигглере с чётным числом полюсов. Второй интеграл магнитного поля равен нулю и траектория электронного пучка параллельна продольной оси вигглера.

3 Исследование режимов работы тепловых трубок при криогенных температурах - ключевых элементов эффективной теплопередачи в криостате с косвенным охлаждением сверхпроводящих магнитов

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.

Для охлаждения магнита от температуры 60К до 4К возникает необходимость разомкнуть этот тепловой контакт так, чтобы исключить какие-либо паразитные теплопритоки

от криокулера на сверхпроводящий магнит. Выбранный в качестве рабочего газа азот имеет температуру образования льда $\sim 63\text{K}$, что позволило прерывать процесс теплообмена при охлаждении реконденсорной части тепловой трубки ниже этой температуры. Были исследованы различные режимы «размыкания» этого теплового ключа при разных условиях и подобран оптимальный рабочий режим. На рис.3 представлен образец рабочей тепловой трубки.



Рисунок 3. Тепловая трубка сифонного типа.

4 Разработка и создание экспериментального безжидкостного криостата для исследования сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением. Исследование карты температур в криостате при различных режимах работы

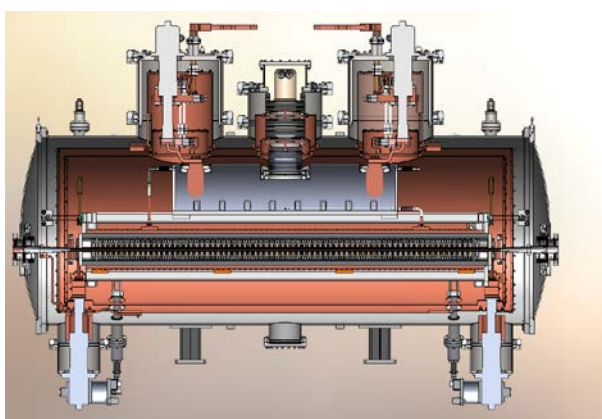


Рисунок 4. 3D – модель экспериментального безжидкостного криостата.

Были проведены расчеты основных систем экспериментального безжидкостного криостата для исследований сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением. Были проведены тепловые расчеты для оценки теплопритоков в различные точки криостата при его стационарной работе, в процессе захлаживания и отогрева. На основании этих расчетов была 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. Были изготовлены ком-

плекты чертежей для изготовления основных узлов криостата. На рис. 4 представлена 3-D модель основных систем экспериментального безжидкостного криостата.

5 Разработка систем измерений магнитных полей в сверхпроводящих магнитах. Исследование различных факторов и ограничений, влияющих на точность измерений магнитного поля и интегралов поля

Была разработана и успешно испытана система магнитных измерений. Основное отличие от обычных систем магнитных измерений состоит в том, что измерения необходимо проводить внутри апертуры сверхпроводящего магнита, находящегося при криогенной температуре. В качестве направляющей для измерений была использована камера прямоугольного сечения из алюминиевого сплава. Для измерений структуры магнитного поля были использованы как трехмерные датчики, так и линейки из пяти датчиков Холла. Для измерения поперечного профиля поля был изготовлен прототип каретки с возможностью поворота линейки, позволяющий в процессе измерения проводить взаимную калибровку датчиков линейки. На рис.5 изображена система измерений магнитных полей в сверхпроводящих магнитах.

В рамках данной работы был 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. Стенд оборудован достаточным количеством нагревательных элементов с калиброванной мощностью и датчиками для измерения криогенных температур, обеспечивающими точность измерения не хуже 0.01К. Данный стенд (Рис.4) позволяет оперативно проводить измерения тепловых трубок, заполняемых различными рабочими газам

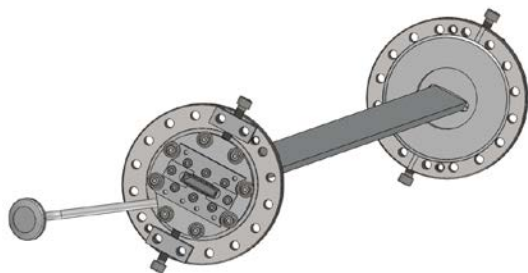


Рисунок 5. 3-D модель системы измерений магнитных полей в сверхпроводящих магнитах.

6 Проектирование и создание стендов для исследования физических свойств конструкционных материалов при криогенных температурах

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. Стенд оборудован достаточным количеством нагревательных элементов с калиброванной мощностью и датчиками для измерения криогенных температур, обеспечивающими необходимую точность измерения. Данный стенд позволяет оперативно проводить измерения свойств различных материалов.

Заключение

Разработка и создание генераторов синхротронного и ондуляторного излучений высокой яркости для проведения исследований в области нанотехнологий, медицины, биологии, материаловедения, катализа, геологии, экологии, археологии и других областей знаний имеет высокую значимость как для фундаментальных научных исследований, так и для практического использования.

Список использованных источников

- [1] Khrushchev, S.V., Shkaruba, V.A., Mezentsev, N.A., Tsukanov, V.M., Lev, V.K., Zeroing magnetic field integrals for wigglers and undulators with even numbers of poles. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 79, Issue 1, 2015, Pages 44-48.
- [2] Volkov, A.A., Zorin, A.V., Lev, V.K., Mezentsev, N.A., Syrovatin, V.M., Tarasenko, O.A., Khrushchev, S.V., Tsukanov, V.M., Shkaruba, V.A., The superconducting 15-pole 7.5 Tesla wiggler in the LSU-CAMD storage ring. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics Volume 79, Issue 1, 2015, Pages 53-59.
- [3] Ivanyushenkov, Y., Lev, V., Mezentsev, N., Syrovatin, V., Development and operating experience of a short-period superconducting undulator at the Advanced Photon Source. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams: Volume 18, Issue 4, 29 April 2015, Article number 040703.
- [4] Amin R.S., Jines P., Launey D., Morris K., Suller V.P., Wang Y., Mezentsev N., Khrushchev S., Lev V., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zorin A., A PRELIMINARY REPORT FROM LOUISIANA STATE UNIVERSITY CAMD STORAGE RING OPERATING WITH AN 11-POLE 7.5 T WIGGLER. 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015 IPAC. C. 1682-1685.

№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 несколько тысяч в год.

К сожалению, в России данная тематика не используется в полной мере своих возможностей. В настоящее время существуют только два функционирующих центра по использованию СИ, но в обоих центрах в качестве источников СИ используются достаточно старые ускорительные комплексы и параметры излучения не соответствуют современным стандартам. Поэтому, поиск эффективных предложений по созданию источников СИ для организации национальных центров СИ представляет большой интерес.

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.

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 укорителя-рекуператора (УР).

1 Разработка магнитной системы источника СИ поколения 3+ для Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения, составление сметы строительства комплекса

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.

Несмотря на то, что в ИЯФ СО РАН было предложено несколько вариантов строительства специализированного источника СИ, в настоящее время не существует целенаправленной поддержки на разработку такого источника и маловероятна возможность финансирования такого строительства. Поэтому основной задачей данного направления был поиск оптимального варианта по соотношению качество-стоимость.

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.

2 Разработка вакуумной системы специализированного источника синхротронного излучения в тоннеле существующего накопителя ВЭПП-3

Вакуумная камера источника СИ изготавливается по экструзионной технологии из алюминиевого сплава. Внутренняя поверхность камеры в поворотных арках имеет эллиптическую форму с размерами осей 50х30 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.

Вакуумные камеры прямолинейных промежутков имеют сложную форму и сочетаются с вакуумным пространством каналов вывода СИ, устройств для генерации СИ и ВЧ-резонаторов. Детальная проработка конструкции вакуумных камер прямолинейных промежутков в настоящее время не закончена ввиду отсутствия детальных спецификаций на устройства генерации СИ (сверхпроводящие вигглеры и сверхпроводящие дипольные магниты) и на окончательную конструкцию ВЧ резонаторов.

3 Разработка высокочастотной системы с частотой 180 МГц для специализированного источника СИ

Для уменьшения негативных явлений, связанных с внутривидовым 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 ступки 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.

ВЧ система также включает в себя пассивный резонатор располагающийся в линейном промежутке для размещения устройств генерации СИ и предназначен для эффективного подавления высших гармоник.

4 Анализ пользовательских требований, выбор параметров и концептуальное проектирование сверхпроводящих вигглеров для генерации СИ для специализированного источника

В данном проекте предполагается использовать следующие устройства для генерации СИ:

- Сверхпроводящий многополюсный вигглер с полем 7.5 Тл;
- Два сверхпроводящих магнитных дипольных магнита с полем 6 Тл;
- Один нормально проводящий дипольный магнит арки с полем 1.6 Тл для генерации СИ в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена.

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, рентгенофлуоресцентный анализ и др.).

Возможно размещение нескольких пользовательских станций на одном канале вывода СИ для реализации распределённого по времени режима работы.

5 Разработка проекта модернизации зала для размещения экспериментальных пользовательских станций

В настоящее время ограниченная площадь зала для размещения экспериментальных станций использующих пучки СИ из накопителя ВЭПП-3 не позволяет разместить все необходимое оборудование. Для эффективного использования возможностей улучшенных параметров пучков СИ, необходимо существенно

увеличить эффективную площадь экспериментального зала.

В предлагаемом решении разрабатывается способ увеличения существующего экспериментального зала до площади 600 кв.м. Общий вид комплекса с экспериментальным залом и возможным расположением станций представлен на рис. 1.

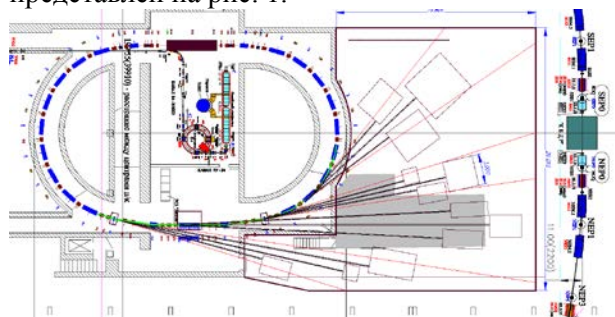


Рисунок 1. Общий вид проектируемого комплекса и экспериментального зала.

6 Подготовка технических предложений по высокочастотному инжектору ускорителя-рекуператора (для многорожечного ЛСЭ)

На основе опыта работы с прототипом высокочастотной электронной пушки, показанным на рисунке 2, проведены выбор схемы высокочастотного инжектора и оценка его технических параметров.

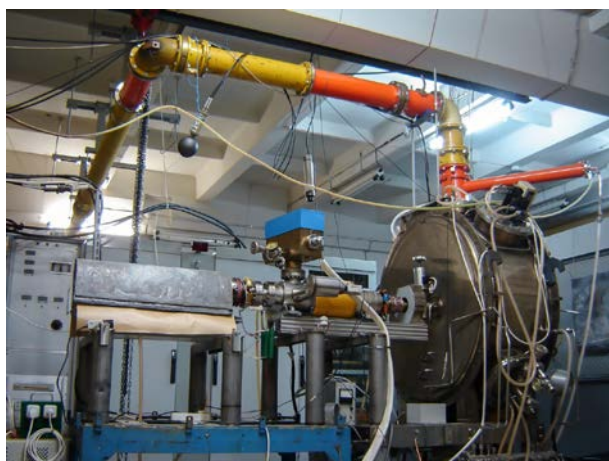


Рисунок 2. Прототип высокочастотной электронной пушки на испытательном стенде.

7 Разработка и изготовление оборудования для управления и диагностики в многорожечном ускорителе-рекуператоре

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 позволя-

ет одновременно определять траектории нескольких пучков, проходящих через датчик положения. Типичный результат измерения орбиты показан на рис. 3.

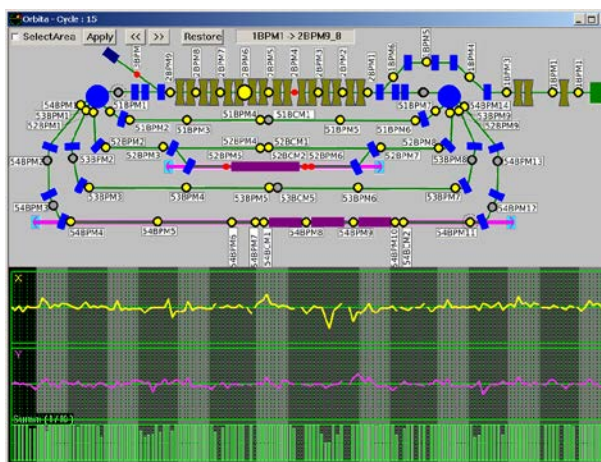


Рисунок 3. Горизонтальные (x) и вертикальные (y) отклонения орбиты в многорожечном ускорителе-рекуператоре.

Заключение

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 реализуемы и при наличии необходимого финансирования, могут быть доведены до эксплуатационного состояния.

Список использованных источников

- [1] Пиминов П.А., Золотарев К.В., Николенко А.Д., Трунова В.А., Полосьмак Н.В., Купер К.Э. "ЭККУРСИЯ ПО ГОСУДАРСТВУ ИЯФ: ДЕВЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ" Наука из первых рук. 2015. Т. 62. № 2. С. 6-27
- [2] Кулипанов Г.Н. "НАКОПИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ - ИСТОЧНИКИ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ" В книге: Использование синхротронного и терагерцового излучения для исследования высокоэнергетических материалов Школа по подготовке молодых специалистов. Новосибирск, 2015. С. 5.
- [3] Park S.H., Cha Y.No., Jeong Y.Uk., Jo J., Kim Ha.Na., Kim K.N., Lee K., Ryu W., Shinn Ja.S., Vinokurov N. CHARACTERIZATION OF LASER-PLASMA ACCELERATED ELECTRON BEAM FOR A COMPACT STORAGE RING 6th International Particle Accelerator Conference Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015. С. 2569-2571.

№ 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 Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) и Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова (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.

1 Обеспечение выполнения исследований с пучками СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

В 2015 году обеспечено выполнение исследований с пучками синхротронного излу-

чения (СИ) как из накопителя ВЭПП-3 (2 ГэВ), так и из накопителя ВЭПП-4М. За отчетный период (январь – декабрь 2015 г.) было выделено 1065 часов для работы с пучками СИ из накопителя ВЭПП-3, в том числе 456 часов для работы с пучками СИ из ВЭПП-4М на энергии инъекции (1.8 ГэВ) в режиме одновременной работы ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, и 492 часа для работы с пучками СИ из ВЭПП-4М на энергии 4 ГэВ. В выполнении фундаментальных и прикладных исследований на пучках СИ участвовало 19 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, ИАиЭ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИГХ СО РАН (Иркутск), НГТУ, НГУ, ТПУ (Томск), УрФУ (Екатеринбург), ИИФиРЭ СФУ (Красноярск), РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск), РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров), ФТИ (Санкт-Петербург).

По результатам выполненных исследований в 2015 году опубликовано 18 научных работ [1-18].

2 Модернизация системы непрерывного радиационного контроля в бункере СИ ВЭПП-4М

В бункере СИ ВЭПП-3 функционирует система радиационного контроля, основанная на стандарте КАМАК. В связи с тем, что подобная система морально и технически устарела, в бункере СИ ВЭПП-4М установлена система, опирающаяся на более современную базу, автоматизированная система радиационного мониторинга (АСРМ) серии КМ, предназначенная для оценки радиационной обстановки и обеспечения радиационной безопасности. Структурная схема АСРМ приведена на рис. 1. Система включает в себя блоки детектирования (БД), расположенные в контрольных точках рабочих станций, которые оповещают об аварийной ситуации, управляют устройствами свето-звуковой сигнализации (УСЗС), аварийными блоками управления (АБУ) и исполняющими механизмами. Также система анализирует режимы работы бункера СИ, состояние механических блокировок и, соответственно, корректирует работу системы, сохраняет усредненные за пять секунд показания всех БД за сутки. АСРМ серии КМ разработана в отделе радиационной безопасности ИЯФ СО РАН.

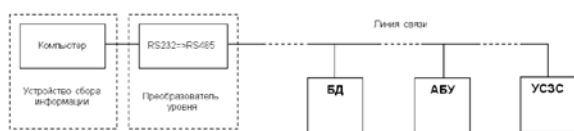


Рисунок 1. Структурная схема системы радиационного мониторинга серии КМ.

В бункере СИ ВЭПП-4М работает система КМ-32, которая поддерживает работу 24 БД и 8 служебных устройств (АБУ, УСЗС). Каждый из БД представляет собой конструктивно совмещенные между собой первичный детектор излучения и электронный блок предварительной обработки его сигнала. В качестве первичного детектора фотонного и ливневого излучения используется тонкостенная газонаполненная ионизационная камера, для нейтронного излучения - активационный дозиметр нейтронов с полиэтиленовым замедлителем. Оба детектора выбраны с учетом необходимости регистрировать импульсную компоненту излучения, присутствующую на ускорительно-накопительных комплексах. Фотонные детекторы позволяют регистрировать излучения с низкой энергией.

Всего в настоящий момент в бункере установлено 4 датчика, 2 из них контролируют радиационную обстановку на новом канале СИ, получающем излучение из вигглера (канал № 8). Система работает постоянно и останавливается на профилактику (если это необходимо) с учетом графика работы бункера СИ ВЭПП-4М. Согласно регламенту, техническое обслуживание БД с ионизационными камерами проводится раз в три года и связано со снижением чувствительности камеры на ~ 10% из-за утечки газа.

Кроме того, для измерения интегральной эквивалентной дозы в бункере дополнительно установлены 3 ТЛД измерителя типа ДВГН-01. Для учета эффекта рассеяния излучения в теле человека датчики закреплены на водяных фантомах.

3 Создание станции рентгеновской фазоконтрастной интроскопии и РФА на накопителе 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 ультракоротковол-

новом рентгеновском диапазоне 0.15 – 0.4 Å. На зарегистрированных рентгеновских снимках различаются детали, отличающиеся по величине рентгеновской плотности на значение, не превышающее 0.1%. Была выполнена прецизионная юстировка всех рентгенооптических элементов канала СИ, включающих в себя: блоки коллиматоров, двухкристальный рентгеновский монохроматор, интерферометр Талбота и кристалл-анализатор. Написан программный интерфейс, необходимый для сбора и обработки получаемых данных, а также для автоматизации и синхронизации всех технологических процессов, происходящих на созданной нами установке. С использованием набора проекционных данных, полученных при вращении образца, методом вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ) восстановлены трехмерные структуры, позволяющие разрешать детали, слабоконтрастные в ультракоротковолновом рентгеновском диапазоне [2,18].

В 2015 году на станции проведены первые эксперименты по исследованию элементного состава проб на основе анализа спектров их рентгенофлюоресценции [3]. В качестве образцов использовались российские и международные стандарты магматических горных пород и озёрных отложений (AGV-1, BCR-1, CVT-16A, DNC-1, VIR-1, СГД-1А, G-2, БИЛ-1). Определены минимальные пределы обнаружения (MDL) тяжелых и редкоземельных элементов (Z=55-66) по линиям К-серий характеристического излучения, возбуждаемого фотонами с энергией 56 и 69.2 кэВ. Полученные в результате эксперимента пределы обнаружения лежат в диапазоне от 0.5 до 2 ppm (г/т).

4 Завершение создания и физического пуск станции «Детонация» на накопителе ВЭПП-4М

Завершено проектирование и физический пуск 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 взрывааемых образцов.

Выполнено измерение профиля пучка СИ на станции. Эксперимент проводился с помощью кремниевого микрополоскового детектора с шагом полосок 50 мкм и толщиной чувствительного материала 0.3 мм (толщина обедненной зоны). Результаты сканирования профиля пучка СИ приведены на рис. 2. На рисунке по горизонтальной оси отложено вертикальное положение детектора, по вертикальной оси отложен максимум сигнала с детектора на нагрузке 50 Ом. При этом энергия пучка электронов в ВЭПП-4М была 4 ГэВ, ток пучка составлял 0.67 мА, ток вигглера был равен 1.8 кА. Ширина пучка составляла 30 мм. По результатам измерения получен профиль пучка СИ, проходящего через взрывную камеру.

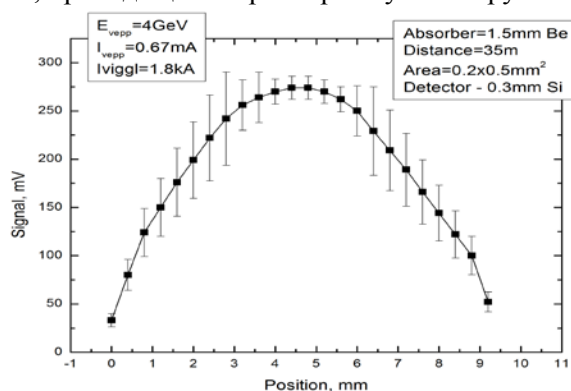


Рисунок 2. Результат измерения профиля пучка СИ (по вертикали) кремниевым детектором толщиной 0.3 мм на станции «Детонация» на накопителе ВЭПП-4М.

Были проведены тестовые эксперименты по измерению динамики малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) при детонации зарядов ТГ50/50 диаметром 30 мм. Взаимное расположение экспериментальной сборки и элементов взрывной камеры по отношению к детектору показано на рис. 3. Блок щелей состоял из шести последовательных камер (для гашения ударной волны) с щелями размером 4 x 40 мм.

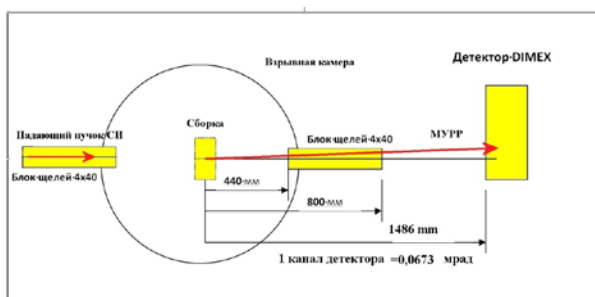


Рисунок 3. Взаимное расположение элементов взрывной камеры и детектора.

Перед проведением взрывных экспериментов было измерено рассеянное излучение от муляжа, содержащего 50% взрывных нанодiamondов (производства НПО Алтай). Запись детектора от муляжа приведена на рис. 4.3, при этом муляж (рис. 4.) располагался в центре камеры на расстоянии 1486 мм от детектора DIMEX.

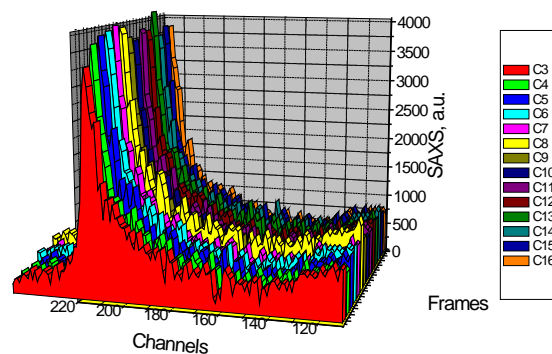


Рисунок 4. Угловое распределение МУРР от муляжа. Угол рассеяния 2θ приведен в каналах детектора. 1 канал = 0.0673 мрад. Время между кадрами 1.2 мкс

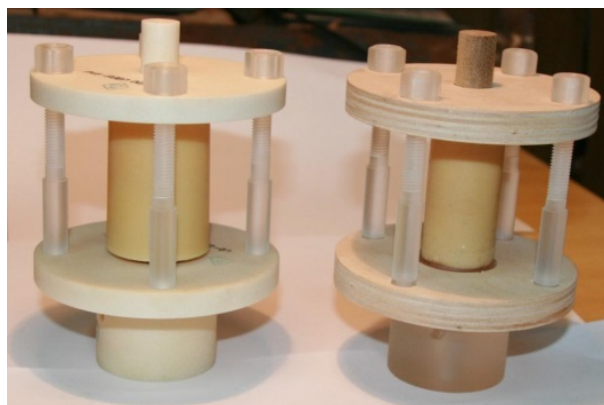


Рисунок 5. Экспериментальные сборки зарядов ТГ50/50 диаметром 40 мм (слева) и 30 мм (справа)

Были выполнены тестовые эксперименты по исследованию образования нанодiamondов в зарядах диаметром от 10 мм до 40 мм. Алмазы образуются за фронтом детонационной волны, где реализуются термодинамически условия образования алмазов ($P=300$ кбар, $T=5000^\circ$ С). Время существования этих условий порядка 300 нс, поэтому алмазы не успевают вырасти до больших размеров. Экспериментальные сборки показаны на рис. 5, а запись сигнала с детектора для заряда диаметром 40 мм приведена на рис. 6. При этом накопитель ВЭПП-4М работал в одно-сгустковом режиме с током 4 мА.

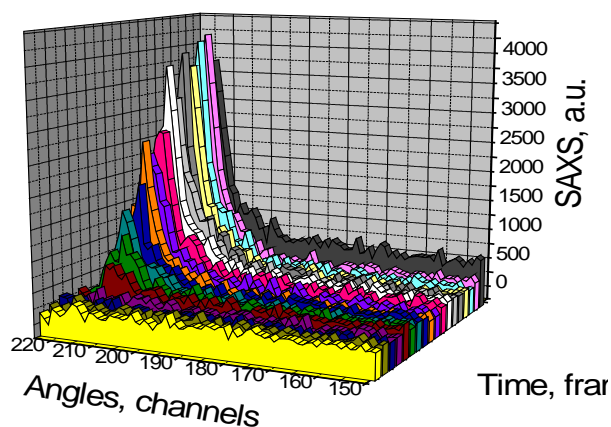


Рисунок 6. Динамика углового распределения МУРР при детонации заряда ТГ50/50 диаметром 40 мм. Угол рассеяния 2θ приведен в каналах детектора. 1 канал = 0.0673 мрад. Время между кадрами 1.2 мкс

5 Завершение создания и запуск станции диагностики процессов горения с использованием СИ ВУФ диапазона на накопителе ВЭПП-4М

Созданная станция использует излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4М и получила рабочее название "Станция синхротронного излучения «Пламя»". Место установки станции – фронтенд ныне действующей станции «Космос». Станции 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 7).

Экспериментальная установка, позволяющая реализовать на станции метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии, разработана Институтом химической кинетики и горения СО РАН (ИХКГ СО РАН) и относится к третьему поколению. Ранее она успешно применялась для изучения структуры пламен в лабораторных условиях с использованием метода ионизации электронным ударом и после модернизации использована в составе станции СИ. Схема установки показана на рисунке 8.

В настоящее время 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, ведется подготовка к первым экспериментам.

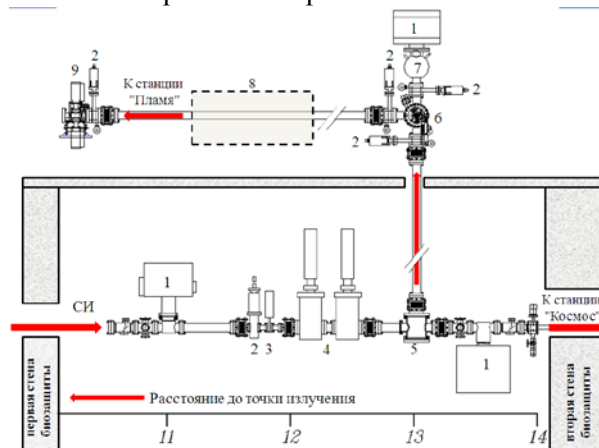


Рисунок 7. Компоновка канала вывода СИ: 1 – магниторазрядные насосы; 2 – вакуумные шиберы; 3 – аварийный быстродействующий (10 мс) шибер аварийной защиты вакуума; 4 – радиационные затворы; 5 – блок вводимого фокусирующего зеркала; 6 – блок дифракционной решетки; 7 – азотная ловушка; 8 – газовый фильтр; 9 – выходная щель. В нижней части рисунка показано расстояние до точки излучения в метрах.

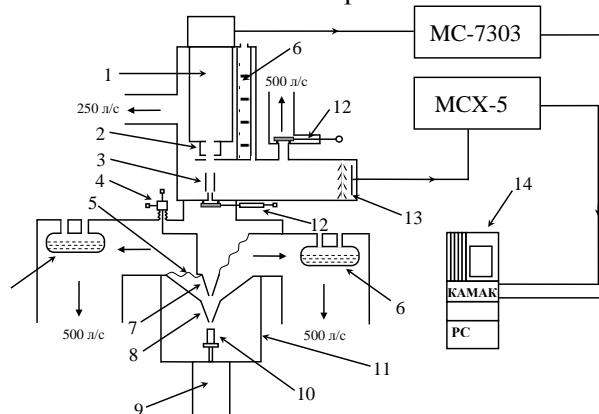


Рисунок 8. Схема установки:

1 – квадрупольный масс-спектрометр; 2 – ионный источник квадрупольного масс-спектрометра; 3 – ионный источник ВПМС; 4 – трёхкоординатный механизм юстировки скиммера; 5 – резиновая мембрана; 6 – азотная ловушка; 7- скиммер; 8 – зонд; 9 – сканирующий механизм; 10 – горелка; 11 – камера сгорания; 12 – шиберный затвор; 13 – ВЭУ; 14 – система сбора данных.

6 Разработка методов исследования реальных промышленных и специзделий (диаметром до 40 мм) во время детонации методом томографии

Физический пуск станции СИ «Детонация» на ВЭПП-4М позволил начать эксперименты в жестком диапазоне спектра излучения

СИ (до 100 кэВ), в частности, провести исследование параметров разрабатываемого рентгеновского детектора для томографических исследований. Изготовленный 4-х канальный прототип был установлен на пучок СИ и проведено его тестирование. Показано, что детектор имеет пространственное разрешение 50 мкм и временное разрешение 20 нс, при этом соотношение сигнал-шум составляет ~10000.

Запуск станции позволил начать работу с реальными образцами специзделий РФЯЦ ВНИИТФ диаметром 40 мм и мощностью 200 г в тротиловом эквиваленте (на ВЭПП-3 эксперименты проводились с модельными системами диаметром 12 мм).

Для исследования распределения плотности внутри взрывчатых веществ реальных промышленных специзделий (диаметром до 40 мм) во время взрыва разрабатываются томографические методы исследования. В частности, на пучке СИ ВЭПП-3 проведена серия экспериментов по отладке алгоритма томографического восстановления плотности внутри ВВ во время взрыва. Достигнуто временное разрешение в 125 нс.

Была проведена серия измерений поперечных распределений рентгеновской тени детонирующего заряда в фиксированном сечении по оси z (рис. 9). Предполагая цилиндрическую симметрию течения, можно решить томографическую задачу и восстановить зависимость плотности от радиуса и времени. Метод восстановления плотности заключается в минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальной рентгеновской тени и рассчитанной по тестируемому распределению плотности. Восстанавливаемая плотность искалась в виде сеточной функции, заданной в узлах (рис. 9, 10). Значения плотности в промежутках восполнялись интерполяционными сплайнами. Для увеличения точности в искомом распределении плотности выделялись разрывы, а сплайны строились по возможности вдоль слабых градиентов плотности.

Значение плотности в узлах определялось из условий минимума функции $G(\vec{p})$:

$$G(\vec{p}) = \sum_{i,j} (F(x_j, t_i) - F'_p(x_j, t_i))^2$$

$$F'_p(x_j, t_i) = \int_{-\sqrt{R_0^2 - x_j^2}}^{\sqrt{R_0^2 - x_j^2}} \rho_{\vec{p}}(t_i, \sqrt{x_j^2 + y^2}) dy$$

\vec{p} - набор искомых значений плотности в узлах, $F(x_i, t_i)$ - экспериментальная тень, $F'(x_i, t_i)$ - тестируемая тень. Поиск минимума

осуществлялся численно с использованием симплекс метода. Результаты восстановления представлены на рис. 6.3.

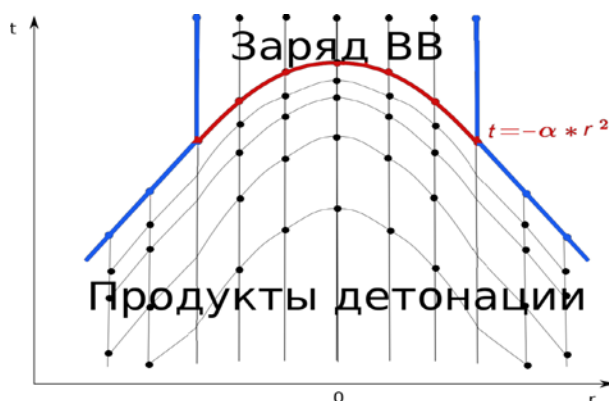


Рисунок 9. Схема построения аппроксимационной сетки для восстановления плотности. Толстые линии – разрывы в плотности, тонкие линии – кривые, вдоль которых строятся интерполяционные сплайны, точки – места, где задается варьируемое значение плотности

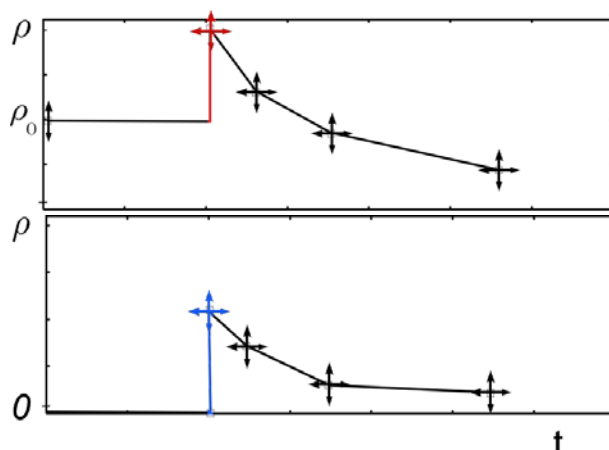


Рисунок 10. Аппроксимация зависимости плотности от времени для фиксированного радиуса: сверху – для радиуса внутри заряда, внизу – снаружи.

Проведенные тестовые эксперименты продемонстрировали, что физический пуск станции «Детонация» позволит решать основные задачи физика взрыва на новом экспериментальном уровне. Несколько организаций обсуждают возможность проведения экспериментов на станции «Детонация». Это ФРЯЦ ВНИИТФ, ФРЯЦ ВНИИЭФ, Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, ИПХФ РАН, ИХТТМ СО РАН.

7 Разработка метода послойного сканирующего РФА в конфокальной схеме

Рентгеновский микроанализ на пучках синхротронного излучения (Микро-РФА-СИ) –

это неразрушающий метод исследования элементного состава образцов различной природы (археологического, космического происхождения, биологические, геологические образцы и др.) [19,20]. Метод основан на анализе спектра вторичного флуоресцентного излучения и обладает повышенной массовой и пространственной чувствительностью.

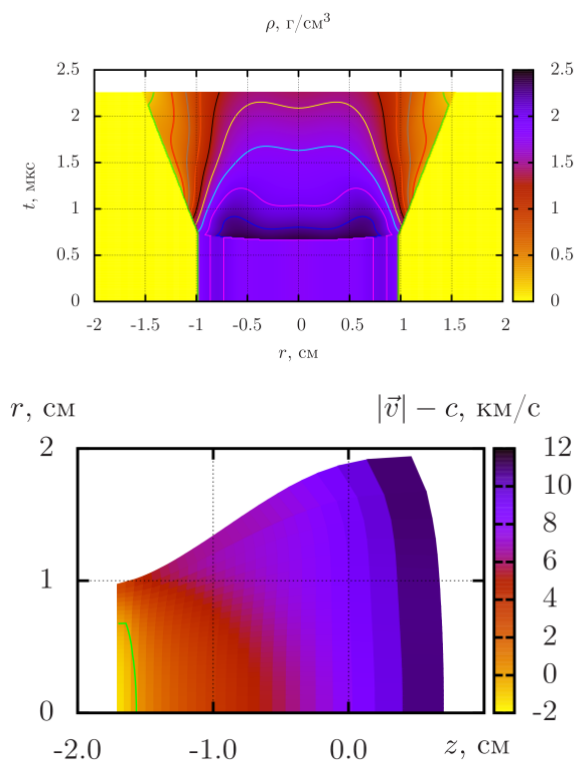


Рисунок 11. Заряд БТФ. (А): распределение плотности на расстоянии 2 см от инициируемого торца. (Б): звуковая граница при детонации БТФ.

В литературе [20] выделяют три направления развития метода: многомерное картирование, сканирование по глубине, детальный анализ микропроб, а также послойный двумерный элементный анализ. На основе станции РФА-СИ накопителя ВЭПП-3 (Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения) была создана установка «Микро-РФА», на которой проведены работы по всем этим направлениям развития метода. Был проанализирован набор разнородных тестовых и реальных образцов [21,22]. В проведенных экспериментах исследовалось относительное изменение спектральных линий флуоресцентного излучения, что является предметом анализа качественного микро-РФА. Прделанная работа является важным заделом для последующей разработки количественных методик микро-РФА.

С целью исследования практических возможностей метода, реализованного на установке «Микро-РФА», в части его применения в послойном элементном микроанализе нами был проведен демонстрационный эксперимент. В качестве объекта анализа была выбрана латунная сетка с внедренными в нее частицами гидроксида стронция $\text{Sr}(\text{OH})_2$. Результат в виде распределения сигнала от регистрируемого флуоресцентного излучения от линий $\text{K}\alpha$ меди и стронция в зависимости от положения точки фокуса установки в исследуемом слое образца (послойные флуоресцентные карты) показан на рис. 12. На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что в послойном двумерном микроанализе на основе метода микро-РФА можно исследовать реальные образцы, состоящие из нескольких химических элементов, с пространственным разрешением, близким к ожидаемому (15-25 мкм, в зависимости от энергии фотонов линии флуоресцентного излучения).

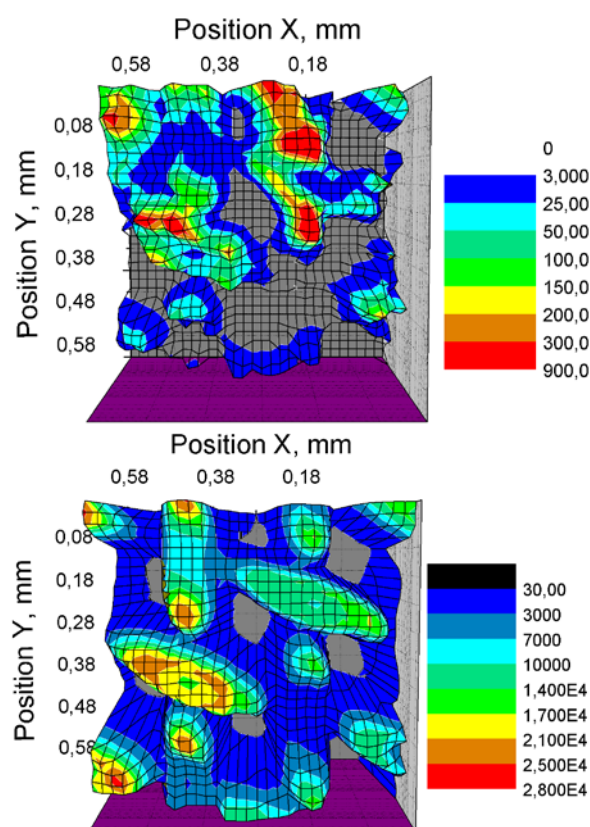


Рисунок 12. Распределение флуоресцентного сигнала в зависимости от положения точки фокуса установки в исследуемом слое образца – латунной сетки с внедренными в нее частицами гидроксида стронция. Слева – сигнал от стронция, справа – от меди.

8 Разработка методов исследования электрохимических систем *in situ* с использованием жесткого рентгеновского диапазона

Теоретически 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 (рис. 13).

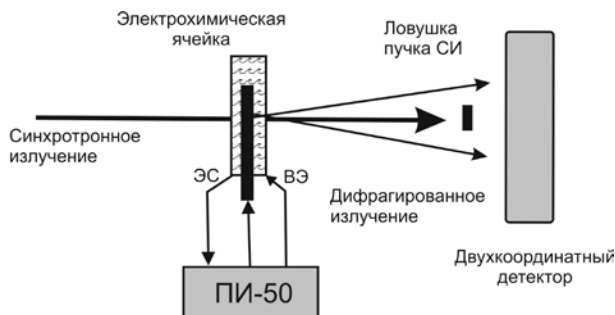


Рисунок 13. Схема проведения электрохимических экспериментов на пучке синхротронного излучения. ЭС – электрод сравнения, ВЭ – внешний электрод, ПИ-50 – потенциостат.

Основная проблема коммерческих рентгеновских трубок, используемых в рентгено-структурном анализе, и препятствующая их использованию для исследования процессов на границе электролит-раствор – это ограниченный спектральный диапазон излучения. Мягкое рентгеновское излучение сильно рассеивается в электролите, что препятствует как первичному, так и дифрагированному излучению проходить через электролит.

Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что переход в жесткую область излучения – 30 кэВ и более позволяет преодолеть эту проблему. Решение проблемы рассеяния излучения в электролите позволило провести несколько исследований процессов, происходящих на границе раздела электролит – твердое тело. В частности, было исследовано образование гидридов никеля. Исследована динамика изменения кристаллической решетки гидроксида никеля с момента образования зародышей до развития устойчивой фазы. Обнаружено, что если в начальный момент параметр решетки гидроксида никеля равен 3.605 \AA , то при достижении предельной концентрации гидроксида никеля в металлической матрице параметр его решетки возрастает до 3.717 \AA .

Принято считать, что возникновение дефектов в металле при наводороживании обусловлено тем, что водород, встречая поры,

трещины и другие несплошности, собирается в них, рекомбинируя в молекулярную форму. В результате постоянного притока водорода в полостях создается высокое давление, приводящее к деформации и локальным разрушениям решетки кристалла.

В эксперименте обнаружено, что практически одновременно с началом изменения рентгенограммы никеля начинается процесс образования метастабильной фазы гидроксида никеля – появляются рефлексы от плоскостей (111), (200), (220), (311), (222), (400). Рефлексы гидроксида никеля смещены в сторону меньших углов дифракции относительно рефлексов никеля, так как параметр решетки новой фазы на 6% больше.

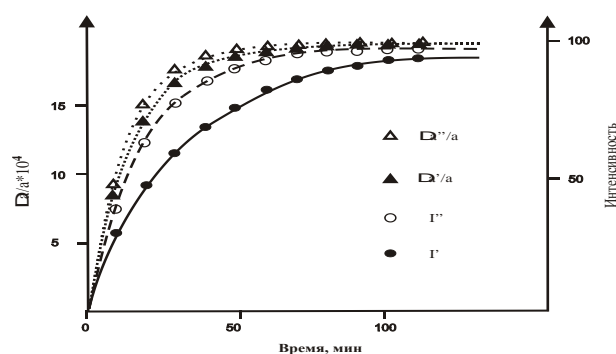


Рисунок 14. Экспериментальные кривые изменения параметра решетки никеля ($\Delta a'$ — при первом наводороживании; $\Delta a''$ — при втором) и суммарной интенсивности рефлексов гидроксида никеля в процессе его образования (I' — при первом цикле наводороживании; I'' — при втором).

Динамика роста интенсивности рефлексов гидроксида никеля в процессе катодного наводороживания отражена на рисунке 14. На начальной стадии образования новой фазы рефлексы гидроксида никеля сильно уширены, что свидетельствует, вероятно, о малых размерах зародышей новой фазы в матрице никеля. В процессе наводороживания зародыши гидроксида никеля увеличиваются в размере и приближаются к $L=200 \text{ \AA}$ (здесь нами сделано предположение, что размер зародыша совпадает с областью когерентного рассеяния $\langle L \rangle$). Одновременно обнаружено, что на начальных стадиях образования новой фазы параметр решетки гидроксида никеля отличается от параметра решетки исходного металла всего на 3%, а не на 6%, как было измерено после окончания процесса катодного наводороживания. В процессе роста гидридной фазы параметр решетки гидроксида никеля увеличивается и приближается к 3.717 \AA .

Анализируя данные по изменению параметра решетки никеля и динамики образования гидроксида никеля, можно заключить, что параметр решетки изменяется быстрее, чем образуется новая фаза. Это свидетельствует о том, что сначала водород проникает в междоузлия кристаллической решетки, создавая там избыточную концентрацию (известно, что концентрация водорода в междоузлиях матрицы металла линейно связана с изменением параметра решетки), и только после этого начинается образование гидроксида никеля. Так, при первом цикле наводороживания за 40 мин концентрация водорода в матрице достигает 90% своего предельного значения, в то время как гидроксида никеля образуется только 69% от своего предельного значения.

9 Разработка методов исследования основных параметров фильтров для ВУФ и мягкого рентгеновского диапазона

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 (рисунок 15).

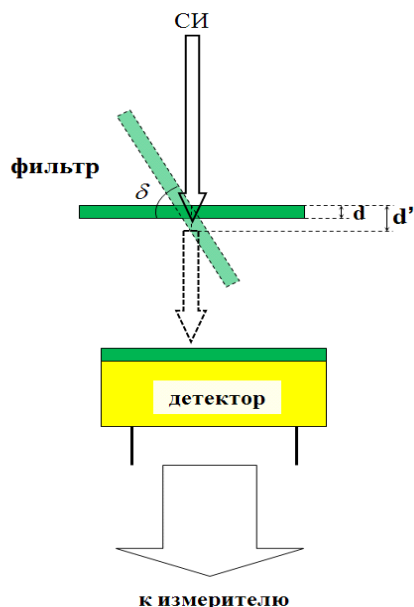


Рисунок 15. Схема метода самокалибровки фильтра. Монохроматический пучок СИ проходит сквозь калибруемый фильтр и попадает на детектор под разными значениями угла δ . Измерение этой зависимости позволяет восстановить абсолютное значение спектрального пропускания фильтра при $\delta=0^\circ$.

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.

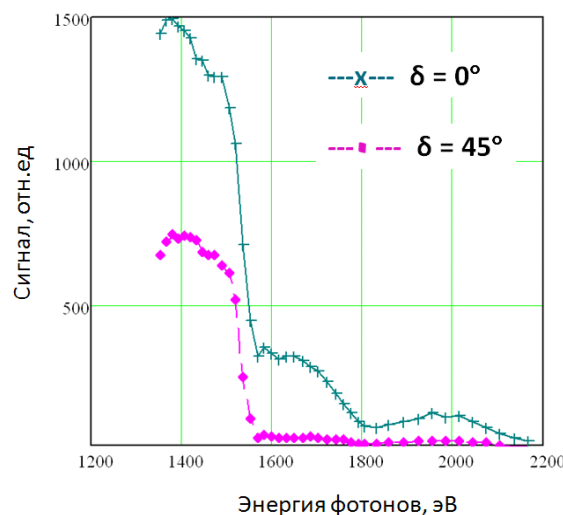


Рисунок 16. Результаты измерений сигнала детектора после фильтра для разных углов δ .

На основании данных, приведенных на рис. 16, вычисляется спектральное поглощение фильтра и поверхностная плотность его материала. Для проверки корректности модели проводится сравнение полученного спектрального поглощения с расчетным (рисунок 17).

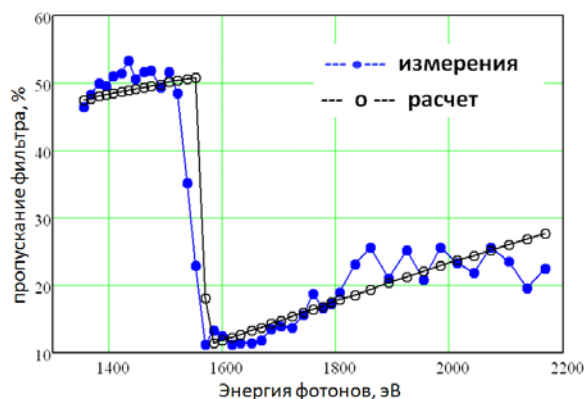


Рисунок 17. Сравнение измеренного пропускания фильтра и рассчитанного на основании его толщины и табличных данных.

Заключение

В процессе работы по проекту в 2015 году обеспечено выполнение регулярных фундаментальных и прикладных научных исследований на пучках синхротронного излучения из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М 19-ю 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».

За отчетный период модернизирована система непрерывного радиационного контроля в бункере СИ ВЭПП-4М, созданы новые экспериментальные станции для работ с пучками СИ на накопителе ВЭПП-4М: станция рентгеновской фазоконтрастной интроскопии и РФА, станция «Детонация», станция диагностики процессов горения с использованием СИ ВУФ диапазона. Разработаны методы исследования реальных промышленных и специзделий (диаметром до 40 мм) во время детонации методом томографии, метод послойного сканирующего РФА в конфокальной схеме, методы исследования электрохимических систем *in situ* с использованием жесткого рентгеновского диапазона, метод исследования основных параметров фильтров для ВУФ и мягкого рентгеновского диапазона.

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] Генцелев А.Н., Гольденберг Б.Г., Зелинский А.Г., Лемзяков А.Г. Бериллиевые рентгенолитографические шаблоны // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. - № 1. - С. 58. То же: Gentselov, A.N., Goldenberg, B.G., Zelinsky, A.G., Lemzyakov, A.G. Beryllium X-ray lithography templates // Journal of Surface Investigation. - 2015. – Vol. 9, Iss. 1. - P.53-61.
- [2] Легкодимов А.А., Купер К.Э., Гольденберг Б.Г., Золотарев К.В. Высокоразрешающие фазово-контрастные изображения, полученные с помощью рентгеновского интерферометра Тальбота в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. - 2015. - № 2 (86). - С. 67-71.
- [3] Легкодимов А.А., Купер К.Э., Назьмов В.П., Колмогоров Ю.П. Использование жесткого рентгеновского излучения для определения минимальных пределов обнаружения редкоземельных элементов методом РФА-СИ // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 116-121. – То же: Legkodymov, A.A., Kuper, K.E., Nazmov, V.P., Kolmogorov, Y.P. Applying hard X-rays to determination of the minimum detection levels of rare earth element by the XRFA-SR method // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2015. – Vol. 79, № 1. – P. 103-108.
- [4] Скуридин Г.М., Чанкина О.В., Легкодимов А.А., Багинская Н.В., Куценогий К.П. Поглощение химических элементов корой сибирской облепихи (*Hippophae Rhamnoides L. SSP. Mongolica Rousi*) // Химия в интересах устойчивого развития. - 2015. - Т. 23, № 1. - С. 71-76.
- [5] Gluskin, E., Pindyurin, V. Memorable Years for Synchrotron Radiation at the Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk // Synchrotron Radiation News. – 2015. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 40-43.
- [6] Алешаев А.Н., Мишнев С.И., Пищенко С.М., Ровенских А.Ф., Селиванов А.Н., Селиванов П.А., Федотов М.Г. Разработка системы 2D-стабилизации пучков СИ накопителя ВЭПП-3 // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 6-10. – То же: Aleshaev A.N., Mishnev S.I., Pischenyuk S.M., Rovenskikh A.F., Selivanov A.N., Selivanov P.A., Fedotov M.G. Developing a system for the 2D stabilization of SR beams in the VEPP-3 storage ring // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79, № 1.
- [7] Бадретдинова Л.Х., Костицын О.В., Смирнов Е.Б., Станкевич А.В., Тен К.А., Толочко Б.П. Исследование изотермического сжатия триаминотринитробензола с использованием синхротронного излучения // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 21-26. – То же: Badretdinova L.K., Kostitsyn O.V., Smirnov E.B., Stankevich A.V., Ten K.A., Tolochko B.P. Investigating the isothermic compression of triamino-trinitrobenzene with synchrotron radiation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2015. - V. 79, № 1. – P. 15-19.
- [8] Смирнов Е.Б., Музыря А.К., Костицын О.В., Бадретдинова Л.Х., Тен К.А., Пруэл Э.Р., Толочко Б.П., Шарифутдинов М.Р., Шмаков А.Н., Купер К.Э. Исследование микро-, мезо- и макроструктуры конденсированных гетерогенных взрывчатых веществ с использованием синхротронного излучения // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 27-33. – То же: Smirnov E.B., Muzyrya A.K., Kostitsyn O.V., Badretdinova L.C., Ten K.A., Prueel E.R., Tolochko B.P., Sharafutdinov M.R., Shmakov A.N., Kuper K.E. Investigation of micro-, meso-, and macrostructure of the condensed heterogeneous explosives using synchrotron radiation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2015. - V. 79, № 1. – P. 20-25.
- [9] Анчаров А.И. Рентгенодифракционные исследования процессов взаимодействия меди с индием с использованием синхротронного излучения // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 34-38. – То же: Ancharov A.I. X-ray diffraction investigation of interaction between copper and indium using synchrotron radiation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2015. - V. 79, № 1. – P. 26-30.
- [10] Храмова Е.П., Чанкина О.В., Андышева Е.В., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. Элементный состав видов рода *Pentaphylloides* (Rosaceae) дальнего востока // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 77-83. – То же: Khramova E.P., Chankina O.V., Andysheva E.V., Rakshun Y.V., Sorokoletov D.S. Elemental composition of species of the genus *Pentaphylloides* (Rosaceae) in the Russian Far East // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79, № 1. – P. 68-74.

- [11] Вазина А.А., Васильева А.А., Ланина Н.Ф., Забелин А.В., Корнеев В.Н., Кулипанов Г.Н. Рентгенодифракционное исследование наноструктурной динамики фибриллярных систем ткани волоса // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 84-91. – То же: Vazina A.A., Vasilieva A.A., Lanina N.F., Zabelin A.V., Kulipanov G.N., Komeev V.N. X-ray diffraction study of the nanostructural dynamics of fibrillar systems of hair tissue // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79, № 1. – P. 75-80.
- [12] Трунова В.А., Зверева В.В., Полосьяк Н.В., Кочубей Д.И., Кривенцов В.В., Купер К.Э., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. Исследование археологических находок из курганов знати народности Хунну (Ноин-Ула, Монголия) методами РФА-СИ, микро-РФА-СИ и XAFS // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 122-131. – То же: Trunova V.A., Zvereva V.V., Polosmak N.V., Kochubey D.I., Kriventsov V.V., Kuper K.E., Rakshun Y.V., Sorokoletov D.S. Investigating archaeological material from burials of the aristocracy of the Xiongnu people (Noiin-Ula, Mongolia) by means of SRXRF, XAFS, and micro-SRXRF // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79, № 1. – P. 109-117.
- [13] Степанова О.Г., Трунова В.А., Сидорина А.В., Зверева В.В., Мельгунов М.С., Петровский С.К., Крапивина С.М., Федотов А.П., Ракшун Я.В. Исследования донных осадков прогляциального озера Эхой (Восточный Саян) методом РФА-СИ // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 132-136. – То же: Stepanova O.G., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Rakshun Y.V. Investigating bottom sediments from proglacial Lake Ehoi (Eastern Sayan Ridge) by means of SRXRF // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79, № 1. – P. 118-121.
- [14] Дарьин А.В., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин Ф.А., Калугин И.А., Максимова Н.В., Маркович Т.И. Исследование сезонного геохимического сигнала в годовых слоях донных осадков оз. Донгуз-Орун методом сканирующего РФА с использованием микрокапиллярной рентгеновской оптики // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 137-140.
- [15] Дарьин А.В., Калугин И.А., Максимов М.А., Rogozin Д.Ю., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С. Реконструкция уровня оз. Шира за последние 1500 лет на годовой временной шкале (по данным рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения) // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 141-145.
- [16] Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В., Chu Guoqiang, Sun Qing, Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Rogozin Д.Ю. Микроаналитическое исследование годовых слоев в современных осадках оз. Беле // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 146-148.
- [17] Валеев Р.Г., Бельтюков А.Н., Кривенцов В.В., Мезенцев Н.А., Ветошкин В.М. EXAFS- и РФЭС-исследование наноструктур германия и арсенида галлия в матрицах пористого оксида алюминия // Известия РАН. Серия физическая – 2015. – Т. 79, № 1 – С. 160. – То же: Valeev R.G., Beltukov A.N., Vetoshkin V.M., Kriventsov V.V., Mezentsev N.A. EXAFS and XPS studies of germanium and gallium arsenide nanostructures in porous aluminum oxide matrices // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2015. - V. 79, № 1. – P. 144-148.
- [18] V.V.Pitulko, A.N.Tikhonov, E.Y.Pavlova, P.A.Nikolskiy, K.E.Kuper, R.N.Polozov. Early human presence in the Arctic: Evidence from 45,000-year-old mammoth remains // Science. – 2016 - Vol. 351. – P. 260-263.
- [19] Koen Janssens, Wout De Nolf, Geert Van Der Snickt, Laszlo Vincze, Bart Vekemans, Roberto Terzano, Frank E. Brenker. Recent trends in quantitative aspects of microscopic x-ray fluorescence analysis // Trends in Analytical Chemistry. - 2010. – V. 29, No. 6.
- [20] MacDonald C.A. Focusing polycapillary optics and their applications // X-Ray Optics and Instrumentation. 2010.
- [21] A. V. Dar'in, I. A. Kalugin, M. A. Maksimov, G. A. Tretyakov and Ya. V. Rakshun, "Scanning X-ray Fluorescence Microanalysis of Annual Layers in Samples of Lake Shira Bottom Sediments", Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2013. - Vol. 77, No. 2 - Pp. 185–187.
- [22] A.V.Dar'in, I.A.Kalugin and Ya.V.Rakshun. Studying Variations in the Elemental Composition of Annual Layers in Microsections of Lake Teletskoye Sediments by Means of Scanning X-ray Fluorescent Microanalysis Using Synchrotron Radiation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2013. - Vol. 77, No. 2 - Pp. 188–190.

№ 15.7.2 Исследования быстропротекающих процессов с наносекундным разрешением с использованием рентгеновского СИ

Введение

Объектом исследований являются фундаментальные вопросы физики поведения материалов в экстремальных условиях, а также проблемы взаимодействия детонационной волны с различными материалами.

Цель работы – Изучение структуры детонационной волны и ее воздействия на различные материалы. Изучение процесса конденсации твердых наночастиц в детонационной волне. Изучение воздействия ударной волны на различные материалы. Развитие методов малоуглового рассеяния и осесимметричной томографии на пучках рентгеновского синхротронного излучения на накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, разработка нового детектора DIMEX с улучшенным временным и пространственным разрешением и динамическим диапазоном.

В 2015 г. был получен стабильный пучок в канале с 7-миполусной змейкой и измерены его характеристики. Это дало возможность наладить регулярную работу на станции «Детонация» на ВЭПП-4М, провести испытания прототипов кремниевых сенсоров на пучке СИ на ВЭПП-4М и сформулировать предварительные требования к финальному сенсору для микрополоскового кремниевых детектора DIMEX.

Кроме того, на ВЭПП-3 продолжалась регулярная работа на станции «Экстремальное состояние вещества» с газовым детектором DIMEX, 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).

1 Изучение параметров пучка СИ в новом канале с 7-полусной змейкой и оптимизация его характеристик

В течение 2015 года на канале СИ ВЭПП-4М с 7-полусной 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. На рис.1 показана зависимость сигнала с одной полоски прототипа кремниевых сенсоров для детектора DIMEX-Si от длины линии пересечения пучка с сенсором. Результаты измерения сравниваются с данными, полученными 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.

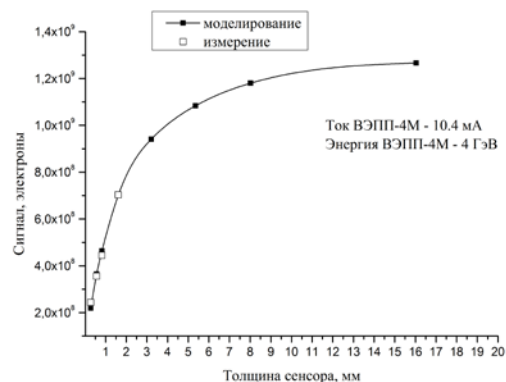


Рисунок 1. Сравнение моделирования сигнала в кремниевом сенсоре с результатами эксперимента. Толщина взаимодействия пучка СИ с материалом сенсора менялась поворотом относительно плоскости пучка.

На рис.2 приведен результат измерения профиля пучка СИ, проведенный с помощью того же прототипа кремниевых сенсоров с коллиматором шириной 0.2 мм на входе. Измеренный профиль сравнивается с расчетным. Видно, что расчетный профиль несколько уже измеренного, что можно объяснить угловым разбросом электронов в пучке ВЭПП-4М, который составляет около 80 микрорадиан.

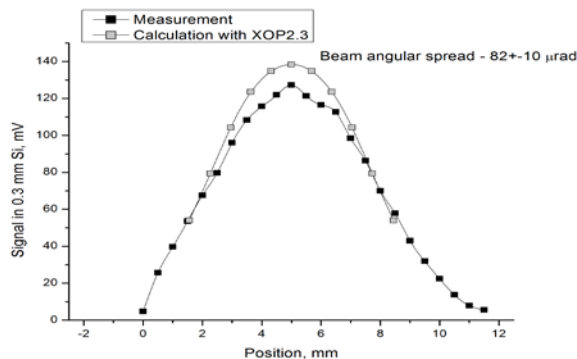


Рисунок 2. Сравнение расчетного профиля пучка СИ на ВЭПП-4М с результатом измерения с помощью прототипа кремниевых сенсоров.

2 Эксплуатация станции «Экстремальное состояние вещества» и «Детонация» с детекторами DIMEX на каналах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

В 2015 году продолжалась работа с детектором DIMEX на станции «Экстремальное состояние вещества» на ВЭПП-3 и началась регулярная работа на станции «Детонация» на ВЭПП-4М. В частности, изучалась 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. На рис.3 показан этот результат для зарядов на основе ВТФ.

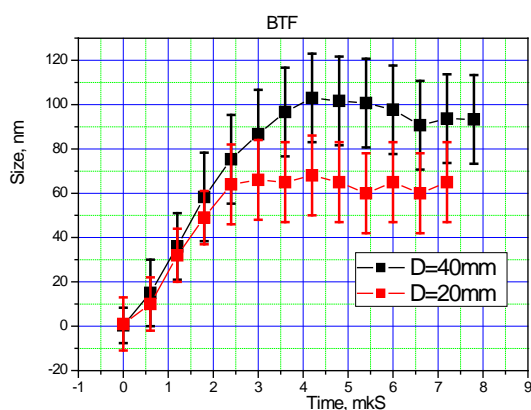


Рисунок 3. Зависимость среднего размера наночастиц, образующихся при взрыве заряда на основе ВТФ, диаметром 20мм и 40мм.

3 Продолжение испытаний детектора DIMEX с прототипом новой электроники.

В отчетном году были закончены испытания детектора DIMEX с прототипом новой электроники. На рис.4 показаны измеренные зависимости величины шума, приведенного ко входу в зависимости от величины емкости, подключенной ко входу электроники в различных режимах работы. 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.

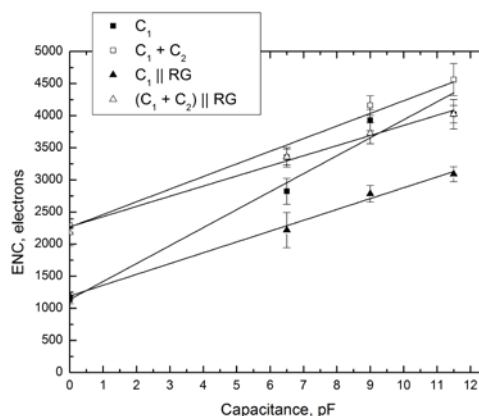


Рисунок 4. Величина шума, приведенная ко входу в прототипе чипа для газового DIMEX.

На рис.5 показана зависимость сигнала в двух соседних ячейках прототипа чипа DMXG12B от временного сдвига процесса регистрации и записи в память относительно момента пролета сгустка в накопителе. Видно, что в то время, когда в одной ячейке сигнал присутствует, в соседней ячейке сигнала нет. Это означает, что газовый детектор с такой электроникой может регистрировать сигналы от отдельных сгустков, следующих через 125 нс и не смешивать их.

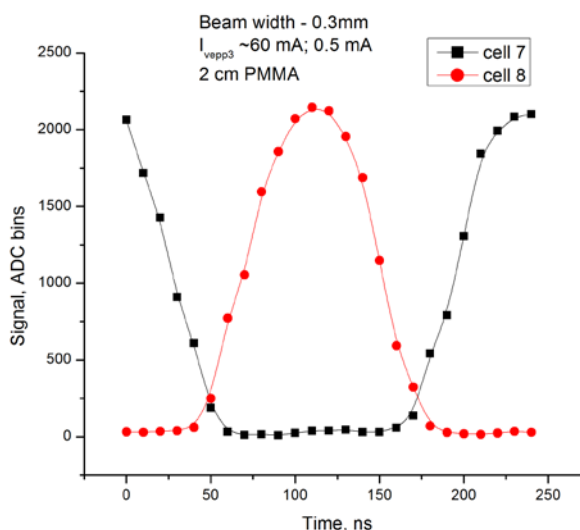


Рисунок 5. Зависимость сигнала от временного сдвига относительно пролета сгустка в накопителе в двух соседних ячейках прототипа чипа для газового детектора.

4 Исследование характеристик прототипа кремниевого сенсора для детектора DIMEX нового поколения

В течение 2015 года изучались характеристики прототипов сенсоров для кремниевого детектора DIMEX-Si, изготовленные 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 рис.6 показаны типичные сигналы с двух различных полосок прототипа от прямого пучка из 7-полюсной змейки при токе максимальном, достигнутом в этом сезоне токе в накопителе, 12,14 мА и энергии 4 ГэВ. Видно, что ширина сигнала по основанию с учетом переходного процесса на заднем фронте, который обусловлен паразитной индуктивностью подводящего монтажа, составляет менее 15 нс. Такая малая длительность сигнала позволит проводить эксперименты со сгустками, следующими через 20 нс.

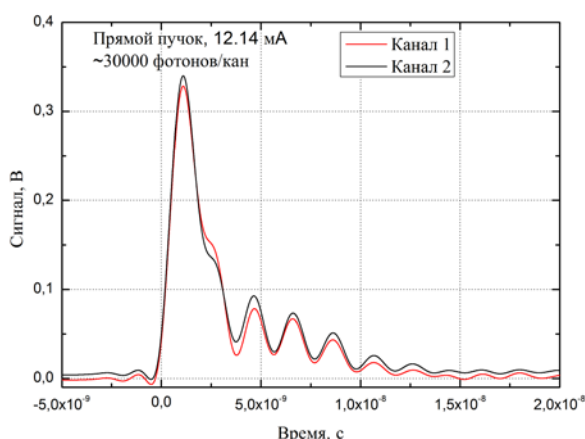


Рисунок 6. Форма сигнала с полоски прототипа кремниевое сенсора.

5 Разработка окончательного варианта новой электроники для газового детектора DIMEX

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 аналого-

вой памяти с возможностью чтения и записи с частотой до 10 МГц. На рис.7 показана топология чипа DMXG64.

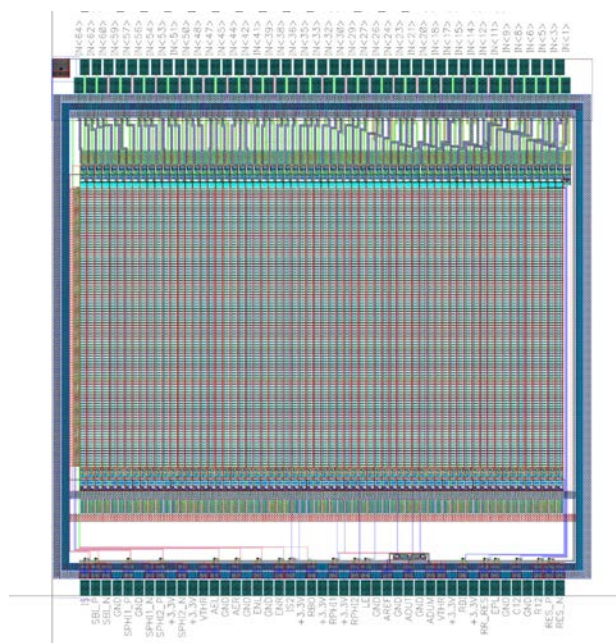


Рисунок 7. Топология чипа DMXG64.

Чипы были изготовлены осенью 2015 г. и к концу года были измерены их основные характеристики. На Рис.8 показана одна из характеристик, - зависимость сигнала на выходе чипа от заряда, инжектируемого на его вход. Видно, что линейность 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 (см. рис.4) динамический диапазон в грубом режиме составляет около 1000.

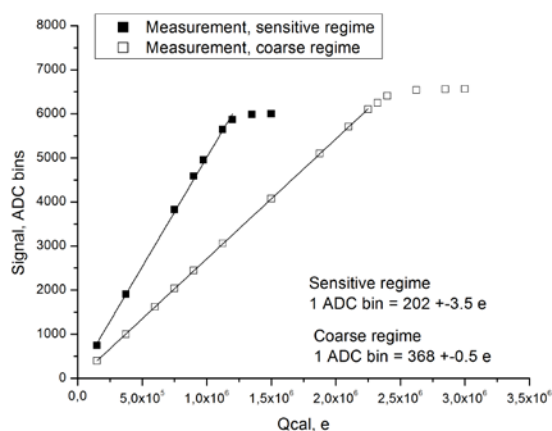


Рисунок 8. Зависимость сигнала от заряда, инжектируемого на вход канала чипа DMXG64.

Кроме того, была измерена также временная характеристика, подобная показанной

на рис.5 для прототипа, и показано, что полноформатный чип может успешно работать в режиме со 125 нс циклом.

6 Разработка окончательного варианта кремниевого сенсора для детектора DIMEX нового поколения

В результате испытаний прототипов кремниевых микрополосковых сенсоров были сформулированы требования к финальному варианту сенсора. На рис.9 показана микрофотография прототипа, на которой видны полоски с шагом 50 мкм с площадками для микросварки для присоединения электроники, а также охранное кольцо, задача которого отводить на нулевой полюс напряжения смещения значительные импульсные токи, возникающие при регистрации пучка СИ в кремнии.

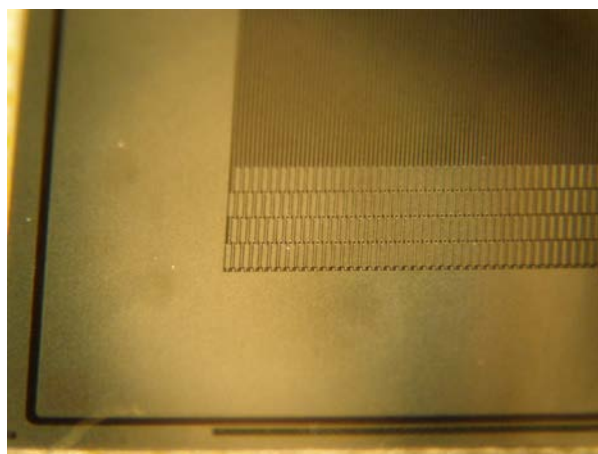


Рисунок 9. Фотография прототипа сенсора микрополоскового кремниевого детектора.

Импульсы тока в каждом канале сенсора будут составлять до нескольких сот миллиампер и, таким образом, падение напряжения на балластных резисторах 100 Ом будет достигать десятков вольт. Такие импульсы напряжения нельзя подавать на вход чипов, поэтому необходимо разместить еще один резистор в каждом канале сенсора, который будет фактически осуществлять деление напряжения, подаваемого на вход электроники. Величина сопротивления таких резисторов должна составлять около 10 кОм. Кроме того, необходимо обеспечить возможность присоединения охранного кольца к нулевому полюсу высокого напряжения по всей длине детектора. Все эти требования должны быть окончательно сформулированы после испытаний прототипа кремниевого сенсора совместно с прототипом чипа для кремниевого микрополоскового детектора,

изготовление которого начато в конце 2015 г. и будет закончено в 2016 г.

Заключение

В 2015 г. получен устойчивый пучок СИ в канале ВЭПП-4М с 7-миполюсной змейкой. Измерен профиль пучка и интенсивность пучка (мощность в пучке), измеренные величины соответствуют расчету.

В течение отчетного года велась регулярная эксплуатация станции «Экстремальное состояние вещества» на накопителе ВЭПП-3 и начата эксплуатация станции «Детонация» на канале с 7-миполюсной змейкой на ВЭПП-4М.

Были завершены исследования прототипа газового детектора DIMEX с новым чипом DMX12B и на основе проведенных исследований разработан и изготовлен полноформатный чип DMXG64.

На основе данных, полученных в процессе изучения прототипов сенсора для микрополоскового кремниевого детектора, формулируются требования к финальному сенсору, разработка которого будет завершена после окончания испытания прототипов в 2016 г.

Список использованных источников

- [1] Тен К.А., Титов В.М., Кулипанов Г.Н., Аульченко В.М., Купер К.Э., Толочко Б.П., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Косов А.Н., Евдоков О.В., Шарафуудинов М.Р., Новые возможности исследования детонационных процессов на базе коллайдера ВЭПП-4. Стр. 99. "XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2015, Elbrus, Russia. Book of Abstracts. Moscow@Chemogolovka@Nalchik, 2015. ISBN 978-5-94691-536-6.
- [2] Титов В.М., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Толочко Б.П., Динамическая регистрация взрывных процессов разных масштабов. Международная конференция XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 23-27 марта 2015г. г., Сборник тезисов докладов. Саров. ВНИИЭФ. Стр.
- [3] Тен К.А., Титов В.М., Кулипанов Г.Н., Аульченко В.М., Купер К.Э., Толочко Б.П., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Косов А.Н., Евдоков О.В., Шарафуудинов М.Р., Экспериментальная станция по исследованию быстропротекающих процессов на базе коллайдера ВЭПП-4. Международная конференция XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 23-27 марта 2015г. г., Сборник тезисов докладов. Саров, ВНИИЭФ, стр. 361-364

№ 15.7.3 Развитие методов нанодиагностики на базе Новосибирского ЛСЭ

Введение

Развитие методов нанодиагностики на сегодняшний день является важной задачей как для фундаментальных исследований, так и для наукоемких технологий, в том числе в области биомедицинской диагностики. Одним из перспективных направлений в данной области является создание плазмонных устройств для исследования и диагностики конденсированных сред. Реализация данной задачи требует решения вопросов, связанных с изучением распространения поверхностных плазмонов по плоским и изогнутым металл-диэлектрическим поверхностям, в том числе имеющих структурированную поверхность. Некоторые биологически важные молекулы, например, протеогликаны обладают оптической активностью. Данное свойство можно использовать для исследования и диагностики таких молекул с помощью поляриметрии, что требует развития методов и техники терагерцовой поляриметрии.

1 Исследование причин потерь энергии при распространении плазмонов вдоль плоских и изогнутых поверхностей

Подготовлены и испытаны на экспериментальном стенде системы измерений длины пробега поверхностных плазмонов вдоль плоских и изогнутых поверхностей.

Захват поверхностной волны осуществляется методом дифракции сфокусированного излучения на краю $\frac{1}{4}$ -цилиндра (см. рис. 1). Источником излучения служил Новосибирский лазер на свободных электронах [1].

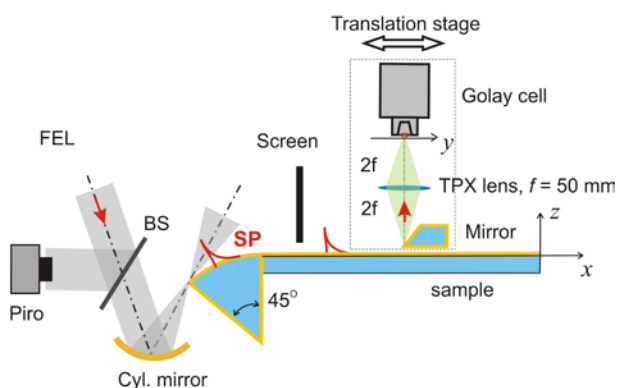


Рисунок 1. Экспериментальная схема измерения длины пробега поверхностных плазмонов

Сформированный поверхностный плазмон распространялся далее вдоль плоского образца, примыкающего вплотную к элементу захвата. 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 TPX (в оптической схеме $2f-2f$) или матричный микроболометрический приемник [2, 3]. Для повышения чувствительности использовался синхронный детектор SR-830. Первоначально длина пробега измерялась по точкам вдоль трека ПП прижатием зеркала вплотную к образцу. Для упрощения сбора и записи измерений система детектирования была модернизирована: детектор и линза помещались на автоматизированной механической подвижке. Смещая позиционер, можно было измерять интенсивность поля ПП вдоль поверхности образца.

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 (оптимальной) толщине d_0 и постепенно уменьшается (см. рис. 2).

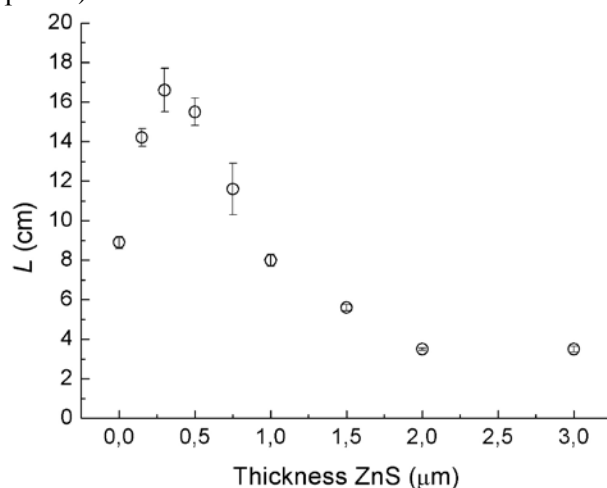


Рисунок 2. Длина пробега поверхностных плазмонов в зависимости от толщины слоя ZnS на золоте, измеренная на образцах с большой шероховатостью поверхности

Мы предположили, что существенную роль в данном эффекте играют радиационные потери ПП на неоднородностях поверхности. Рост длины пробега при очень малых толщи-

нах диэлектрика мог быть вызван уменьшением радиационных потерь. 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 d_0 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. [4]

Измерения с аналогичными структурами золото-ZnS, нанесенными на цилиндрические поверхности, показали, что ПП по таким поверхностям распространяются, и длины пробега имеют примерно тот же порядок, как и на аналогичных плоских поверхностях.

2 Анализ и моделирование возможных типов поверхностно-плазмонных устройств в терагерцовом диапазоне

Разработан проект создания плазмонного сенсора для диагностики диэлектрических веществ, в том числе биологических объектов, с использованием "spoof"-плазмонов, распространяющихся по металлическим структурированным поверхностям.

При создании плазмонных устройств важным параметром является потери поверхностных волн при распространении по различным металл-диэлектрическим поверхностям. Из-за слабой локализации поля ПП над поверхностью проводника в терагерцовом диапазоне, ПП могут легко переизлучаться в объемные волны на неоднородностях поверхности, вызывая радиационные потери. Для уменьшения радиационных потерь и усиления взаимодействия поля ПП с поверхностью можно использовать периодические структурированные металлические поверхности. Поверхностные плазмоны, распространяющиеся по таким структурам, в англоязычной литературе называют "spoof"-плазмонами. Был проведен теоретический анализ по поиску оптимальных параметров структур прямоугольного профиля для увеличения локализации поля ПП. Данные структуры могут использоваться для исследования диэлектрических свойств различных веществ, нанесенных на такие поверхности, в частности в спектроскопии.

Была написана программа расчета оптимальных параметров на языке программирования СИ, а также выполнены численные рас-

четы длин пробега в зависимости от параметров структуры в MathCad. Характерный вид зависимости длины пробега "spoof"-плазмона от периода одномерной золотой гофрированной поверхности показан на рис. 3.

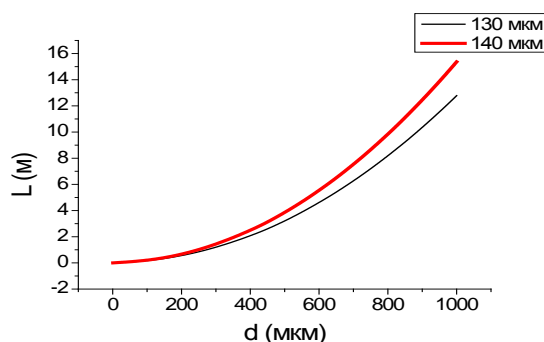


Рисунок 3. Зависимости длины пробега поверхностной волны от величины периода решетки d , вычисленные для длин волн 130 и 140 мкм. Графики строились для одномерной гофрированной структуры, покрытой непрозрачным слоем золота. Ширина канавок составляла 60 мкм, глубина 10 мкм.

В результате для прямоугольного профиля, покрытого непрозрачным слоем золота, были найдены оптимальные период, ширина и глубина канавок, при которых длина пробега ПП после нанесения на такую структуру исследуемого диэлектрика значительно уменьшалась. Было также обнаружено, что при некоторых параметрах структуры показатель преломления для поверхностной "spoof"-волны становился отрицательным.

На следующем этапе теоретического анализа планируется провести численное моделирование распределения поля "spoof"-плазмона вблизи такой структуры.

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 [5].

3 Экспериментальное исследование и оптимизация методов регистрации сигналов терагерцового ближнепольного микроскопа с лазером на свободных электронах в качестве источника излучения

Подготовлен и испытан на экспериментальном стенде синхронный детектор с элек-

тронной схемой накопления импульсов, предназначенный для регистрации интенсивности импульсного терагерцового излучения ЛСЭ.

Для регистрации излучения, рассеянного с кончика зонда ближнепольного микроскопа, необходим детектор, обладающий высокой чувствительностью. Одним из таких приемников является имеющийся у нас высокоскоростной криогенный болометр на горячих электронах. Для повышения чувствительности, для данного приемника нами был разработан и создан синхронный детектор с электронной схемой накопления импульсов. Данное устройство позволяет накапливать только полезный сигнал от импульсов терагерцового излучения ЛСЭ, значительно уменьшая вклад шума.

На данном этапе работ было проведено тестирование и измерение динамического диапазона синхронного детектора совместно с болометром на горячих электронах на излучении ЛСЭ. Первоначально был измерен динамический диапазон болометра, который составил примерно $D_{\text{бол}}=50$ (34 Дб). Следовательно, используя болометр на горячих электронах без синхронного детектора можно измерять сигнал, меняя его величину в 50 раз, при этом сигнал не должен превышать 1 В.

Для увеличения чувствительности приемной системы к болометру был подключен синхронный детектор (СД) с цифровой схемой задержки синхроимпульсов. Для этого сигнал с выхода усилителя криогенного детектора подавался через коаксиальный кабель на вход СД. К другому входу СД подавался опорный сигнал с черенковского датчика электронов ЛСЭ, который привязан к импульсам терагерцового излучения и имеет частоту повторения 5,6 МГц. Длительность импульсов опорного сигнала составляла 5 нс, амплитуда 2,5 В. С помощью переключателей цифровой линии задержки СД, размещенных на передней панели блока управления, устанавливалась такая временная задержка, чтобы терагерцовые импульсы болометра попали во временной интервал синхроимпульсов (см. рис. 4).

В результате максимальный коэффициент усиления полезного сигнала синхронным детектором от минимального уровня мощности излучения, измеримого болометром, составил примерно 40. Тогда полный динамический диапазон болометрического приемника совместно с синхронным детектором составил примерно

$$D \approx D_{\text{бол}} \times 40 = 50 \times 40 = 2000 \text{ или} \\ D \approx 66 \text{ Дб.}$$

Минимальная регистрируемая интенсивность излучения болометра, подключенного к син-

хронному детектору, составила примерно 45 нВт.

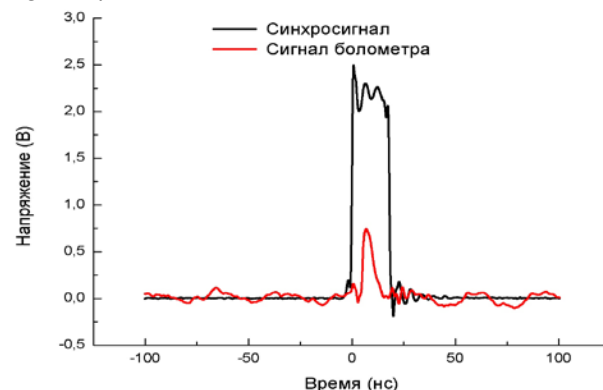


Рисунок 4. Сигнал с болометра совмещен по фазе с синхросигналом

Согласно паспорту имеющегося у нас акустооптического приемника Голея GC-1D, при оптимальной частоте модуляции 10 Гц максимальная регистрируемая мощность составляет 10^{-6} Вт, минимальная $0,2 \cdot 10^{-9}$ Вт (уровень шума), тогда динамический диапазон приемника равен 5000. Т.е. уровень сигналов (максимальный и минимальный), регистрируемых ячейкой Голея примерно на два порядка меньше, чем у болометра с синхронным детектором, а их динамические диапазоны сравнимы.

4 Разработка, создание и испытание терагерцового поляриметра с элементом нарушенного полного внутреннего отражения

Подготовлен и испытан на экспериментальном стенде терагерцовый поляриметр с блоком нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), с использованием в качестве источника монохроматического терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах.

Биофизические оптические измерения в настоящее время широко используются, в том числе и в ТГц диапазоне частот. Диагностика углеводных молекул, например, в значительной степени основана на наличии оптических стереоизомеров (энантиомеров) молекул, обладающих совершенно одинаковыми физическими и химическими свойствами, но обладающими оптической киральностью. Поскольку большинство молекул протеогликанов - класса сложных биологических молекул, состоящих из корового белка и одной или нескольких полисахаридных цепей - являются киральными, то методы поляриметрии являются едва ли не единственными для их исследования и диагностики. Молекулы протеогликанов выполняют в организме множество разнообразных функций.

Протеогликианы могут выступать в качестве ко-рецепторов для факторов роста, способствуют клеточной адгезии к внеклеточному матриксу, а также участвуют и в патологических процессах. Достоверно известно, что в процессе злокачественной трансформации изменяются количественные и качественные характеристики протеогликанов. И, хотя причина этих изменений в трансформированных клетках не известна, в последние годы появляется всё больше данных, свидетельствующих о том, что она заключается в нарушениях процесса биосинтеза протеогликанов, а в следствие и изменение киральности.

Для исследования киральности биологически важных молекул в водных растворах и порошках нами создан поляриметр [6] по схеме интерферометра Майкельсона с модулем НПВО, схема которого изображена на рис. 5, с использованием в качестве источника монохроматического терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах. Измерения проводятся для определенной длины волны, а для получения спектральной зависимости они повторяются при нескольких длинах волн. Направления векторов поляризации, которые показаны в кружках рядом с поляризаторами, в плечах интерферометра были установлены ортогонально друг другу с помощью фотолитографических поляризаторов, расположенных в каждом плече. В ходе проведения тестовых испытаний было обнаружено влияние обратного отражения от оптических поляризаторов. Одно из зеркал устанавливалось на линейный актуатор, управляемый от компьютера. Точность позиционирования начального положения составляла не хуже 0.3 мкм. При длине волны 140 мкм это обеспечивало хорошую воспроизводимость начальной разности фаз линейно поляризованных волн в двух плечах интерферометра. Изменение длины этого плеча интерферометра приводило к фазовому сдвигу между ортогональными поляризациями волны в плечах интерферометра. Этот фазовый сдвиг в свою очередь при перемещении актуатора на половину длины волны (изменение оптической длины плеча на одну длину волны) обеспечивал изменение характера поляризации от линейной через правовращательную эллиптическую снова к линейной, а затем через левовращательную эллиптическую к линейной. Таким образом, система позволяет исследовать отклик вещества при отражении от рабочей поверхности электромагнитных волн с поочередно меняющимся направлением вращения эллиптической (круговой) поляризации, а, следовательно, исследо-

вать дихроические среды. В качестве детектора излучения использовался оптоакустический приемник (ячейка Голея).

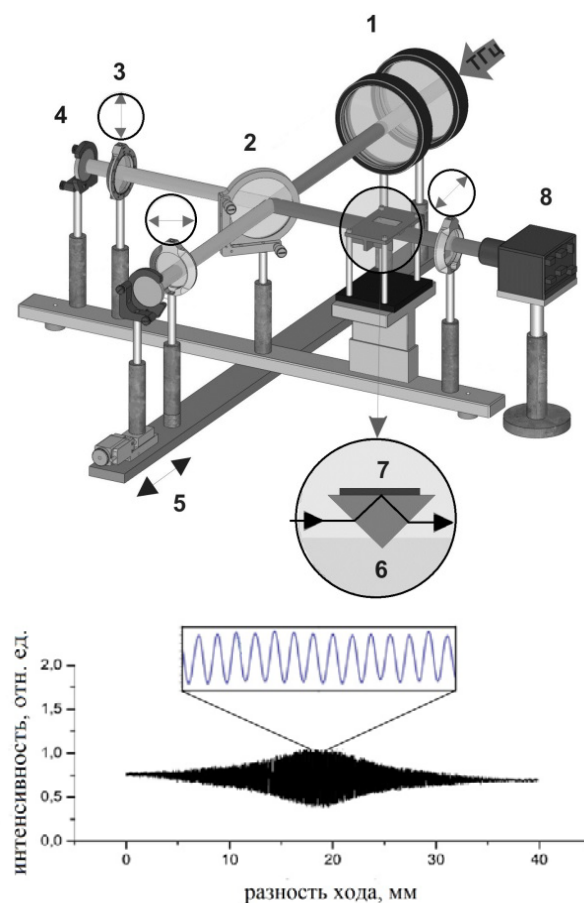


Рисунок 5. Схема поляриметра (сверху) 1 – система двух поляризаторов, для изменения интенсивности излучения, 2 – пленочный светоделитель, 3 – поляризаторы в плечах интерферометра, 4 – зеркало, 5 – перемещающееся зеркало, 6 – НПВО – призма, 7 – сильнопоглощающий образец, 8 - детектор Голея; интерферограмма, полученная при перемещении зеркала на расстояние порядка 40 мм (внизу)

Заключение

На данном этапе выполнения научно-исследовательской работы исследованы характеристики терагерцовых поверхностных плазмонов, распространяющихся по плоским и изогнутым металл-диэлектрическим поверхностям. Обнаружено, что существенную роль в затухании поверхностной волны вдоль линии трека играют "радиационные" потери на неоднородностях поверхности. Обнаружено, что покрытие металла тонкими (до 100 нм) диэлектрическими пленками существенно уменьшает радиационные потери и увеличивает длину пробега поверхностных плазмонов. Проведены численное моделирование и анализ распространения поверхностных волн вдоль микро-

структурированных металлизированных поверхностей. Найдены оптимальные параметры структур прямоугольного профиля для плазменной диагностики диэлектрических конденсированных сред. Разработан, создан и протестирован синхронный детектор, позволяющий существенно увеличить чувствительность и динамический диапазон болометра на горячих электронах для регистрации импульсного терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах. Разработаны методы спектральных и поляризационных исследований водных растворов сильнопоглощающих веществ, представляющих интерес для медицинских приложений.

Список использованных источников

- [1] G.N. Kulipanov, E.G. Bagryanskaya, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.V. Getmanov, S.L. Kiselev, B.A. Knyazev, V.V. Kubarev, S.E. Peltek, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinsky, S.L. Veber, and N.A. Vinokurov. Novosibirsk free electron laser: Facility description and recent experiments. *IEEE Trans. on THz Sci. and Technol.* V. 5, No. 5, pp. 798-809.
- [2] Б. А. Князев, В. В. Герасимов, М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. А. Никитин, Ю.Ю. Чопорова. Матричные болометрические приемники в исследованиях на терагерцовом лазере на свободных электронах. (приглашенный доклад). *Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоники (с участием иностранных ученых) ФОТОНИКА 2015*, 12-16 октября 2015 г., Новосибирск. Тезисы докладов, С. 81.
- [3] B. A. Knyazev. Using high-power THz radiation imaging systems for implementation of classical optical techniques in the terahertz range. *Advanced Photonics Congress*, 27 June-1 July, Omni Parker House Hotel, Boston, Massachusetts, USA. Paper SeM4D.4.pdf, Advanced Photonics, 2015 OSA.
- [4] Vasily Gerasimov; Boris Knyazev; Alexey Nikitin; Alexey Lemzyakov Study of radiative losses of terahertz surface plasmons on plane metal-dielectric interfaces. *40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Hong Kong, 23 - 28 August 2015, art. no. 3133427, Scopus, Эл. Ресурс <http://www.irmmw-thz2015.org/>
- [5] V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, A. K. Nikitin, and G. N. Zhizhin Experimental investigations into capability of terahertz surface plasmons to bridge macroscopic air gaps // *Opt. Express* **23**(26), 33448-33459 (2015).
- [6] Yulia Yu. Choporova, Ivan A. Azarov, Vasily A. Shvets, Boris A. Knyazev. Measurement of the complex refractive index of liquids and biological substances in the terahertz range at the NovoFEL facility. *Proc. 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Hong Kong, 23 - 28 August 2015, art. no. 3133975, Scopus, Эл. Ресурс <http://www.irmmw-thz2015.org/>

Участие ИЯФ в международных программах и проектах.

Наименование программы/проекта	Наименование организатора программы	Наименование участников – соисполнителей	Сроки реализации программы	Описание полученных результатов
LHC	CERN, Швейцария	В проекте Большого адронного коллайдера участвует ряд российских организаций	Начало: 2000 Окончание: 2030	Исследована возможность увеличения светимости LHC с помощью плоских пучков
ITER	ITER, Франция	Национальные агентства России, ЕС, США, Кореи, КНР, Индии и Японии	Начало: 2007 Окончание: 2027	Изготовлена и испытана модель диверторного монитора нейтронного потока
Tri-Alpha	Tri-Alpha Energy Inc., USA	Государственные корпорации «Росатом», «Роснано», Национальная лаборатория LLNL, Университет MIT и другие – всего около 40 организаций	Начало: 2014 Окончание: 2025	Исследован ряд физических процессов в диверторе магнитной ловушки открытого типа, приводящих к ограничению продольных потерь энергии.
LHCb	CERN, Швейцария	В проекте участвует 69 организаций, из них 6 российских: НИЦ "Курчатовский институт", ПИЯФ, ИФВЭ, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ИЯФ СО РАН	Начало: 2003 Окончание: 2030	Ведется модернизация калориметра. Завершен анализ распада Лямбда_в бариона, определена вероятность его распада в состоянии с пентакварком.
ATLAS	CERN, Швейцария	В проекте участвуют 177 организаций из 38 стран, в том числе 8 российских: ИФВЭ, ФИАН, ИТЭФ, МИФИ, ПИЯФ, ИЯФ МГУ, ИЯФ СО РАН, ОИЯИ	Начало: 1994 Окончание: 2030	Благодаря подготовительной работе удалось обеспечить высокую эффективность набора данных в новом сезоне при рекордной энергии столкновений протонов 13 ТэВ и их высокое качество. Проведен предварительный анализ данных, получены и опубликованы первые результаты.
Belle-II	КЕК, Япония	В проекте участвует 90 организации из них 4 российских: МИФИ, ИФВЭ, ИТЭФ (оба НИЦ Курчатовский институт), ИЯФ СО РАН	Начало: 2009 Окончание: 2029	Цилиндрический калориметр включен в систему сбора данных детектора, идет набор космических данных и калибровка счетчиков. Проведена проверка торцевого калориметра.

Наименование программы/проекта	Наименование организатора программы	Наименование участников – соисполнителей	Сроки реализации программы	Описание полученных результатов
PANDA	GSI (FAIR), Германия	В проекте участвует 67 организаций, в том числе 6 - российских: ИФВЭ (Протвино), ПИЯФ (СПб), ОИЯИ (Дубна), ИТЭФ (Москва), МЭИ (Москва), ИЯФ СО РАН (Новосибирск)	Начало: 2010 Окончание: 2030	Модернизирован прототип RICH с фотодетектором DPC. Реализовано полное моделирование детектора Forward RICH в среде PandaRoot.
BaBar	SLAC, США	В проекте участвует 69 организаций, в том числе 1 российская: ИЯФ СО РАН	Начало: 1999 Окончание: 2018	В рамках коллаборации BABAR продолжались исследования процессов e^+e^- аннигиляции в адроны методом радиационного возврата. В диапазоне энергий 2.6-8.0 ГэВ с наилучшей в мире точностью измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$. Получены предварительные результаты по процессам $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^+$.
XFEL	DESY, Германия	В реализации этого крупного международного проекта участвует 11 стран, включая Россию	Начало: 2004 Окончание: 2027	Спроектированы, изготовлены, запущены в эксплуатацию системы криогенного питания инжектора и линейного ускорителя XFEL, системы тестирования ускорительных модулей XFEL. Изготовлены и поставлены 80% вакуумных элементов для ондуляторных секций, 1.5 км линий распределения пучков, включая системы сжатия и коллимирования сгустков электронов энергией 20 ГэВ.
Belle	КЕК, Япония	63 организации из них 3 российских: ИФВЭ, ИТЭФ (оба НИЦ Курчатовский институт), ИЯФ СО РАН	Начало: 1995 Окончание: 2020	Завершен анализ распадов В-мезона с η_c в конечном состоянии. Проведено изучение амплитуд трехчастичных распадов Ипсилон(10860).

Наименование программы/проекта	Наименование организатора программы	Наименование участников – соисполнителей	Сроки реализации программы	Описание полученных результатов
MEG	PSI, Швейцария	в проекте участвует 19 организаций, в том числе 3 — российских: ИЯФ СО РАН, НГУ, ОИЯИ	Начало: 1999 Окончание: 2020	Закончен анализ всей набранной в эксперименте статистики. Проведен предварительный заход с модернизированным детектором.
BES-III	ИНЕР, Китай	В проекте участвует 53 организации из них две российские: ИЯФ СО РАН и ОИЯИ.	Начало: 2008 Окончание: 2020	Проведен запуск модернизированной системы измерения энергии пучка BEPC-II методом обратного комптоновского рассеяния. Относительная статистическая точность измерения энергии электронов (позитронов) составила около 5×10^{-5} за 20 минут набора данных. Получен предварительный результат по измерению относительной вероятности распада $J/\psi \rightarrow K+K$ - посредством анализа процесса $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}+p\bar{p}- J/\psi$. Измерено отношение вероятностей распада $J/\psi \rightarrow K+K- \text{ к } J/\psi \rightarrow \mu\bar{\mu}+\mu\bar{\mu}-$. Ведётся анализ систематических ошибок измерения.
FAIR	GSI, Германия	В проекте участвуют более 100 организаций, в том числе 8 российских: МГУ, СПбГУ, ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ИЯФ СО РАН, ОИЯИ, АО «ВНИИИМ»	Начало: 2005 Окончание: 2033	Разработан проект накопительного комплекса Collector Ring

Научное руководство ИЯФ СО РАН

Члены Российской академии наук

Академики:

Диканский Николай Сергеевич
Кулипанов Геннадий Николаевич
Скринский Александр Николаевич

Члены-корреспонденты РАН:

Бондарь Александр Евгеньевич
Винокуров Николай Александрович
Димов Геннадий Иванович
Логачев Павел Владимирович
Пархомчук Василий Васильевич
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

Член-корр. 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
Доктор физ.-мат. наук Тихонов Ю.А. – зам. председателя
Кандидат физ.-мат. наук Ракшун Я.В. – ученый секретарь
Кандидат технических наук Брызгин А.А. – председатель профкома
Кандидат физ.-мат. наук Кардапольцев Л.В. – председатель СМУ

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.
Член-корр. РАН Винокуров Н.А.
Доктор физ.-мат. наук Григорьев Д.Н.
Академик Диканский Н.С.
Член-корр. РАН Димов Г.И.
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 Кулипанов Г.Н.

Доктор физ.-мат. наук Логашенко И.Б.
Доктор физ.-мат. наук, доцент Лотов К.В.
Доктор физ.-мат. наук Мешков О.И.
Доктор физ.-мат. наук, профессор Мильштейн А.И.
Член-корр. РАН Пархомчук В.В.
Кандидат физ.-мат. наук Пиминов П.А.
Кандидат физ.-мат. наук Полосаткин С.В.
Доктор физ.-мат. наук, профессор Середняков С.И.
Академик Скринский А.Н.
Кандидат физ.-мат. наук Старостенко А.А.
Доктор физ.-мат. наук, профессор 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

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ИЯФ СО РАН
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПО ГОСУДАРСТВЕННОМУ ЗАДАНИЮ
за 2015 год

Ответственный за выпуск Я.В. Ракшун
Работа поступила 11.02. 2016 г.

Сдано в набор 18.02. 2016 г.

Подписано в печать 1.03. 2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 8,5 печ.л., 6,8 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 3

Отпечатано в типографии