

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий им. А.А.Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

18 мая 2017 г.

Заседание Диссертационного
совета
Д 201.004.01
Протокол № 2017-1

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации Максимовым Александром Васильевичем «Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50-70 ГэВ на базе синхротрона У-70» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Председательствующий: председатель Диссертационного совета Д 201.004.01 д.ф.-м.н., профессор, Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: учёный секретарь Диссертационного совета Д 201.004.01 канд.ф.-м.н. Рябов Юрий Григорьевич

Всего членов совета: 22 человека.

Присутствует: 19 человек.

На заседании присутствуют следующие члены Диссертационного совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор ф.-м.н., 01.04.02 – председатель;
2. Зайцев А.М., доктор ф.-м.н., 01.04.23 – заместитель председателя;
3. Рябов Юрий Григорьевич, канд. ф.-м.н, 01.04.23 – ученый секретарь диссовета;
4. Арбузов Б.А., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
5. Балакин В.Е., доктор ф.-м.н, 01.04.20;
6. Герштейн С.С., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
7. Денисов С.П., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
8. Зайцев Ю.М., доктор ф.-м.н, 01.04.23;
9. Иванов С.В., доктор ф.-м.н, 01.04.20;
10. Мочалов В.В., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
11. Образцов В.Ф., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
12. Петров В.А., доктор ф.-м.н, 01.04.02;
13. Петрухин А.А., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
14. Саврин В.И., доктор ф.-м.н, 01.04.02;
15. Селезнев В.С., доктор ф.-м.н, 01.04.20;

16. Сенько В.А., доктор ф.-м.н, 01.04.20;
17. Ткаченко Л.М., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
18. Трошин С.М., доктор ф.-м.н, 01.04.02;
19. Чесноков Ю.А., доктор ф.-м.н., 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2002 года в составе 22-х человек.

На заседании присутствуют 19 членов совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, кворум имеется.

На заседании присутствует также официальный оппонент Михайлов Владимир Афанасьевич, кандидат технических наук. Официальный оппонент доктор ф.-м. наук Завьялов Николай Валентинович отсутствует по уважительной причине

Тюрин Н.Е.: объявляет повестку дня: Здравствуйте! Сегодня на повестке дня защита кандидатской диссертации Максимовым Александром Васильевичем «Разработка , создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50-70 ГэВ на базе синхротрона У-70» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Рябов Ю.Г. представляет материалы, которые имеются по диссертации:

Соискатель Максимов Александр Васильевич, 1957 года рождения, в 1981 году окончил Обнинский филиал МИФИ, факультет «Атомные станции и установки». С 1982 по 2007 гг работал в должности начальника смены систем вывода ускорителя У-70, с 2007 г. по настоящее время работает в должности заместителя начальника отдела систем вывода НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ). Диссертация выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. Научный руководитель – Федотов Юрий Сергеевич. Диссертационный совет 22 декабря 2016 г. принял к защите диссертацию Максимова и утвердил официальными оппонентами Завьялова Николая Валентиновича, доктора физико-математических наук, директора Института ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ, и Михайлова Владимира Афанасьевича, кандидата технических наук, начальника сектора Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований , г. Дубна. Совет утвердил в качестве ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». В деле имеются все документы. Все документы соответствуют требованиям ВАК о присуждении ученых степеней.

Тюрин Н.Е.: Какие есть вопросы по доложенному содержанию документов? Нет вопросов? Тогда переходим к выступлению. Александр Васильевич – вам слово.

Максимов А.В. (выступление):

Тема диссертации “Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50-70 ГэВ на базе синхротрона У-70.”

Актуальность работы. Тематика, представленная в диссертации, представляется актуальной в связи с необходимостью развития в России протонной радиографии для анализа сложных оптически плотных объектов, процессов в физике экстремального состояния вещества и быстропротекающих процессов. Количество протонографических комплексов в мире в настоящее время на превышает десяти, а комплекс Института физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» является единственным в России после выхода из эксплуатации комплекса в Институте теоретической и экспериментальной физики

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в ней решаются вопросы разработки, создания и ввода в эксплуатацию технологических систем протонной радиографической установки (магнитная оптика) и первичного ускорителя протонов (система многооборотного быстрого вывода), реализующих на практике ключевые преимущества метода протонной радиографии.

Цель диссертационной работы. Целью диссертации является разработка и расчет магнитной оптики для протонных радиографических комплексов, физическое обоснование метода многооборотного быстрого вывода, создание и настройка с пучком системы многооборотного быстрого вывода, выявление перспектив развития актуальных технологических систем действовавшей и действующей установок для протонной радиографии на выведенном пучке протонов синхротрона У-70 с энергией 50 –70 ГэВ.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации использовались общепринятые аналитические и численные методы расчета оптики пучков заряженных частиц, анализа динамики частиц в кольцевых ускорителях протонов и эффектов взаимодействия пучков с веществом, методов диагностики и измерения параметров релятивистских пучков протонов. Новизна состоит в разработке интегрально эффекта от применения этих методов для создания и эксплуатации уникальных протонных радиографических установок с пучками энергии 50–70 ГэВ, не имеющих отечественных аналогов.

Проектные параметры ПРГК-100 (возможность протонной радиографической съемки динамических объектов с массовой толщиной до 450 г/см^2 с полем обзора не менее $\varnothing 200 \text{ мм}$, время экспозиции для исследования быстропротекающих динамических процессов на уровне $20 \div 50 \text{ мкс}$) превосходят существующие протонные радиографические установки как в России, так и в мире.

В диссертацию вошли результаты работ, выполненных в ходе реализации программы основной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ в период с 2005 года по настоящее время. Эти работы проводились на крупнейшем в России действующем ускорителе заряженных частиц — Ускорительном комплексе У-70 совместными усилиями сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ (г. Протвино) и РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров). Использовалась имеющаяся инфраструктура канала инжекции пучка (сокращенно КИ) не реализованного

проекта Ускорительно-накопительного комплекса (УНК) протонов.

Работы можно разбить на **два больших блока**:

На **первом этапе** в 2005–2011 годах была создана и эксплуатировалась пилотная протонная радиографическая установка с энергией пучка 50 ГэВ. Применялась упрощенная (укороченная) магнитооптическая система, состоявшая из одного квартета квадрупольных линз. Работы на установке были завершены в 2011 году.

На **втором этапе** в 2011 году было начато строительство полномасштабного протонного радиографического комплекса ПРГК-100 с энергией пучка 50–70 ГэВ. В июне 2014 года осуществлён физический пуск ПРГК-100, а в ноябре 2014 года был проведен первый сеанс по получению изображений статических объектов.

На рисунке представлена фотография участка установки ПРГК-100 с квадрупольными линзами и блоками радиационной защиты.

Результаты диссертации получены и использовались на практике в ходе выполнения каждого из указанных выше этапов работ.

Личный вклад автора. Работа, выполненная лично автором, включает в себя следующее:

- Участие в проведении расчетов магнитной оптики протонного радиографического комплекса.
- Исследование вопросов влияния параметров просвечивающего пучка и характеристик комплекса на качество изображения объекта с получением количественных оценок пространственного разрешения в протонных радиографических изображениях объектов.
- Обоснование метода многооборотного быстрого вывода пучка из У-70.
- Участие в пуско-наладочных работах и в регулярных плановых сеансах радиографических установок.

Результаты, выносимые на защиту.

1. Изложенная в работе методика построения и расчетов магнитооптической системы была использована при построении пилотной установки, а также лежит в основе создания полномасштабного протонного радиографического комплекса.

2. Выполнены расчеты по оценке влияния параметров установки и исследуемых объектов на качество изображения. Изложена методика оценки пространственного разрешения протонной радиографической установки.

3. Изложен принцип и приведены расчеты по обеспечению режима многооборотного быстрого вывода пучка длительностью до 20-50 мкс.

4. Представлены результаты первых экспериментов на полномасштабном протонном радиографическом комплексе ПРГК-100 в части верификации и подтверждения достоверности результатов диссертации.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 96 страниц, включая 61 рисунок и 16 таблиц. Список литературы включает 39 наименования на 4 страницах.

Во Введении приведена краткая история создания протонных радиографических систем, обосновывается актуальность создания протонной радиографической установки на базе ускорителя У-70.

В первой главе диссертации обсуждаются принципы и физические основы

протонной радиографии, современное состояние дел в этой области и изложены принципы построения магнитооптических систем для установок протонной радиографии.

В работе подробно рассмотрен вариант построения магнитооптической системы для протонной радиографии на основе симметричного дублета (рис.2).

Преобразование координат исходного пучка из “точки в точку” обеспечивает квартет из двух дублетов с общей матрицей преобразования. Формула представляет собой произведение двух матриц дублета и состоит из двух членов – минус единичная матрица и произведения следа матрицы и самой матрицы дублета. Если след матрицы равен нулю, то имеет место минус единичное преобразование. В этом случае связь между параметрами дублета и структурными функциями выражается следующим образом (формула). Структурные функции определяются геометрией дублета и градиентом квадрупольных линз.

Согласование входного пучка с магнитной структурой квартета выполнено в целях уменьшения хроматической аберрации. Показано, что для этого наклон фазового эллипса входного пучка ψ должен быть равен наклону фазового эллипса аксептанса квартета (формула). На рисунке 3 представлены фазовые портреты для горизонтального а) и вертикального б) аксептансов и облучающего пучка на входе в квартет.

Возможности протонографической установки оцениваются по способности исследовать достаточно массивные объекты. Максимально возможный размер облучаемого объекта и получение его изображения без потерь информации называется полем обзора и определяется величиной аксептанса квартета.

Для коротких систем, состоящих из нескольких квадрупольных линз, аксептанс представляет собой область, ограниченную двумя парами параллельных прямых, полученных путем обратного линейного преобразования в начало системы апертурных ограничений, вносимых фокусирующими квадрупольными линзами. Используя матрицы участков от начала квартета до фокусирующих линз, получим выражения для двух прямых, ограничивающих поле обзора (формула), где в качестве параметров для вычисления поля обзора входит сила квадрупольных линз, размер вакуумной камеры и угол рассеяния на объекте. Характерной точкой является точка пересечения прямых, координата которой вычисляется по формулам (формулы). На рисунке внизу в качестве параметра среднеквадратичный угол рассеяния на объекте. Данное поле обзора в квартете с радиусом апертуры квадрупольной линзы 150 мм.

Во второй главе приведено физическое обоснование и описание пилотной протонной радиографической установки на пучке У-70 с энергией 50 ГэВ (2005–2011 годы). Перечислены существенные технические характеристики протонного синхротрона У-70. Приведена структура и расположение установки и схема быстрого вывода протонного пучка.

В 2005 году в ИФВЭ на ускорительном комплексе протонов У-70 была создана пилотная протонная радиографическая установка, позволявшая при энергии 50 ГэВ получать изображение объектов диаметром 60 мм и толщиной ~ 20 г/см². Эксперименты на установке продолжались до 2011 года.

Протонная радиографическая установка была создана на базе имеющейся

инфраструктуры – канала инжекции (далее, КИ) ускорительно-накопительного комплекса УНК. Схема канала представлена на рис.5.

Магнитооптическая структура пилотной протонной радиографической установки состояла из одного квартета квадрупольных линз. Расчет поля обзора квартета представлен на рисунке 6. На рис. 7 представлен результат измерения поля обзора установки. Видно, что измеренная величина поля обзора составляет примерно 50 мм.

Для измерения пространственного разрешения использовались несколько различных тестовых объектов типа «звезда» с различными толщинами (рисунок).

Протонографирование объектов «звезда» показало высокую пространственную разрешающую способность магнитооптической системы. Предельное разрешение для данных объектов составило примерно 140 мкм. В качестве тестовых были проведены эксперименты с довольно массивными объектами с толщинами до 400 г/см² и разрешение на этих объектах составило порядка 600 мкм.

В третьей главе приведено обоснование оптической схемы и структура построения полномасштабного радиографического комплекса ПРГК-100. Цель создания комплекса - проводить протонную радиографию динамических объектов массовой толщиной до 450 г/см² с полем обзора диаметром не менее 200 мм при энергии протонного пучка 50-70 ГэВ.

Магнитооптическая структура ПРГК-100 состоит из канала транспортировки пучка от протонного синхротрона У-70, участка согласования облучающего пучка с ПРГК-100 и трех квартетов, имеющих минус единичную матрицу преобразования в радиальной и вертикальной плоскостях движения. Структура квартетов показана на рис.10 (рисунок). Здесь показаны три ПРПИ, так называемые пункты регистрации протонного изображения. В начале второго квартета устанавливается объект, далее ПРПИ2 и ПРПИ3. В фокальной плоскости квартетов расположены устройства коллимации пучка. Длина каждого квартета составляет 65.2 м.

Для увеличения поля обзора практически используются эллиптические вакуумные камеры. На рисунке 11 представлено сравнение полей обзора для апертуры с радиусом 150мм и для эллиптической камеры с размерами 360 на 250 мм. Видно, что использование эллиптической вакуумной камеры позволило увеличить на 20 процентов поле обзора.

В работе рассмотрены вопросы влияния параметров пучка и параметров комплекса на качество протонографического изображения объектов. Качество изображения обеспечивается способностью протонной радиографической системы достаточно контрастно различать внутреннюю структуру объекта. Для количественной оценки качества изображения используется контрастно-частотная характеристика (КЧХ).

В работе предложена методология для оценки пространственного разрешения протонографической установки. Показано, что при самых общих предположениях относительно процесса размытия выражение для контрастно-частотной характеристики имеет вид (формула). В качестве параметров, определяющих разрешение входят первичная контрастность после прохождения объекта, также вклад потерь на объекте и на коллиматоре. В качестве ограничительного фактора,

который определяет разрешение, рассмотрен такой фактор как дисперсия энерговыделения в процессе конверсии энергии протонов в фотоны, что порождает флуктуации яркости изображения. Наличие таких факторов ограничивает контрастность, что приводит к следующему выражению (формула). В качестве параметра введена величина относительных флуктуаций в нормированном изображении просвечивающего пучка. Для надежной регистрации объекта на фоне флуктуаций контрастность должна быть больше нуля, что приводит к следующему выражению (формула). В итоге мы получаем выражение для пространственного разрешения (формула), где в качестве параметров, опять таки входит уровень шумов, а также суммарная дисперсия размытия изображения, которая определяется суммой дисперсий тех процессов, которые вносят свой вклад. Для оценки разрешения протонной радиографической системы, были вычислены дисперсии координат частиц для следующих процессов.

Первое - эффект смещения исходной координаты частицы при прохождении объекта конечной длины вследствие многократного кулоновского рассеяния. Выражение для среднеквадратичного смещения координаты частицы при прохождении объекта имеет вид (формула), где в качестве параметров длина объекта и среднеквадратичный угол рассеяния. На рисунке 12 приведен расчет величины среднеквадратичного смещения для свинца в зависимости от оптической толщины объекта.

Второй эффект - влияние эффектов хроматической аберрации. Величина хроматической аберрации магнитной оптики квартетов определяется выражением (формула). Соответственно, дисперсия изображения для эффекта хроматической аберрации, равна приведенному выражению, куда входит дисперсия угла рассеяния и дисперсия импульсного разброса.

Третье - влияние точности поддержания токов в квадрупольных линзах квартетов на качество изображения пучка. Оптическая единица оборудования квартета протонографического комплекса состоит из пары квадрупольных линз длиной 1.8 м с расстоянием между ними 0.7 м. Каждая линза запитывается от одного источника питания. Таким образом, имеется 24 независимых источника питания квадрупольных линз.

Отклонение токов от идеальных значений приводит к неединичности преобразования и приводит к смещению конечных координат частиц пучка, что ухудшает качество изображения. Приведено выражение для конечной координаты частицы в зависимости от относительных отклонений токов в магнитных линзах. В данном выражении величина размытия определяется как координатой точки наблюдения, так и уровнем точности поддержания токов в линзах. В данном случае на уровне десять минус третьей.

Четвертое - КЧХ оптической системы или системы регистрации. Здесь имеют место следующие ограничения: ограниченное число пикселей ПЗС на 1 мм поля регистрации, неопределенность положения резкой границы белого-черного оценивается в ~ 1 пиксель. Эти ограничения определяют КЧХ оптической системы (график). Здесь приведены расчеты для ПЗС с матрицами 1024×1024 и 2048×2048 пикселей.

Пятое - эффект размытия, вызванный не параллельностью облучающего

пучка. Облучающий пучок на объекте не параллельный (расходится по горизонтали и сходится по вертикали). Это приводит к тому, что на координатах, отличных от нуля, разные точки объекта (в начале и в конце объекта) проецируются в разные точки на изображении и имеют смещение относительно друг друга определяемое выражением (формула), куда входит координата наблюдения, наклон фазового эллипса пучка и длина объекта. В таблице 1 и представлены оценки итогового разрешения при протонографировании объектов на ПРГК-100. Из таблицы видно, что диапазон разрешения от 200 мкм до 800 мкм в зависимости от координаты точки наблюдения и того объекта, который подвергается тестированию. Существенный вклад вносит именно оптическая система. Заметна большая разница для случаев использования матриц с числом пикселей 2048*2048 или 1024*1024.

В четвертой главе приводится физическое обоснование и результаты расчетов по многооборотному быстрому выводу пучка из У-70 с длительностью выведенного пучка несколько десятков микросекунд для многокадровой регистрации динамических объектов.

Вывод осуществляется быстрым перемещением пучка в радиальной поперечной плоскости в зазор выводного устройства, имеющего очень тонкую перегородку (в нашем случае электростатический дефлектор ЭД-106, расположенный в 106 прямолинейном промежутке). Наведение ускоренного протонного пучка на перегородку электростатического дефлектора осуществляется с помощью быстрого локального искажения замкнутой орбиты, возбуждаемого дипольными магнитами, расположенными в промежутках 96 и 108. Источники питания быстрых магнитов обеспечивают линейный закон изменения магнитного поля от времени длительностью до 100 мкс. На рис.14 представлен пучок в фазовой горизонтальной плоскости на ЭД106. Прямая линия показывает положение перегородки дефлектора ЭД106. Справа от прямой линии показан циркулирующий пучок, слева – заброшенный в зазор ЭД106. На рисунке 15 показана трасса вывода пучка на азимуте ЭД106.

На рисунках 16 и 17 представлены расчетные диаграммы интенсивности выведенного пучка по оборотам. На рисунке 16 гистограмма интенсивности по оборотам при длительности вывода пучка до 20 оборотов, на рисунке 17 до десяти оборотов. Видно, что имеет место довольно значительный перепад интенсивности в зависимости от оборота. В первом случае, реально может быть использовано для протонографирования ~ 10 импульсов, во втором случае 3-4 импульса. В обоих случаях имеет место сильная неравномерность интенсивности в импульсах (до 3-4 раз). Импульсы с низкой интенсивностью не могут быть использованы, таким образом эффективность использования исходного пучка оценивается на уровне 60 процентов.

Временная структура выведенной интенсивности может быть улучшена. Применение источника питания БМ с программируемой скоростью нарастания магнитного поля позволит получить до 10 импульсов примерно равной выведенной интенсивности. На рис. 18 приведен пример расчета гистограммы интенсивности выведенного пучка при наличии возможности программирования силы БМ во времени. Видно, что в данном случае при выводе длительностью до десяти оборотов можно достичь примерно 20 процентного разброса по интенсивности пучка в

оборотах.

В пятой главе представлены первые результаты эксплуатации протонного радиографического комплекса ПРГК-100 и предложена их интерпретация в части верификации и подтверждения достоверности результатов диссертации.

На базе синхротрона У-70 в июне месяце 2014 года осуществлён физический пуск протонного радиографического комплекса (ПРГК-100) с энергией протонов 50 ГэВ и проведен первый сеанс по получению изображений статических тестовых объектов. Решались следующие задачи.

- Настройка предварительной магнитной оптики для получения расчетных параметров облучающего пучка.
- Настройка магнитной оптики квартетов для получения минус единичной оптики.
- Настройка оптической системы регистрации протонных изображений. Измерение КЧХ оптической системы.
- Измерение разрешения (размытия) при протонном радиографировании различных объектов.

На рисунке 19 приведены изображение и профиль одного сгустка облучающего пучка на входе в квартет. Видно, что уровень интенсивности 5 процентов достигается на диаметре пучка 220 мм. Выполнена оценка частотно-контрастных характеристик (рис. 20). Значение контраста 5% достигается при частоте 2 пары линий на миллиметр. Если посмотреть на рисунок, который был приведен ранее для частотной характеристики, то имеет место очень хорошее соответствие.

Для исследования разрешения системы регистрации использовались различные тестовые объекты. На рис. 21 приведена фотография миры, которая применялась для получения КЧХ радиографической системы. На рис. 22 приведено протоннографическое изображение миры. Измеренная величина разрешения в данном случае составляет 390 мкм.

Выполнено измерение размытия границы на изображениях объекта при перепаде толщин 100 г/см^2 . Величина размытия для граней составила: 480 мкм.

Выполнено измерение границы на изображениях объекта при перепаде толщин 350 г/см^2 . Величина размытия, измеренная по четырем граням тест объекта, составила: 1020 ± 130 мкм. Данные величины представляют параметр ширины соответствующих функций размытия на полувысоте.

Также был осуществлен вывод пучка системой многооборотного вывода. Был осуществлен многооборотный быстрый вывод пучка. На рис. 23 приведены осциллограммы интенсивности пучка при многооборотном выводе пяти сгустков.

На верхнем луче показан сигнал трансформатора постоянного тока У-70. Видно, что начиная с некоторого момента начала вывода сигнал деградирует. На нижнем луче сигнал трансформатора тока установки ПРГК. Полная длительность вывода составляет 5 оборотов, т.е. 25 мкс. На рис. 24 приведено изображение тестового объекта «решетка» от одного микросгустка.

Заключение. Кратко основные результаты исследований, представленные к защите, формулируются следующим образом:

1. Подробно рассмотрена схема построения магнитооптической системы для

протонной радиографии на основе симметричного дублета.

2. Представлено физическое обоснование и расчет основных параметров пилотной протонографической установки ИФВЭ на 50 ГэВ. Представлен краткий обзор полученных результатов.

3. Обосновывается актуальность создания полномасштабного протонного радиографического комплекса (ПРГК-100) на базе ускорителя ИФВЭ У-70.

4. Выполнен расчет параметров комплекса.

5. Рассмотрены вопросы влияния параметров пучка и параметров комплекса на качество протонографического изображения объектов.

6. Изложен физический принцип и приведены расчеты по многооборотному быстрому выводу протонного пучка для обеспечения многокадровой регистрации динамических объектов.

7. Представлены первые результаты работы комплекса ПРГК-100.

Спасибо за внимание!

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Александр Васильевич.. Какие есть вопросы к диссертанту?

Вопрос (Чесноков Ю. А.): Особенность данной системы является то, что она широко апертурная. Каким образом, относительно небольшим пучком можно засветить большую площадь?

Ответ (Максимов): Для этого используется система предварительного формирования пучка: она состоит из четырех линз и одной пары широко апертурных линз.

Вопрос (Чесноков Ю. А.): То есть, рассеиватель не применяется?

Ответ (Максимов): Рассеиватель не применяется, но в планах такой вариант рассматривается.

Вопрос (Чесноков Ю. А.): Не было ли необходимости работать с увеличенным изображением, например в 2 раза?

Ответ (Максимов): Нет, подобной задачи не ставилось. Но, например, можно сказать, что в последнем сеансе был опробован режим микроскопа. В первом квартете была минус единичная оптика, а два последующих квартета обеспечивали коэффициент увеличения изображения в пять раз. Увеличенное изображение было в ПРПИЗ.

Вопрос (Чесноков Ю. А.): На источниках синхротронного излучения тоже занимаются радиографией. В чем преимущество того или иного подхода?

Ответ (Максимов): Основное преимущество протонной радиографии большая проникающая способность протонов, которая недостижима другими физическими методами. Также возможность исследования динамических объектов с той скважностью и интенсивностью, которая нужна в каждом конкретном случае. Это обеспечивается как многобанчевым выводом, так и многооборотным выводом.

Вопрос (Ткаченко Л.М.): Вы употребляете термин быстрые магниты. Что значит быстрые?

Ответ (Максимов): Быстрые в том смысле, что фронт данных магнитов порядка 100 мкс. Это позволяет обеспечить длительность вывода порядка десятков мкс. Практически это достаточно быстрый "медленный" вывод.

Вопрос (Зайцев А.М.): В распечатке диссертации страницы 31-32 тождественны страницам 33-34. Это опечатка?

Ответ (Максимов): Это опечатка. Она уже исправлена.

Вопрос (Зайцев А.М.): Когда возникают искажения. Когда вы употребляете термин размытие, что это такое?

Ответ (Максимов): Можно привести несколько определений термина. Например, такое. Размытие – это неопределенность положения исходно резкой границы объекта в изображении данного объекта. Т.е. изображение объекта получается с размытой границей.

Вопрос (Зайцев А.М.): Если Вы плохо настроите систему, то размытие лучше, чем в хорошо настроенной системе. Я вижу на картинке (стр.31), что изображение лучше в плохо настроенной системе, чем в хорошо настроенной системе. Вопрос – размытие это в оптимально настроенной системе?

Ответ (Максимов): Да, это в оптимально настроенной системе. Когда говорим о появлении подобных выбросов в изображении, система настраивается, чтобы выбросы были минимальны. Контрастность в этом случае может увеличиваться, но самом деле, если посчитать правильно, размытие увеличивается.

Вопрос (Зайцев А.М.): То есть, это кажущийся эффект?

Ответ (Максимов): Да, кажущийся.

Вопрос (Мочалов В.В.): Приведенный метод “бритье” (многооборотный быстрый вывод) не позволяет работать параллельно другим установкам. Возможно, ли организовать такой вывод, чтобы на столе магнитного цикла работали другие установки, например, внутренние мишени, т.е. выводить часть пучка?

Ответ (Максимов): Теоретически это возможно, но в этом случае нужно будет применять ограничитель по току в быстрых магнитах. Схемное техническое решение в источниках тока этих магнитов таково, что в этих источниках происходит разряд, источники выходят на достаточно большой уровень тока и ограничителя нет. Поэтому выводится весь пучок. В принципе, если ограничить ток, тогда могли бы выводить часть пучка. Но на данный момент это не планируется.

Зайцев А.М.: Если еще вопросы или замечания? Если нет, тогда слово предоставляется научному руководителю Федотову Юрию Сергеевичу?

Федотов Ю.С. (научный руководитель): Я не буду зачитывать полностью. Мой отзыв положительный. Я хочу сказать, что в экспериментальном плане личный вклад Александра Васильевича в работу пилотной установки и особенно на ПРГК, я думаю, не меньше 70 процентов. Все остальные тогда 30 процентов. Кроме того, Александр Васильевич является не последним человеком на 25 канале. И до сих он помогает начальникам смен отдела вывода настраивать режим медленного вывода. Поэтому мы считаем, что диссертация Максимова удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляет ВАК к диссертантам и автор, несомненно, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Зайцев А.М.: Спасибо. Теперь заключение диссертационного совета.

Рябов Ю.Г.: Заключение нашего института было принято на заседании научного семинара Отделения ускорительного комплекса. Я кратко зачитаю: “Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне при

непосредственном участии соискателя.

В диссертационной работе получены следующие результаты

1. Даны физическое обоснование и расчет основных параметров пилотной протонной радиографической установки ИФВЭ на 50 ГэВ. Представлен обзор полученных результатов и практическая ценность.

2. Выполнен расчет параметров протонного радиографического комплекса ПРГК-100.

3. Изложен физический метод и выполнены расчеты по многооборотному быстрому выводу протонного пучка для увеличения времени экспозиции и обеспечения многокадровой регистрации динамических объектов.

Теоретическая и экспериментальная части представлены в работе в надлежащем объеме. Основные результаты диссертации публиковались в журналах “Приборы и техника эксперимента”, “Атомная энергия”, “Журнал технической физики”, препринтах ИФВЭ.

Диссертация “Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50-70 ГэВ на базе синхротрона У-70” Максимова Александра Васильевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Заключение принято на заседании семинара Отделения ускорителя ОУК нашего института. На семинаре присутствовало более 20 сотрудников института, один доктор наук и 6 кандидатов наук по специальности диссертации. Подпись секретаря научного семинара.

Ведущая организация - Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ - дала положительный отзыв на диссертацию Александра Васильевича.

Актуальность. Диссертация Максимова А.В. посвящена важной проблеме современной ускорительной техники и применения ускорителей – созданию комплексов протонной радиографии объектов с большой оптической плотностью. Тематика, представленная в диссертации, представляется актуальной в связи с необходимостью развития в России протонной радиографии для анализа сложных оптически плотных объектов, процессов в физике экстремального состояния вещества и быстропротекающих процессов. Количество протонографических комплексов в мире в настоящее время не превышает десяти, а комплекс Института физики высоких энергий является единственным в России и лучшим в мире по своим параметрам, таким как максимальная оптическая плотность исследуемых образцов. Дальше перечисляется структура диссертации. Третья глава содержит описание полноценной установки протонной радиографии. В четвертой главе рассматриваются особенности вывода пучка ускоренных протонов из синхротрона У-70. Пятая глава посвящена краткому описанию некоторых основных результатов, полученных на протонографической установке ПРГК-100 после начала эксплуатации в 2014г. В заключении приведены основные результаты работы.

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

Разработана методика построения и расчетов магнитооптической системы, которая использовалась при проектировании и создании прототипа и полномасштабного протонного радиографического комплекса.

Проведена оценка влияния параметров установки, пучка и исследуемых объектов на качество изображения.

Рассмотрены особенности однооборотного и многооборотного вывода протонного пучка из синхротрона У-70 для нужд протонографического комплекса.

Проведены эксперименты на полномасштабном протонном радиографическом комплексе ПРГК-100, а также тесты для определения разрешающей способности установки.

Научная и практическая значимость результатов. Выносимые на защиту положения и результаты являются новыми, тематика исследований, представленных в диссертации, имеет большую научную и практическую значимость в связи с необходимостью развития в России протонной радиографии для анализа сложных оптически плотных объектов, процессов в физике экстремального состояния вещества и быстропротекающих процессов. Научная и практическая значимость работы также подтверждается большим количеством проведенных на протонографическом комплексе прикладных работ.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, а также сравнением результатов расчета и моделирования с экспериментальными данными.

В диссертации отсутствует сводная таблица с параметрами протонографического комплекса, это затрудняет оценку возможностей установки.

В разделе 3.3 «Оценка влияния параметров пучка и характеристик установки на качество изображения» утверждается, что итоговая дисперсия определяется суммой всех процессов и параметров, которые могут внести ошибку в изображение. При этом никакого аналитического или экспериментального обоснования этого утверждения в тексте диссертации нет. Также в данном разделе была бы полезна сводная таблица, которая позволила бы быстро оценить вклад различных эффектов в качество получаемого изображения.

В подразделе «Динамика пучка под действием быстрых магнитов» приведено несколько изображений поперечных сечений пучка в процессе быстрого вывода. При этом не приведено ни одной функции распределения частиц по координате или поперечному импульсу.

Целый раздел посвящен влиянию хроматических аберраций на изображения, однако нигде в диссертации не приведены численные оценки этого влияния для конкретного комплекса ПРГК-100. Также нигде не рассматривается вопрос о влиянии краевых полей квадрупольных линз.

Отмеченные замечания не снижают научной значимости и практической ценности работы. Диссертация А.В. Максимова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научные и практические результаты в актуальной области ускорительной техники. Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в институтах НИЦ

«Курчатовский институт», РФЭЦ ВНИИЭФ и других организациях ГК «Росатом», НИЯУ МИФИ, ОИЯИ и других организациях.

В целом по актуальности, новизне и практической значимости диссертация Максимова соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры Электрофизических установок Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Александр Васильевич Вам слово для ответа.

Максимов А.В.: Я попытаюсь коротко ответить по пунктам. Представитель ведущей организации сказал, что отсутствует таблица по влиянию эффекта хроматической аберрации. Такая таблица есть – это таблица 3.6. Она так и называется “Пространственное разрешение для эффекта хроматической аберрации”.

Далее, по словам представителя ведущей организации, в качестве исходного утверждения для оценки итогового размытия берется сумма дисперсий для процессов, которые вносят свой вклад. Это не утверждение, а исходная посылка. В этом разница. Во-вторых, почему бы не иметь такую посылку? Какая связь может быть между размытием за счет ахроматической системы и оптической системы регистрации? Далее, говорится, что отсутствует итоговая таблица для разрешения протонографической установки. На самом деле таких таблиц две, соответственно, для матриц с разным количеством пикселей. Возможно, имелось в виду, что отсутствует таблица процентного вклада каждой из систем. Да, такую таблицу можно было бы представить, но она отсутствует.

Тюрин Н.Е.: Хорошо, спасибо. Переходим к выступлениям официальных оппонентов. Слово предоставляется кандидату технических наук Владимиру Афанасьевичу Михайлову.

Михайлов В. А. (официальный оппонент): Ускорители на высокие энергии являются самыми дорогостоящими физическими установками. Их эффективное использование в различных областях человеческой деятельности позволяет получить максимальную отдачу вложенным ресурсам. Уже много лет дирекция ИФВЭ уделяет большое внимание вопросам прикладных исследований. Данная работа для развития экспериментальной базы прикладных исследований является несомненной. Ваши энергии позволяют исследовать материалы очень больших толщин. И эта уникальная способность и ее надо развивать дальше. Я не буду останавливаться на перечислении глав и структуры диссертации и остановлюсь на следующем. Автор ответственно подошел к решению перечисленных в диссертации проблем. Как правило, принимаемые решения хорошо аргументированы и подтверждены результатами численного моделирования, экспериментальными результатами и характеристиками действующих установок. Диссертация написана

хорошим языком, отличается четкостью формулировок. Некоторые погрешности в оформлении не изменяют общего хорошего впечатления о работе. К недостаткам в оформлении работы следует отнести обилие кратких обозначений элементов ускорителя. Для человека, который не занимается этим, это создает определенные трудности. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, соответствующих "Положению о порядке присуждения ученых степеней". Оформление диссертации соответствует требованиям ВАК РФ. Автореферат отражает содержание диссертации. Представленная диссертация А.В. Максимова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Тюрин Н.Е.: Владимир Афанасьевич спасибо Вам большое. Второй официальный оппонент Завьялов Николай Валентинович отсутствует по уважительной причине. Но имеется его письменный отзыв. Поэтому, Юрий Григорьевич, пожалуйста...

Рябов Ю.Г. (зачитывает письменный отзыв официального оппонента Завьялова Н.В.):

Актуальность темы. После введения в действие Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний особую значимость приобрела разработка методов экспериментальных исследований и диагностики ключевых узлов и технических решений изделий ядерно-оружейного комплекса. Новые экспериментальные методы, прежде всего, необходимы для верификации расчетных методик. Одним из основных методов получения экспериментальных данных для верификации расчетных методик является импульсная рентгенография. Первые отечественные эксперименты по исследованию быстропротекающих процессов на установках были проведены в 40-х годах прошлого века. Несмотря на свою распространенность, рентгенография, как метод регистрации быстропротекающих процессов не лишена недостатков, особенно для объектов большой массовой толщины. Метод протонной радиографии, при условии применения для формирования изображения магнитооптических систем, лишен приведенных недостатков и обладает привлекательными характеристиками по просвечивающей способности, геометрическому и плотностному разрешению, высокой эффективностью регистрации протонов. Использование последовательности сгустков, выводимых из протонного синхротрона, позволяет проводить многокадровую съемку изучаемых быстропротекающих процессов.

Диссертация Максимова А.В. посвящена разработке, созданию и внедрению магнитооптической системы формирования протонного изображения и системы многооборотного быстрого вывода пучка для протонного радиографического комплекса ПРГК.

Практическая значимость. Работы, выполненные автором, привнесли значительный вклад в создание на базе ускорителя У-70 двух радиографических установок: пилотной установки для многокадровой протонной радиографии и полномасштабной установки – радиографического комплекса ПРГК-100 с магнитооптической системой, состоящей из трех квартетов квадрупольных линз с

увеличенной апертурой. Автор обобщил результаты разработки, настройки и штатной эксплуатации пилотной установки, а также предложил и реализовал методику построения расчетов магнитооптической системы полномасштабного протонного радиографического комплекса.

Новизна предложений и достоверность результатов. Многие результаты, изложенные в диссертации, обладают элементами научной и технической новизны. Впервые в отечественной практике создана установка, позволяющая проводить регистрацию однократных быстропротекающих процессов динамических объектов с высокой массовой толщиной, с полем обзора на менее 220 мм, при многокадровом просвечивании. Расчеты, выполненные автором, обеспечили возможность создания режима многооборотного вывода пучка длительностью до 20-50 мкс, что значительно расширило возможности радиографической установки. Результаты опубликованы в статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК "Приборы и техника эксперимента", "Атомная энергия", "Журнал технической физики". Далее дается общая характеристика работы.

Замечания и недостатки. К сожалению, работа не лишена некоторых неточностей и недостатков. На 3 и 43 страницах приводятся характеристики протонного радиографического комплекса ПРГК-100, в которых констатируется, что длительность экспозиции одного кадра составляет 100-150 нс. Данная характеристика является принципиальной для любой импульсной установки, поскольку она определяет размытие изображения движущихся границ объекта. Длительность экспозиции одного кадра в протонной радиографии определяется длительностью просвечивающего объект банча, которая составляет порядка 20 нс. При такой длительности, граница объекта, движущаяся со скоростью 7 км/сек, сместится на 140 мкм, что допустимо для заявленных характеристик комплекса. При времени экспозиции 150 нс размытие границы составило бы 1 мм, что неприемлемо для созданной установки. Временной интервал 150 нс является временем свечения сцинтиллятора под действием протонного облучения и им же определяется экспозиция оптических регистраторов протонного комплекса.

Второе. В своих оценках характеристик протонного радиографического комплекса автор все время опирается на данные многокадровой системы регистрации протонных изображений. Автор является разработчиком магнитооптической системы, и для оценки ее качества целесообразно было бы использовать методы диагностики ГНЦ ИФВЭ. Методики и результаты измерения пространственного и плотностного разрешения РФЯЦ-ВНИИЭФ, приведенные в работе автором, в данном случае являются косвенными и не позволяют вычлнить из общих характеристик комплекса ту часть, за формирование которой отвечал непосредственно автор.

Третье. В главе 4 приведены расчетные оценки эффективности многооборотного вывода. Эффективность вывода 85%, эффективность использования пучка 60%. В главе 5, посвященной экспериментальным результатам приведены оценки только длительности радиографирования при многооборотном выводе, в то время как численного результата измерения эффективности не приведено.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера, поскольку не

вливают на результаты, полученные в процессе выполнения поставленной перед диссертантом задачи.

Выводы и заключение. Тема представленной диссертации актуальна и имеет четкую практическую направленность. Работа посвящена разработке, созданию и вводу в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода пучка протонного радиографического комплекса на энергию 50-70 ГэВ на базе синхротрона ИФВЭ. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, содержащей решение актуальной, имеющей практическое значение задачи.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации – Максимов Александр Васильевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Далее подпись Завьялова.

Тюрин Н.Е.: Александр Васильевич, Вам слово для ответа. Я понял, что замечания, которые, сформулировал Владимир Афанасьевич, Вы признаете?

Ответ (Максимов): Да, безусловно. Попробую ответить по пунктам. В соответствующем месте диссертации действительно указано, что время экспозиции 150 нс. Я, безусловно, понимаю разницу между длительностью кадра и временем экспозиции. В данном случае, скажем так, имеет место текстологическая неточность.

Второе. Огромный фактический материал, который используется в диссертации, действительно основан на изображениях, полученных специалистами Сарова. Упоминается то, что мы должны использовать свою систему измерений. В ИФВЭ нет своей системы регистрации.

Третье. На тот момент, когда публиковались результаты диссертации, многооборотный быстрый вывод осуществлялся два раза, один в 2014 и в 2015 году.

К сожалению, на тот момент не было цифровой техники, которая позволяла бы оцифровать сигнал, полученный сигнал с трансформатора и таким образом, не могли оценить эффективность вывода, и поэтому этой цифры нет в диссертации. Сейчас такая техника есть, но последний год многооборотный вывод не включался.

Тюрин Н.Е.: В последующей работе это надо обязательно учесть. Хорошо, спасибо.

Переходим к обсуждению, Кто хочет выступить?

Денисов С.П.: Мне приходилось работать с Максимовым при проведении различных экспериментов. Он тогда был начальником смены и могу подтвердить, что в ту смену, когда руководителем был Максимов, проблемы с выводом были минимальны. И если так можно выразиться, что все капризы физиков относительно длительности вывода или интенсивности или временной структуры вывода, всегда были наилучшим образом удовлетворены. Большое Вам спасибо. Я считал всегда хорошим практиком Максимова А.В., но познакомившись с диссертацией, вижу, что он имеет хорошую теоретическую подготовку тоже. По самой диссертации у меня нет сомнений, что она удовлетворяет тем требованиям, которые предъявляются в

настоящее время к кандидатским диссертациям, а сам А.В.Максимов вполне заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук.

Тюрин Н.Е.: Спасибо Сергей Петрович. Кто еще хотел бы выступить?

Иванов С.В.: Я тоже хотел бы сказать в защиту Александра Васильевича Максимова. Когда смотришь отдельные части диссертации, там бывают дискуссионные моменты, но в целом его диссертация имеет интегральную эффективность, потому что в ней отражены и расчеты магнитной оптики, и участие в строительстве и монтаже. Максимов принимал участие в конкретной оперативной работе и контактах с саровскими коллегами. Самое главное, что этой защитой завершилась серьезная и востребованная работа, которая существенно расширила спрос на пучок и диверсифицировало возможности ускорительного комплекса.

По формальной стороне, во-первых, тот факт, что мы имеем действующую установку, дает нам право смотреть сквозь пальцы на некоторые недостатки. Второе, с чисто формальной стороны, материал каждой главы опубликован в журналах ВАК. Поэтому, если рассматривать диссертацию комплексно, как работу с конечным результатом, то, безусловно, Александр Васильевич достоин высокой квалификационной оценки по совокупности работы и его вклада в эту систему. Я поддерживаю Юрия Сергеевича, Александр Васильевич активно занимается выводом пучка, в частности, работает на углеродном пучке и по поддержанию работоспособности систем вывода.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Сергей Владиславович. Я хотел бы сказать, что выполнена большая работа, и Александр Васильевич играл значительную роль в этой работе. Когда говорится о существующих радиографических установках, то о каких? Установка в Лос-Аламосе существует, но установка нашего института превосходит установку в Лос-Аламосе. Поэтому я считаю, что мы вправе поддержать диссертацию Максимова на степень кандидата наук по специальности физика пучков и ускорительная техника. Теперь предоставим диссертанту заключительное слово.

Максимов А.В.: Спасибо всем коллегам за высказанные мнения. В свою очередь я хотел бы высказать благодарности, прежде всего научному руководителю Федотову Юрию Сергеевичу – за плодотворное тесное сотрудничество на протяжении многих лет, за постоянный интерес к работе. Многие работы инициированы лично Юрием Сергеевичем.

Особо нужно отметить научного руководителя НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ Николая Евгеньевича Тюрина. Будучи директором Института в период реализации проекта протонного радиографического комплекса, Николай Евгеньевич уделял особое внимание этому проекту и в значительной степени содействовал его практической реализации, а также оказывал содействие в написании данной работы.

Автор выражает благодарность сотрудникам ОУ У-70 и отдела вывода за профессионализм и практическое содействие в реализации режимов вывода протонного пучка.

Особые слова благодарности автор выражает сотруднику ВНИИЭФ (г. Саров) Олегу Васильевичу Орешкову. Во многом благодаря активной позиции Олега

Васильевича тема протонного радиографического комплекса активно пропагандировалась и была реализована.

Автор приносит благодарность коллегам из РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) за тесное плодотворное сотрудничество.

Спасибо за внимание.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Теперь мы выбираем счётную комиссию. Есть предложение: Сенько Владимир Александрович (председатель), Чесноков Юрий Андреевич, Трошин Сергей Михайлович.

Перерыв на голосование.

Тюрин Н.Е.: Давайте заслушаем результаты нашего голосования.

Председатель счётной комиссии Сенько В.А.: Роздано бюллетеней - 19, на присутствующих 19 человек, осталось не розданных - 3, в урне бюллетеней - 19, «за» - 19, «против» - нет, недействительных - нет.

Тюрин Н.Е.: Ну что, утвердим?

Диссертационный совет утверждает результаты голосования.

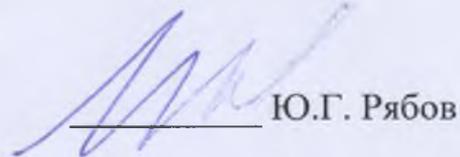
Тюрин Н.Е.: Теперь мы должны с вами утвердить проект заключения о научном значении диссертации Александра Васильевича. Члены совета ознакомились с проектом заключения? Есть ли какие-либо замечания? Проведём открытое голосование по проекту заключения о научном значении. Прошу проголосовать. Спасибо. Александр Васильевич, поздравляю вас с успешной защитой и желаю вам новых достижений!

Заседание Диссертационного совета завершено.

Председатель
Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор


Н.Е. Тюрин


Учёный секретарь
Диссертационного совета,
кандидат физико-
математических наук,


Ю.Г. Рябов