

*На правах рукописи*

КРАСНОВ Александр Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ  
В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ СОВРЕМЕННЫХ  
УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Анашин  
Вадим Васильевич – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Мезенцев  
Николай Александрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

Розанов  
Леонид Николаевич – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, профессор.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ Объединённый институт ядерных исследований,  
г. Дубна.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.  
в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие ускорительной техники в сторону увеличения энергии и интенсивности пучков ускоряемых частиц всегда накладывало определенные, весьма жесткие требования на вакуумные системы ускорителей. Поэтому для решения задачи обеспечения требуемого сверхвысокого динамического вакуума в малоапертурных протяженных камерах ускорителей с жесткой фокусировкой были реализованы специальные решения. Одним из таких решений является применение встроенных магниторазрядных насосов, работающих в собственном магнитном поле накопителя. Другим решением было использование криогенных методов откачки. Интегрирование криогенной системы сверхпроводящих магнитов и вакуумной камеры распространения пучка оказалось весьма удачной, поскольку холодные стенки камеры послужили практически идеальным распределенным крионасосом. Однако достаточно интенсивное синхротронное излучение (СИ) в адронных коллайдерах ТэВ-ного диапазона (LHC) существенным образом влияет на характер поведения плотности остаточного газа в криогенной камере. Комплексные исследования, проведенные в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ) совместно с вакуумными группами SSC и LHC, позволили определить основные особенности конструкции криогенных вакуумных камер коллайдеров. Материал экрана определяет коэффициенты десорбции газа и эмиссии электронов, что определяет газовую нагрузку и развитие электронного мультипактора в коллайдере.

В современных лептонных коллайдерах и специализированных источниках СИ, функционирующих при комнатной температуре, воздействие интенсивного СИ и электронных потоков на стенки вакуумных камер, потребовало поиска новых подходов для обеспечения высокого вакуума. Так впервые в ускорителе LEP в Швейцарии, CERN для откачки вакуумной камеры был применен неиспаряемый геттер (НЭГ) Zr84–Al16 с температурой активации 750°C. Геттерный насос в виде полоски константана шириной 30 [мм] с нанесением на нее с обеих сторон геттера, располагался внутри вакуумной камеры, обеспечивая откачку около 23 км камеры.

В процессе дальнейших исследований был найден оптимальный состав покрытия Ti(30%)–Zr(20%)–V(50%) с температурой активации 180°C. Это расширило область применения геттера на медные, и даже алюминиевые сплавы. В процессе активации поверхность геттера сильно обедняется кислородом, что ведет к значительному снижению коэффициента вторичной эмиссии электронов до  $1.1 \div 1.3$ . Это послужило одной из основных причин применения пленки TiZrV в «теплых» прямолинейных участках LHC общей протяженностью около 5 км.

### **Цель диссертационной работы**

Определение интенсивности фотостимулированной десорбции криосорбированных молекул и уровня рассеянного СИ в конфигурации вакуумных камер дипольных магнитов ЛНС; прогнозирование динамического вакуума в камерах дипольных магнитов ЛНС в условиях комплексного воздействия СИ и электронного мультитактора; всестороннее исследование вакуумных свойств перспективного геттерного покрытия TiZrV в присутствии СИ в широком диапазоне температур, проектирование холодных вакуумных камер ЛНС и секций затухателей специализированного источника СИ PETRA III.

### **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора в ИЯФ СО РАН спроектированы и созданы экспериментальные установки для изучения различных аспектов поведения динамического давления в вакуумных камерах ускорителей, проведены экспериментальные исследования; осуществлена оптимизация геометрии вакуумных камер на основе предложенного автором, модифицированного метода угловых коэффициентов; определены параметры холодной вакуумной камеры адронного коллайдера ЛНС и системы секций затухателей пучка источника СИ третьего поколения PETRA III.

### **Научная новизна**

Впервые измерены коэффициенты фото-десорбции основных криосорбированных остаточных газов при облучении СИ, проведены эксперименты по измерению коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния СИ в прототипах вакуумных камер ЛНС. На основе модифицированного метода угловых коэффициентов проведена оптимизация геометрии криогенной вакуумной камеры ЛНС и рассчитана эффективность удаления молекул водорода из области распространения пучка. Показано, что возможное накопление криосорбированных молекул газов, из-за интенсивного электронного мультитактора, не приведет к значимому увеличению динамической плотности основных остаточных газов в криогенной вакуумной камере ЛНС. Показано, что накопление конденсата и вторичная десорбция, вызванная рассеянным СИ, могут препятствовать тренировке поверхности электронами и, следовательно, препятствовать снижению выхода вторичных электронов.

Впервые проведен расчет эффективного коэффициента вторичной эмиссии пилообразной поверхности, рассматриваемой в качестве наиболее простого и технологичного способа подавления мультитактора. Проведены эксперименты по измерению динамического давления водорода на прототипе вакуумной камеры ЛНС с эффективным сорбентом, предложенным в ИЯФ СО РАН.

Впервые экспериментально определены вакуумные свойства и коэффициенты фотодесорбции геттерного покрытия  $TiZrV$  в диапазоне температур 90 – 300 К. Показано, что с набором фотонной дозы коэффициенты фотодесорбции не изменяются. Обнаружен эффект ненасыщения покрытия при длительном облучении вакуумной камеры, когда количество десорбированного СО составило более одного молекулярного слоя. Определена эффективность активации под действием СИ. Впервые экспериментально определено динамическое давление над поверхностью геттера в присутствии СИ и отсутствии внешних средств откачки.

### **Научная и практическая ценность работы**

Результаты диссертационной работы автора легли в основу проектирования вакуумных систем ЛНС, PETRA III, ВЭПП2000. Полученные экспериментальные данные и предложенные усовершенствования численных методов позволяют определять профиль давления в системах практически любой сложности с произвольным распределением газовой нагрузки и существенно повышают точность прогнозирования долговременной динамики плотности остаточного газа.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Эксперименты по определению коэффициентов фотодесорбции основных криосорбированных остаточных газов и по измерению потоков отраженных и диффузно рассеянных фотонов СИ в прототипах вакуумных камер ЛНС.
2. Применение модифицированного метода угловых коэффициентов для оптимизации геометрии криогенной вакуумной камеры ЛНС с целью достижения наиболее эффективного удаления молекул водорода из области распространения пучка.
3. Анализ влияния накапливаемого конденсата на динамическую плотность основных остаточных газов в криогенной вакуумной камере ЛНС и влияние пере-конденсации под действием СИ на тренировку поверхности электронами.
4. Расчеты эффективного коэффициента вторичной электронной эмиссии от пилообразной поверхности.
5. Эксперименты по измерению динамического давления водорода на прототипе вакуумной камеры ЛНС с применением углеволоконной ткани, в качестве криосорбера.
6. Экспериментальные работы по определению вакуумных свойств и коэффициентов фото-десорбции геттерного покрытия  $TiZrV$  в диапазоне температур 90 – 300 К, включающие исследования насыщения покрытия

при длительном облучении вакуумной камеры, определение эффективности активации геттера под действием СИ и определение динамического давления над поверхностью геттера TiZrV в присутствии СИ и отсутствии внешних средств откачки.

7. Проектирование вакуумной системы секций охлаждения пучка для источника СИ третьего поколения PETRA III, где в качестве распределенной откачки применено геттерное покрытие TiZrV в вакуумных камерах вигглеров.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и научных конференциях по ускорителям заряженных частиц и по вакуумной технике: 6th European Vacuum Conference (EVC6), Villeurbanne (Франция, 7-10 декабря 1999); International Workshop on Performance in Improvement of Electron-Positron Collider Particle Factories, KEK, Tsukuba (Япония, 21-24 сентября 1999); Международная конференция по использованию синхротронного излучения СИ-2000 (Новосибирск, 17-21 июля 2000 г.), 8th European Particle Accelerator Conference EPAC-2002 (Париж, Франция, июнь 2002 г.); XIV Всероссийская конференция по использованию синхротронного излучения СИ-2002 (Новосибирск, 15-19 июля 2002 г.); Workshop on NEG coating, DL, ASTeC, Warrington, Cheshire, (Великобритания, 23-25 сентября 2002 г.); 8th European Vacuum Congress and 2nd National Conference of German Vacuum Society (Берлин, 23-26 июля 2003); 16th International Vacuum Congress of "IVC-16/ICSS-12/NANO-8" IUVSTA Symposium, Venice (Италия, 28 июня - 2 июля, 2004); XV Всероссийская конференция по использованию синхротронного излучения "СИ-2004" (Новосибирск, РФ, 19-23 июля 2004); 17th International Vacuum Congress IVC-17, 13th International Conference on Surface Science ICSS-13, International Conference on Nano Science and Technology ICN+T 2007, Stockholm (Швеция, 2-6 июля 2007 г.).

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, трех приложений и списка литературы из 77 наименований, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 13 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлен краткий обзор основных достижений в науке и технике сверхвысоковакуумных систем ускорительно-накопительных комплексов. Обозначена проблематика, связанная с воздействием интенсивного ионизирующего излучения и электронных облаков на поверхность вакуумных камер. Сформулированы цели диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ литературы и подробно описывается актуальность темы диссертационной работы на основе существующих экспериментальных данных.

**В первом параграфе** обозначены требования на степень разрежения в вакуумных камерах распространения пучков в специализированных источниках СИ, лептонных и адронных коллайдерах.

**Во втором параграфе** рассматриваются общие уравнения молекулярного баланса в вакуумных камерах распространения пучка. Сформулирована классификация вакуумных камер ускорителей по свойствам внутренней поверхности.

**В третьем параграфе** рассматриваются процессы, вызванные синхротронным излучением в теплых камерах, на примере ВЭПП-3, ЛЕР и холодных камерах, на примере ЛНС. Делаются выводы, что в теплых камерах с интенсивным СИ необходимо применять распределенные средства откачки, а в холодных камерах экранировать, по крайней мере, часть криоповерхности от СИ для обеспечения беспрепятственной сорбции молекул водорода.

**В четвертом параграфе** рассматриваются условия образования электронных облаков высокой плотности и их влияние на динамическую плотность остаточного газа. Формулируется проблематика долговременного прогнозирования динамики остаточного газа в условиях комплексного воздействия синхротронного излучения и электронного мультипактора на поверхность «холодных» вакуумных камер ЛНС (рис. 1):

Объемная плотность молекул остаточного газа будет определяться уровнем переотраженного и рассеянного СИ и эффективностью вторичной фотодесорбции, увеличивающейся по мере накопления криосорбированных молекул на внутренней поверхности экрана (за исключением водорода, который удаляется через слоты и сорбируется на внешней оболочке). Для подавления зеркального отражения фотонов и, следовательно, снижения освещенности камеры, на поверхности, облучаемой прямыми фотонами СИ, нанесены пилообразные насечки.

Присутствие электронных облаков требует введения дополнительных элементов в конструкцию экрана пучка и существенно усложняет долговременный прогноз динамической плотности газа в холодной камере

ЛНС. В камерах дипольных магнитов движение электронов фактически является одномерным – вдоль силовых линий магнитного поля. Наибольшая плотность облака формируется симметрично относительно пучка (см. рис. 1). Максимально допустимый поток электронов на поверхность экрана ограничен холодильной мощностью криогенной системы для экрана пучка, составляющей около 1.1 Ватт на погонный метр. Холодильная мощность внешней оболочки, находящейся при температуре около 1.9 К, в десятки раз меньше. Поэтому, в камере установлены дополнительные экраны для электронов, защищающих внешнюю оболочку.

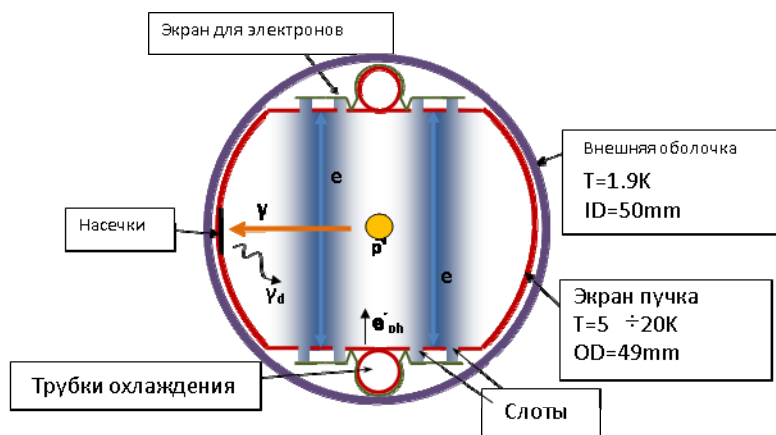


Рис. 1. Геометрия сечения вакуумной камеры дипольных магнитов ЛНС с дополнительными экранами для электронов и насечками в области облучения прямыми фотонами СИ.

**Во второй главе** представлены экспериментальные результаты, полученные автором.

В первом параграфе описывается экспериментальная установка на базе ВЭПП-2М для измерения коэффициентов фотодесорбции основных криосорбированных остаточных газов при облучении СИ. Представлены экспериментальные результаты для  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  и  $O_2$ . Установлено, что эффективность вторичной десорбции практически не зависит от критической энергии фотонного спектра СИ в диапазоне  $45 \div 300$  эВ.

Во втором параграфе описывается экспериментальная установка на базе ВЭПП-2М для измерения коэффициента отражения и диффузного рассеяния СИ. Представлены результаты экспериментов с коротким прототипом вакуумной камеры ЛНС, где для уменьшения уровня освещенности камеры сделаны насечки на поверхности, облучаемой прямыми фотонами СИ. Показано, что применение насечек более чем в 8 раз уменьшает количество



фотоэлектронов ускоряемых полем пучка вдоль силовых линий магнитного поля в дипольных камерах ЛНС. В этом случае доля фотоэлектронов в электронном облаке становится пренебрежимо малой

В третьем параграфе описывается экспериментальная установка на базе ВЭПП-3 для высокочувствительных измерений коэффициента десорбции в широком диапазоне температур. Представлены экспериментальные результаты для камер, покрытых геттером TiZrV. На рисунке 2 представлена характерная зависимость динамического давления водорода в центре камеры длиной 1500 мм и диаметром 24 мм в зависимости от температуры.

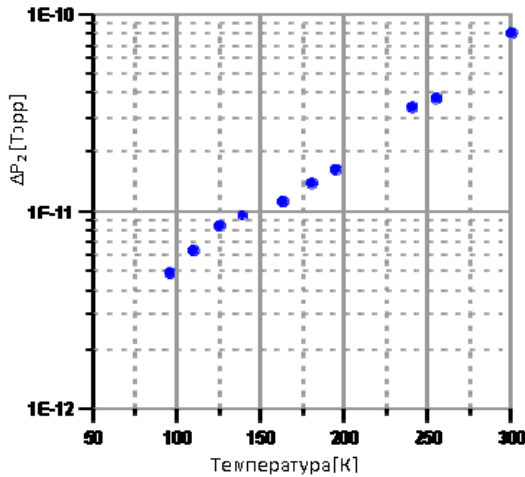


Рис. 2. Температурная зависимость динамического давления водорода при воздействии фотонного потока СИ:  $4 \cdot 10^{16}$  [фотон/с] ( $E_c = 4.5$  [кэВ]).

Существенным является тот факт, что для искусственно пассивированного геттера TiZrV происходит активация поверхности под действием фотонов. При этом сорбированные молекулы удаляются в объем геттера (так же как и при термической активации). Для описания потока удаляемых молекул (на единицу длины камеры) введен соответствующий коэффициент:

$$q = -g \cdot \Gamma' / L,$$

где  $g$  – коэффициент фотонностимулированной активации (очистки поверхности) геттера [молекул/фотон],  $\Gamma'$  – фотонный поток [фотон/с],  $L$  – длина камеры [м]. Знак минус отражает тот факт, что вместо десорбции происходит откачка молекул.

Решая дифференциальное уравнение Кнудсена с отрицательным распределенным потоком  $q$ , находим выражение для квазистатического давления в центре камеры:

$$P_2 = -\frac{g\Gamma'}{8UK} + \hat{P},$$

где  $U$  – молекулярная проводимость камеры [л/с],  $P_2$  – давление в центре [Торр],  $\hat{P}$  – давление на краях [Торр],  $K \approx 3.2 \cdot 10^{19}$  – количество молекул в литровом объеме при комнатной температуре и давлении один Торр.

Наблюдение снижения давления в центре камеры под действием СИ, при непрерывной инжекции молекул СО с краев, представлено на рисунке 3.

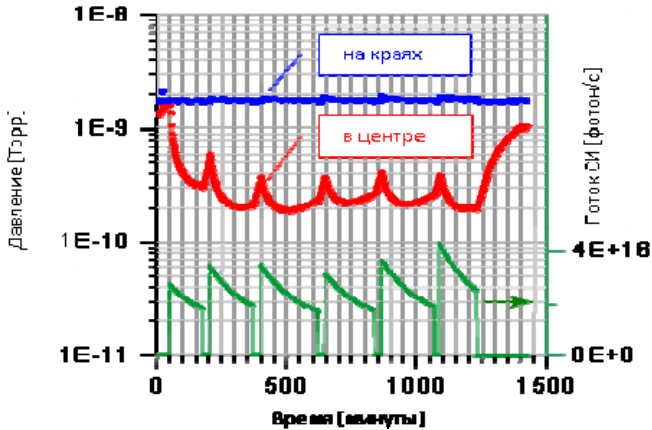


Рис. 3. Наблюдение фотонно–стимулированной активации под действием СИ при непрерывной инжекции СО.

В отсутствие излучения, сорбционная емкость геттера при комнатной температуре ограничена одним молекулярным слоем. Наличие же излучения фактически продлевает время жизни геттера благодаря диссоциации молекул с последующей диффузией в объем геттера. Даже для сравнительно тонких покрытий, толщиной в доли микрона (тысячи молекулярных слоев), сорбционная емкость объема превышает сорбционную емкость поверхности в сотни раз.

**Третья глава** посвящена практической реализации вакуумных камер и анализу динамического вакуума.

В первом параграфе проведена оптимизация холодных вакуумных камер ЛНС и представлен анализ динамического вакуума в условиях комплексного воздействия СИ и электронных потоков. Показано, что накопление конденсата и потоки вторично-десорбированных молекул могут препятствовать тренировке поверхности электронами, что делает невозможным снижение коэффициента вторичной эмиссии ниже порога возникновения электронного облака высокой плотности. В качестве одного

из технологических вариантов модификации поверхности с целью подавления выхода вторичных электронов рассматривается пилообразная поверхность (Рис. 4).

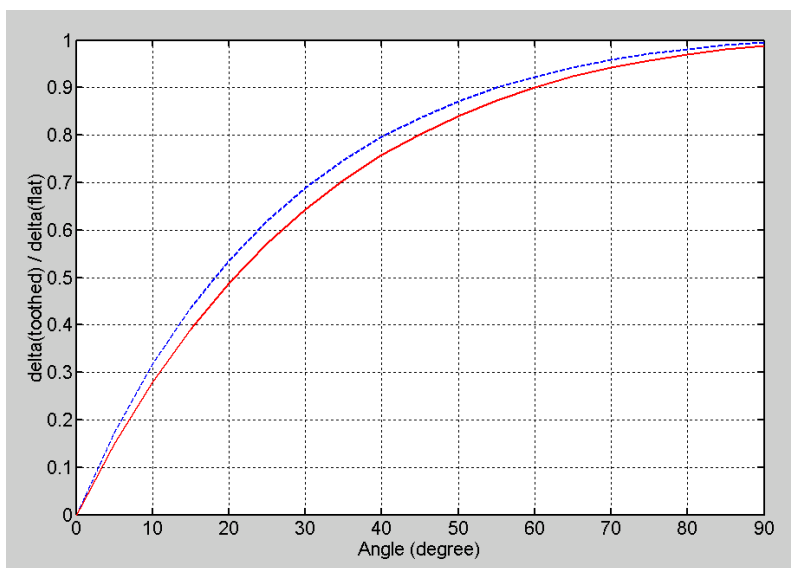
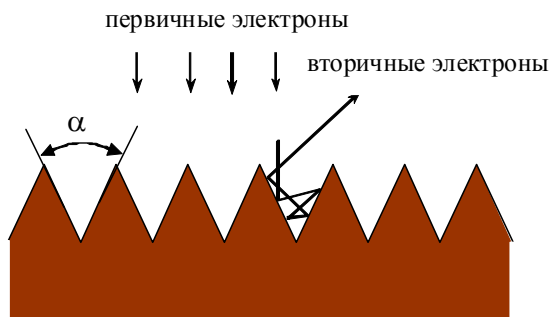


Рис. 4. Подавление выхода вторичных электронов пилообразной поверхностью с углом раствора  $\alpha$ . Сплошная линия – без магнитного поля. Пунктирная линия – в присутствии магнитного поля.

В настоящее время пилообразная поверхность с углом раствора  $20^\circ$  используется в алюминиевых камерах дипольных магнитов Super B Factory (КЕК, Япония), изготавливаемых методом экструзии.

Второй параграф посвящен описанию холодной вакуумной камеры прямолинейных участков ЛНС, где в качестве крио-сорбера применено тканное углеволокно.

Третий параграф посвящен вопросам проектирования вакуумной системы секций затухателей PETRA III.

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

**В приложении**, состоящем из трех частей, детально описываются численные методы, использованные автором для прогнозирования динамического вакуума, оптимизации геометрии вакуумных камер и обработки экспериментальных данных.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Впервые измерены коэффициенты фотодесорбции основных криосорбированных остаточных газов при облучении СИ.

Проведены эксперименты по измерению коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния СИ в прототипах вакуумных камер ЛНС.

На основе модифицированного метода угловых коэффициентов проведена оптимизация геометрии криогенной вакуумной камеры ЛНС и рассчитана эффективность удаления молекул водорода из области распространения пучка. Показано, что возможное накопление криосорбированных молекул газов из-за интенсивного электронного мультипактора, не приведет к значимому увеличению динамической плотности основных остаточных газов в криогенной вакуумной камере ЛНС.

Показано, что накопление конденсата и вторичная десорбция, вызванная рассеянным СИ, могут препятствовать тренировке поверхности электронами и, следовательно, препятствовать снижению выхода вторичных электронов.

Впервые проведен расчет эффективного коэффициента вторичной эмиссии пилообразной поверхности, рассматриваемой в качестве наиболее простого и технологичного способа подавления мультипактора.

Проведены эксперименты по измерению динамического давления водорода на прототипе вакуумной камеры ЛНС с эффективным сорбентом, предложенным в ИЯФ СО РАН. Экспериментальные данные находятся в удовлетворительном согласии с расчетами, проведенными методом угловых коэффициентов.

Впервые экспериментально определены вакуумные свойства и коэффициенты фотодесорбции геттерного покрытия TiZrV в диапазоне температур 90 – 300 К. Показано, что с набором фотонной дозы коэффициенты фотодесорбции не изменяются. Обнаружен эффект ненасыщения покрытия при длительном облучении вакуумной камеры, когда

количество десорбированного СО составило более одного молекулярного слоя. Определена эффективность активации под действием СИ. Впервые экспериментально определено динамическое давление над поверхностью геттера в присутствии СИ и отсутствии внешних средств откачки.

Проведены проектирование и запуск вакуумной системы секций затухателей пучка источника СИ третьего поколения PETRA III, где для обеспечения заданного уровня разрежения применен нераспыляемый геттер TiZrV в вакуумных камерах вигглеров.

**Основные результаты диссертации опубликованы** в следующих работах

1. V. Baglin, I.R. Collins, J. Gómez-Goñi, O. Gröbner, B. Henrist, N. Hilleret, J.-M. Laurent, M. Pivi, R. Cimino, V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, O.B. Malyshev, A.A. Krasnov and E.E. Pyata. Experimental investigations of the electron cloud key parameters. // International Workshop on Performance in Improvement of Electron-Positron Collider Particle Factories, KEK, Tsukuba, Japan, 21st - 24th Sept., 1999.
2. E. Hedlund, L. Westerberg, O.B. Malyshev, M. Leandersson, C-J. Fridén, E. Edqvist, H. Kollmus, M.C. Bellachioma, H. Reich-Sprenger, A. Krasnov. A new test stand for heavy ion induced gas desorption measurements at TSL. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 586, Issue 3, 1 March 2008, p.377-381.
3. E. Hedlund, L. Westerberg, O.B. Malyshev, E. Edqvist, M. Leandersson, H. Kollmus, M.C. Bellachioma, M. Bender, A. Krämer, H. Reich-Sprenger, B. Zajec, A. Krasnov. Ar ion induced desorption yields at the energies 5 - 17.7 MeV/u. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 599, Issue 1, 1 February 2009, p.1-8.
4. E. Hedlund, O.B. Malyshev, L. Westerberg, A.A. Krasnov, A.M. Semenov, M. Leandersson, B. Zajec, H. Kollmus, M.C. Bellachioma, M. Bender, A. Krämer and H. Reich-Sprenger. Heavy-ion induced desorption of a TiZrV coated vacuum chamber bombarded with 5 MeV/u Ar<sup>8+</sup> beam at grazing incidence. // J. Vac. Sci. Technol. A 7(1), 2009, p.139-144.
5. В.В. Анашин, Р.В. Достовалов, А.А. Краснов, О.Б. Малышев, О. Гробнер, Я. Коллинз. Фотодесорбция криосорбированных газов. // Материалы XIII Российской конференции по использованию синхротронного излучения, Новосибирск, 17-21 июля 2000 (СИ-2000), Новосибирск. ИЯФ СО РАН, 47-48.

6. V.V. Anashin, I.R. Collins, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, O. Gröbner, A.A. Krasnov, O.B. Malyshev and E.E. Pyata. Magnetic and electric field effects on the photoelectron emission from LHC beam screen material. // *Vacuum*, ISSN 0042207X, p.255-260, vol.60, N1-2, 2001.
7. O.B. Malyshev, V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, A.A. Krasnov, I.R. Collins, V.L. Ruzinov. Method and setup for photodesorption measurements for a nonevaporable-getter-coated vacuum chamber. // *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 23, N 3, May/June 2005 p.570-576.
8. A.A. Krasnov. Molecular pumping properties of the LHC arc beam pipe and effective secondary electron emission from Cu surface with artificial roughness. // *Vacuum*, vol. 73, p.195-199 (2004).
9. В.В. Анашин, Р.В. Достовалов, А.А. Краснов, И.Р. Коллинз, О.Б. Малышев. Стенд для криосорбционных исследований в конфигурации вакуумной камеры ЛHC. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 1, с.43-47, ноябрь 2003.
10. V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, A.A. Krasnov, I.R. Collins and O.B. Malyshev. Vacuum performance of a beam screen with charcoal for the LHC long straight sections. // *Vacuum*, vol. 72, p.379-383 (2004).
11. V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, A.A. Krasnov, I.R. Collins, O.B. Malyshev, A.A. Nikiforov, V.A. Cherepanov, Z.A. Korotaeva, A.E. Lapin, V.A. Poluboyarov. Molecular cryosorption properties of porous copper, anodized aluminum and charcoal at temperatures between 10 and 20 K. // *Vacuum*, vol.76, p.23-29 (2004).
12. V.V. Anashin, I.R. Collins, R.V. Dostovalov, Z.A. Korotaeva, A.A. Krasnov, O.B. Malyshev and V.A. Poluboyarov. Vacuum performance of a carbon fibre cryosorber for the LHC LSS beam screen. // *Vacuum*, vol. 5, p.293-299 (2004).
13. Р.В. Достовалов, А.А. Краснов. Криосорбционная откачка газа в сверхпроводящих адронных коллайдерах. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, №9, с.49-53, 2005.
14. V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, A.A. Krasnov. Summary of recent studies of cryosorbers for LHC long straight sections. // *Particle Accelerator Conference "PAC 05"*, Knoxville, Tennessee, USA, May 16-20, 2005 // *Proc. of "PAC-05"*, JACoW, p.791-793, October 2005.
15. В.В. Анашин, Р.В. Достовалов, А.А. Краснов, В.В. Рузинов, Н.В. Федоров, О.Б. Малышев, I.R. Collins. Исследование фотодесорбционных

- свойств вакуумной камеры с напыленным геттером TiZrV. // XIV Всероссийская конференция по использованию синхротронного излучения "СИ-2002", Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 15-19 июля 2002.
16. I.R. Collins, V.L. Ruzinov, O.B. Malyshev, V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, A.A. Krasnov. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber" - EPAC-2002, Paris, France, June 2002. // Proc. of EPAC-2002, p.2550-2552.
  17. V.V. Anashin, A.A. Krasnov, V.L. Ruzinov, N.V. Fedorov, I.R. Collins, O.B. Malyshev. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber. // 9th Vacuum conference "Vacuum science and technic - 2002", Sudak, Ukraina, 18-25 September 2002.
  18. 14. V.V. Anashin, A.A. Krasnov, N.V. Fedorov. A photodesorption study of a TiZrV NEG coated stainless steel vacuum chamber. // Workshop on NEG coatings and NEG coated vacuum chambers for Synchrotron radiation sources, ASTeC, Daresbury Laboratory, Warrington, UK, September 2002.
  19. Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, H. Hisamatsu, K. Oide, F. Takasaki, R.V. Dostovalov, A.A. Krasnov, K.V. Zolotarev, E.S. Konstantinov, V.A. Chernov, A.E. Bondar, A.N. Shmakov. First experimental and simulation study on the secondary electron and photoelectron yield of NEG materials (Ti-Zr-V) coating under intense photon irradiation. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 554, Issues 1-3, 1 December 2005, p.92-113.
  20. В.В. Анашин, Р.В. Достовалов, А.А. Краснов, Н.В. Федоров, И.Р. Коллинз, В.Л. Рузинов, О.Б. Малышев. Исследование фотодесорбционных свойств вакуумной камеры с напыленным геттером TiZrV. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №11, с.37-42, ноябрь 2003.
  21. V.V. Anashin, I.R. Collins, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, A.A. Krasnov, O.B. Malyshev, V.L. Ruzinov. Comparative study of photodesorption from TiZrV coated and uncoated stainless steel vacuum chamber. // Vacuum, vol.75, p.155-159 (2004).
  22. V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, A.A. Krasnov, V.L. Ruzinov. Adsorption and desorption properties of TiZrV getter film at different temperatures in the presence of Synchrotron Radiation. // Journal of Physics: Conference Series 100 (2008).

23. M. Tischer, K. Balewski, M. Seidel, L. Yongjun, A.A. Krasnov, V.S. Kuzminykh, E.B. Levichev, P.D. Vobly, K.V. Zolotarev. Status of the PETRA III Damping Wigglers. - Edinburgh 2006, EPAC, pp.3565-3567.
24. В.В. Анашин, А.А. Краснов, А.М. Семенов. Напыление геттерных покрытий в малоапертурных камерах. // Вакуумная наука и техника, материалы конференции, p.70-74, 2009.
25. Е.В. Абакумова, В.В. Анашин, ... А.А. Краснов и др. Вакуумная система секций охлаждения пучка PETRA III. // Вакуумная техника и технология. Том 21, №2, 2011, стр.85-89.
26. В.В. Анашин, А.А. Жуков, А.А. Краснов, А.М. Семенов. Установка магнетронного напыления геттерных покрытий в малоапертурных камерах. // Приборы и техника эксперимента, 2009, №6, стр. 127-130.
27. E. Abakumova, V. Anashin, ... A.Krasnov et al. Performance of the vacuum system for the PETRA III damping wiggler section. // Vacuum, Volume 86, Issue 7, 8 February 2012, p.822-826.



**КРАСНОВ Александр Анатольевич**

**Исследование и прогнозирование  
динамической плотности остаточных газов  
в вакуумных камерах современных  
ускорительно-накопительных комплексов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 25.09. 2012 г.

Подписано в печать 26.09. 2012 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 24

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*