

*На правах рукописи*

**СЕМЕНОВ Алексей Михайлович**

**РАЗРАБОТКА,  
ИССЛЕДОВАНИЕ И ЗАПУСК ВАКУУМНОЙ  
СИСТЕМЫ БУСТЕРА-СИНХРОТРОНА ДЛЯ  
ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ NSLS-II**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2015**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Краснов Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Калинин Юрий Жоржевич – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва, заведующий лабораторией.

Щерба Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», г. Омск, профессор, заведующий кафедрой.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В последние годы синхротронное излучение широко используется для проведения самых передовых экспериментов по физике и химии, биологии и медицины, геологии и археологии.

В первых специализированных источниках СИ электроны инжектировались в накопительное кольцо при малой энергии, затем энергия поднималась, стабилизировалась и проводились эксперименты. При этом ток пучка уменьшался со временем, падала интенсивность СИ. Через час/два цикл с опусканием энергии, накоплением электронов и подъемом энергии повторялся.

Для получения максимальной яркости в непрерывном режиме накопительные кольца стали создаваться в комплексе с постоянно работающими инжекторами на энергию основного кольца (линейные ускорители или синхротроны). Инжекция на полной энергии позволяет не проводить перестройку магнитной системы, а добавлять электроны к уже движущимся в накопительном кольце сгусткам электронов, компенсируя происходящие потери частиц.

Одной из важных систем любого ускорительного комплекса является вакуумная система, которая проектируется с учетом ряда жестких требований. Во-первых, получение требуемого уровня вакуума в вакуумных камерах, от которого напрямую зависит время жизни пучка. Немаловажным фактором для выполнения данного требования является правильный выбор материалов для камер и различных узлов. Необходимо помнить, что материал вакуумных камер влияет не только на газовыделение со стенок, но может служить, например, источником возмущения магнитного поля ускорителя, за счет индуцируемых токов Фуко. Во-вторых, должна обеспечивать высокую надежность при эксплуатации, и длительные периоды бесперебойной работы.

На сегодняшний день в мире работают и строятся в большинстве своем источники СИ 3<sup>го</sup> поколения, к таким относится NSLS-II (Брукхейвенская Национальная лаборатория, США), в котором в 2014 г. были получены первые пучки электронов (средний ток 25 мА).

NSLS-II состоит из линейного ускорителя электронов на 200 МэВ, синхротрона на энергию инжекции до 3 ГэВ, основного накопительного кольца и исследовательских станций СИ. Отличительной особенностью бустера NSLS-II, по сравнению с другими подобными установками, является рекордный (до 20 мА) накопленный ток пучка.

## **Цель диссертационной работы**

- Проектирование вакуумной системы бустера.
- Определение профиля давлений остаточного газа с учетом термической и фотонно-стимулированной десорбций.
- Поиск оптимизированной конструкции вакуумных камер дипольных магнитов.
- Сборка и запуск бустера NSLS-II.

## **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора в ИЯФ СО РАН спроектирована вакуумная система бустера NSLS-II и выполнен расчет профиля давлений с учетом термической и фотонно-стимулированной десорбций, рассмотрен вариант использования нераспыляемых геттеров в качестве распределенных насосов в вакуумных камерах бустера, проведены расчеты и эксперименты по определению механической прочности и теплового режима вакуумных камер дипольных магнитов и предложена оптимизированная конструкция камеры, разработана и осуществлена система измерения параметров и контроль качества вакуумных камер, выполнена сборка и запуск всей вакуумной системы в туннеле бустера NSLS-II.

## **Научная новизна**

Впервые спроектирована вакуумная система и вычислен профиль давлений остаточных газов с учетом термической и фотонно-стимулированной десорбций бустерного синхротрона с рекордным средним током пучка (20 мА) и энергией 3 ГэВ.

Рассмотрен вариант использования нераспыляемых геттеров в вакуумной системе бустера.

Впервые проведены эксперименты по влиянию синхротронного излучения на искажение геометрии и распределения механических напряжений в тонкостенных протяженных вакуумных камерах.

Для минимизации влияния вакуумных камер на однородность магнитного поля определены минимально допустимые толщины вакуумных камер дипольных магнитов и перепускных элементов бустера NSLS-II.

## **Научная и практическая ценность работы**

Результаты диссертационной работы автора легли в основу проектирования вакуумной системы бустера NSLS-II, который успешно работает с 2013 г. Полученные экспериментальные данные по определению теплового режима вакуумных камер дипольных магнитов в зависимости от мощности синхротронного излучения (СИ), падающего на стенку камеры позволяют оптимизировать конструкцию вакуумных камер будущих современных физических комплексов.

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

1. Вакуумная система бустера NSLS-II, удовлетворяющая требованиям на степень разрежения  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр в присутствии синхротронного излучения.
2. Вариант использования нераспыляемых геттеров в вакуумной системе.
3. Расчет профиля давлений остаточного газа для бустера NSLS-II с учетом термо- и фотонно-стимулированной десорбций.
4. Расчеты и эксперименты по определению механической прочности и теплового режима вакуумных камер диполей. Оптимизированная конструкция вакуумных камер.
5. Сборка и запуск вакуумной системы бустера с полученными требуемыми параметрами.

## **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: Particle Accelerator Conference PAC-2011, BNL, New York (Нью-Йорк, США, 28 марта - 1 апреля 2011); XVIII Научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника» (Судак, Украина, 15-24 сентября 2011); XXII Intern. Workshop on Charged Particle Accelerators IWCPA2011, Alushta, Ukraine (Алушта, Украина, 22-28 сентября 2011); 4th International Particle Accelerator Conference IPAC-2013, Shanghai, China (Шанхай, Китай, 12 - 17 мая, 2013); XX Национальная конференция по использованию синхротронного излучения СИ-2014, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 7-10 июля, 2014; XXIV Российская Конференция по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2014, Обнинск, 6 - 10 октября 2014, а также содержатся в статьях (в 2-х реферируемых научных журналах).

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 38 наименований, изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена проблематика современных специализированных источников СИ. Кратко представлены основные параметры источника СИ третьего поколения NSLS-II и его содержание. Сформулированы цели диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию требований к уровню вакуума и теоретическому прогнозированию динамического давления остаточных газов, вызванного синхротронным излучением.

В первом параграфе проведен сравнительный анализ современных существующих бустерных синхротронов, кратко описаны режимы работы бустера NSLS-II в одногерцовом и двухгерцовом режимах, представлена магнитная структура одного суперпериода бустера (см. рис. 1).

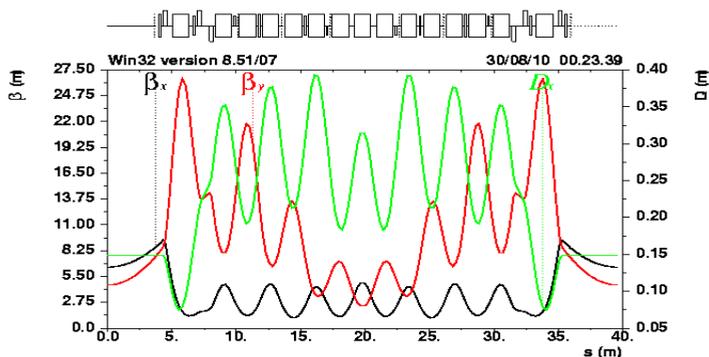


Рис. 1. Оптические функции одного суперпериода. Ось OY (слева) соответствует  $\beta$ -функциям, ось OY (справа) - дисперсии. По горизонтали отложено расстояние четверти периметра бустера. Все размерности в метрах.

Во втором параграфе представлены требования на степень разрежения в вакуумных камерах специализированных источников СИ. Показано, что более жесткие требования к вакууму связаны с образованием ионов остаточных газов, и приведена оценка влияния ионной нестабильности на требуемый уровень динамического давления.

В третьем параграфе выполнен расчет основных параметров СИ, необходимый для проектирования вакуумной системы. Наибольшее влияние синхротронного излучения наблюдается в дефокусирующих магнитах, где максимальная плотность СИ составляет 42 Вт/м. В Таблице 1 показаны основные параметры СИ для бустера при энергии 3 ГэВ.

Таблица 1. Основные параметры СИ, энергия электронов – 3 ГэВ

Макс. мощность СИ (BD), Вт/м	42
Макс. мощность СИ (BF), Вт/м	7,0
Полная мощность СИ, кВт	2,0
Критическая энергия СИ при полной энергии электронов, кэВ	6,69
Средний поток фотонов, фотон/сек/м	$8,8 \cdot 10^{16}$
Соотношение между пиковой и средней мощностью СИ при 2 Гц	6,9

Десорбция газов со стенок вакуумных камер под действием фотонов оказывается наиболее интенсивным источником газовой нагрузки и, поэтому, для достижения вакуума не хуже  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр необходимо, чтобы коэффициент фотонно-стимулированной десорбции был не выше  $2 \cdot 10^{-5}$  молекул/фотон. Для достижения этой величины необходимо набрать дозу на уровне  $10^{23}$  фотон/м.

В четвертом параграфе рассматривается вариант применения нераспыляемых геттеров (НЕГ) в качестве распределенных насосов. С этой целью был создан прототип дипольной вакуумной камеры с внутренним сечением 41x24 мм, и длиной 1,3 м из нержавеющей стали марки 316 L. Напыление осуществлялось на созданной в ИЯФ СО РАН установке магнетронного напыления. Напыление НЕГ осуществлялось методом магнетронного напыления во внешнем соленоидальном поле, который позволяет получать равномерные покрытия на материале основы. Катод состоит из трех переплетенных проволочек.

Химический состав покрытия был измерен на образцах, специально размещенных на торце камеры, при помощи метода РФА-СИ на станции СИ ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН: Ti – 32%, Zr – 18,6%, V – 49,4%. На Рис. 2 показан спектр химических элементов, полученный на станции РФА-СИ.

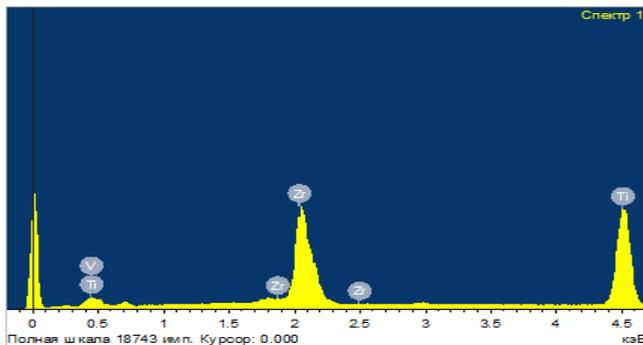


Рис. 2. Спектр химических элементов на образцах.

Равновесное давление для  $H_2$  и  $CO$  в длинных вакуумных камерах достигается между суммарным потоком молекул, десорбированных со стенок камеры, и суммарным потоком молекул, которые откачиваются самими стенками.

$$P = \frac{\eta \cdot \Gamma'}{K \cdot S \cdot A},$$

где  $\eta$  – коэффициент фотонно-стимулированной десорбции, молекул/фотон;  $\Gamma'$  – поток фотонов СИ в дипольной камере, фотон/с;  $K \approx 3,2 \cdot 10^{19}$ , молекула/(л·Торр) – переводной коэффициент, равный количеству молекул в литровом объеме при давлении 1 Торр при комнатной температуре  $\sim 300$  К;

$S = 3,64 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}$  – быстрота откачки газа массы  $M$  на единицу площади поверхности стенок камеры, л/(с·см<sup>2</sup>);  $\alpha$  – коэффициент прилипания;  $T$  – температура, при которой находится газ, К;  $M$  – молекулярная масса, а.е.м.;  $A$  – площадь поверхности стенок, см<sup>2</sup>.

В протяженной камере пучка, без вакуумных насосов, динамическое давление метана определяется равновесием между фотонно-стимулированной десорбцией метана под действием СИ и откачкой метана посредством распада на углерод и водород под действием электронного пучка и фотонов СИ. В Таблице 2 приведены оценочные значения парциального динамического давления для протяженных вакуумных камер, внутренняя поверхность которых покрыта НЕГ,

$$P = \eta \cdot \frac{\Gamma'}{K \left( \sigma_{ph} \cdot \Gamma' \cdot \frac{\sqrt{b \cdot R}}{1 - R_{ph}} + \sigma_e \cdot \frac{I}{e} \right)},$$

где  $I$  – ток пучка, А;  $R$  – радиус траектории в дипольных магнитах, м;  $b$  – внутренний размер дипольной камеры по горизонтали, м;  $\Gamma'$  – средний поток СИ в поворотной секции, фотон/м·с;  $\eta$  – начальное значение коэффициента фото-десорбции метана, молекул/фотон;  $\sigma_e$  – сечение диссоциации метана при взаимодействии с релятивистскими электронами, м<sup>2</sup>;  $\sigma_{ph}$  – среднее сечение диссоциации метана при взаимодействии с фотонами СИ, м<sup>2</sup>;  $R_{ph}$  – эффективный коэффициент отражения фотонов СИ под малыми углами;  $K$  – переводной коэффициент, 1/(м<sup>3</sup>·Торр).

Видно, что применение нераспыляемых геттеров в бустерном синхротроне NSLS-II обеспечивает требуемые вакуумные условия. В то же время, при использовании геттеров необходимо увеличивать зазор в магнитах для размещения нагревателей и теплоизоляции, что усложняет и удорожает магнитную систему. Учитывая более «мягкие» требования к уровню вакуума в бустере, а также развитие технологий предварительной очистки внутренней поверхности вакуумных камер, возможно, обойтись

использованием в проекте только современных магниторазрядных насосов, и тем самым достичь требуемых результатов, более простыми и дешевыми средствами.

Таблица 2. Парциальное динамическое давление в протяженной камере с напыленным НЕГ

	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>
Давление, Торр	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-9}$

В пятом параграфе представлен расчет профиля давления (см. рис. 3).

Для достижения уровня вакуума не хуже  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр необходимо накопить интеграл тока порядка 1,43 А·час, что соответствует накопленной дозе фотонов  $10^{23}$  фотон/м.

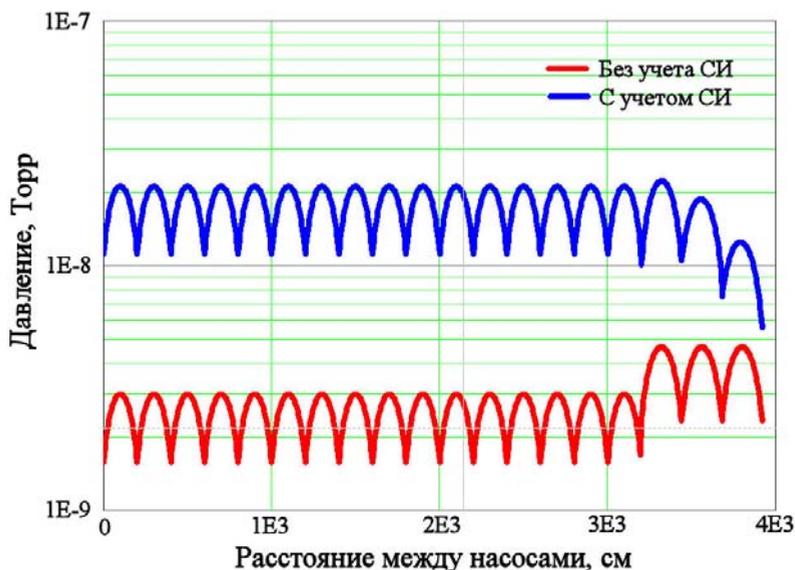


Рис. 3. Профиль давления для одного суперпериода. Коэффициент термического газовыделения равен  $10^{-11}$  л·Торр/сек/см<sup>2</sup>, для поворотной секции:  $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$  молекул/фотон,  $\Gamma = 8,8 \cdot 10^{16}$  фотон/м/сек; для инжекционного промежутка (среднее):  $\Gamma = 1,8 \cdot 10^{16}$  фотон/м/сек,  $\eta = 4,3 \cdot 10^{-4}$  молекул/фотон. (нижний график – термодесорбция, верхний график – фотонно-стимулированная десорбция).

**Во второй главе** описана вакуумная система бустера и представлены конструкции вакуумных камер дипольных и импульсных магнитов.

В первом параграфе приводится описание вакуумной системы бустера (рис. 4).

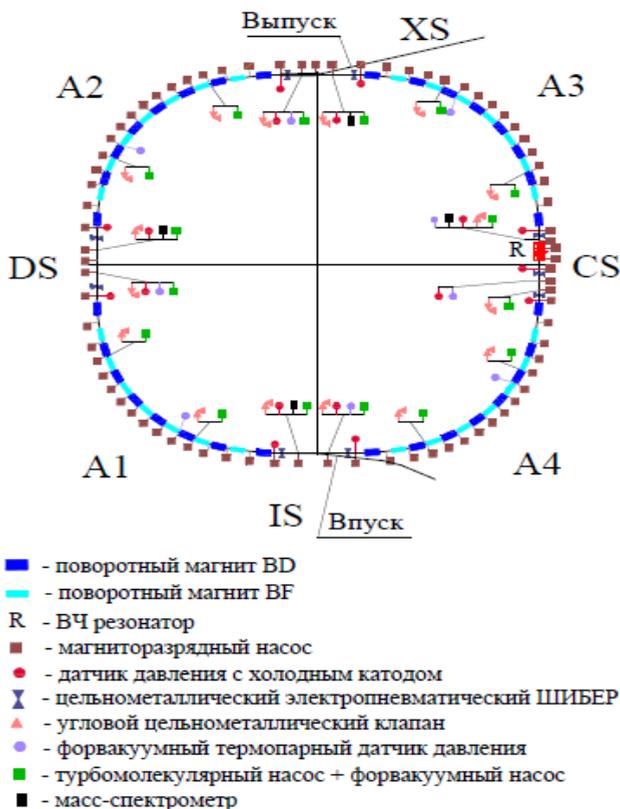


Рис. 4. Схема вакуумной системы бустера NSLS-II.

Периметр бустера 158,4 м. Вакуумная система состоит из 4-х суперпериодов (из четырех поворотных секций по 31 м длины и четырех прямолинейных промежутков по 8 м длины), изолированных друг от друга цельнометаллическими электропневматическими прямопролетными клапанами Ду 63 (время срабатывания  $\sim 2 \div 3$  сек). Высокий вакуум достигается магниторазрядными насосами (45 л/сек), расположенных в среднем на расстоянии 2,3 м друг от друга (по 15 насосов в поворотных секциях и по 2/3 – в прямолинейных промежутках). В каждом промежутке располагается по 2 клапана для форвакуумной откачки, по 1 форвакуумному датчику и по 2 датчика высокого вакуума. В прямолинейных промежутках также устанавливаются по 1 масс-спектрометру.

Выбор материала для большинства вакуумных камер бустера обуславливается импульсным режимом работы магнитов. Необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например,

нержавеющие марки стали аустенитного класса. В таком случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения варьируется в диапазоне от десятых долей до нескольких процентов, для различных магнитов), что легко компенсируется источниками питания магнитов.

Вакуумная камера в поворотных магнитах, выполненная из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L, представляет собой в поперечном сечении эллипс  $41 \times 24 \text{ мм}^2$  (молекулярная проводимость камеры 3,2 л·м/сек). Толщина дипольной вакуумной камеры равна 1 мм. Из-за малого расстояния между магнитами в поворотных секциях вакуумная камера включает в себя дипольные камеры BD и BF, короткие прямолинейные промежутки для мультипольных магнитов, порты для дополнительного вакуумного оборудования (датчики давления, насосы или клапаны для форвакуумной откачки), сильфон, пикап-электроды, а также специальные плавные переходы с эллипса  $41 \times 24 \text{ мм}^2$  на отверстия круглого сечения диаметром 46 мм<sup>2</sup>. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat Ду 63, соединения вакуумной камеры выполнены аргоно-дуговой сваркой.

Большинство камер в прямолинейных промежутках имеют эллиптическое сечение  $62 \times 22 \text{ мм}$  с молекулярной проводимостью равной 4 л·м/сек. Толщина стенки 1 мм.

Вакуумная камера впускных/выпускных BUMP магнитов имеет форму эллипса с внутренней апертурой  $60,3 \times 21 \text{ мм}^2$ . Толщина стенки 0,5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются ребра жесткости из нержавеющей стали 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм.

Камеры септумов состоят из двух частей, основной камеры и камеры впуска (для впускного септума) или камеры выпуска (выпускной септум). Апертура основных камер впускного и выпускного септумов аналогична апертуре дипольного магнита. Камера впуска имеет диаметр 28 мм (толщина стенки 0,4 мм), в то время как камера выпуска благодаря более сгруппированного пучка электронов- диаметр 16 мм (с толщиной стенки 0,3 мм). С целью сохранения гладкости камеры сильфоны в промежутках впуска/выпуска снабжены ВЧ экранами, изготовленными из нержавеющей стали марки 316 LN.

Вакуумные камеры диагностического промежутка, изготовленные из трубы нержавеющей стали марки 316 L, имеют апертуру  $\text{Ø}63,5$  с толщиной стенки 1,6 мм.

Пикап-электроды в поворотных секциях имеют апертуру  $41 \times 24 \text{ мм}^2$  как дипольная вакуумная камера, в прямолинейных промежутках- эллипс  $62 \times 22 \text{ мм}^2$ .

Во втором параграфе представлена оптимизированная конструкция дипольной вакуумной камеры.

Из-за малой мощности СИ (максимальная мощность составляет 42 Вт/м в поворотных ВД магнитах, в ВФ магнитах мощность СИ меньше в 6 раз) в специальных приемниках излучения нет необходимости. Однако такой мощности может оказаться достаточно для деформации тонкостенной вакуумной камеры.

В то же самое время толщина стенок вакуумных камер должна быть как можно меньше, чтобы минимизировать влияние вихревых токов (токов Фуко), возникающих при изменении магнитного потока в процессе ускорения электронов. Величина этих токов пропорциональна толщине стенки камеры и удельной проводимости материала, из которого изготовлена камера.

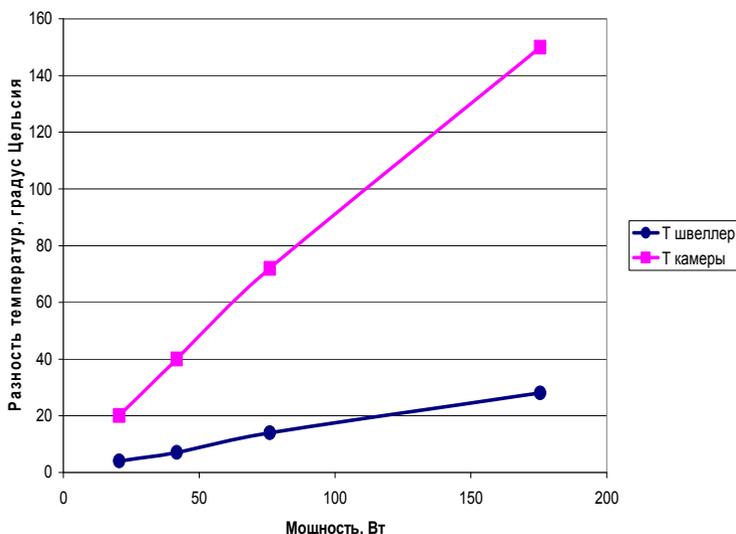


Рис.5. Разность температур между нагревом камеры и окружающей среды

Для определения минимально возможной толщины стенки вакуумных камер было проведено два независимых эксперимента:

– Измерение средней температуры камеры и двух швеллеров, которые служат имитаторами ярма магнита, в зависимости от приложенной мощности, а также измерение коэффициента конвективного теплообмена (рис. 5). Коэффициент конвективного теплообмена равняется  $8,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

– Измерение нагрева в четырех точках сечения камеры, а также определение изгиба вакуумной камеры от первоначального положения в случае неравномерного нагрева, имитирующего воздействие СИ. Для этой цели был создан прототип вакуумной камеры с апертурой  $41 \times 24 \text{ мм}$ . В Институте гидродинамики СО РАН было выполнено напыление оксида

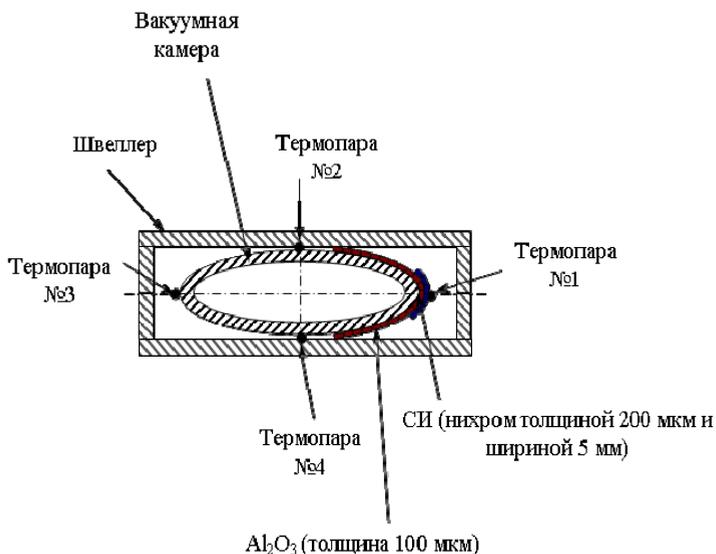


Рис. 6. Схематическое представление расположения термопар и сечения вакуумной камеры.

алюминия ( $Al_2O_3$ ) толщиной 100 мкм, поверх которого была нанесена полоска нихрома толщиной 200 мкм и шириной 5 мм (рис. 6). Один конец вакуумной камеры был жестко закреплен, а другой- свободен. Измерение изгиба свободного конца вакуумной камеры проводилось при помощи штангенциркуля. Точка измерения изгиба находилась на расстоянии, равном длине дипольного ВД магнита, от закрепленного конца. Имитация пучка СИ выполнялась при помощи пропускания тока через полоску нихрома. Мощность, выделяемая таким проводником, равнялась мощности СИ. В Таблице 3 показаны результаты измерений.

Таблица 3. Сравнение расчетов нагрева и механических деформаций вакуумной камеры с полученными экспериментальными данными.

	Мощность, Вт	$\Delta T$ термопара №1, °C	$\Delta T$ термопара №2, °C	$\Delta T$ термопара №3, °C	$\Delta T$ термопара №4, °C	Отклонение, мм
Расчет	41,7	62	39	32	39	4,3
Эксперимент	41,7	60	37	30	39	5

Для достижения необходимой механической прочности толщина вакуумной камеры диполей должна быть не меньше 1 мм. Камера

испытывает из-за присутствия синхротронного излучения механические напряжения 114,5 МПа, что является надежным запасом по прочности.

В третьем параграфе описываются требования к камерам импульсных магнитов и представлены расчеты механических прочностей.

**Третья глава** посвящена вакуумным испытаниям камер и методике экспериментов по измерению коэффициента термического газовыделения.

В первом параграфе детально описана экспериментальная установка, на которой проводился предварительный прогрев всех вакуумных камер бустера для выявления возможных микротечей и обезгаживания камер от загрязнений в процессе финишной сборки, а также на этой установке выполнялись измерения коэффициента термического газовыделения.

Во втором параграфе приводится процедура предварительного прогрева и методика измерения коэффициента термического газовыделения.

Коэффициент термического газовыделения равняется  $10^{-10}$  л·Торр/сек/см<sup>2</sup> и даже лучше для нержавеющей камер, прогретых при  $200 \div 250$  °С в течение 24 часов с последующим остыванием под вакуумом, затем заполненных сухим азотом, и через неделю повторно откаченных.

В третьем параграфе показаны результаты измерения коэффициента термического газовыделения.

В четвертом параграфе изложена процедура контроля качества для всех серийных камер, созданная на основании проведенных испытаний прогрева и измерений коэффициента термического газовыделения на одной вакуумной камере:

- очистка отдельных элементов вакуумной камеры и визуальный контроль;
- обезгаживание отдельных элементов в печи;
- контроль размеров всех элементов до сварки между собой;
- визуальный контроль мест сварки;
- контроль размеров всей вакуумной камеры после сварки;
- проверка на герметичность (натекание  $<10^{-10}$  л·Торр/сек) и прогрев при 200-250 °С;
- измерение коэффициента термического газовыделения после остывания;
- спектр остаточных газов для контроля чистоты внутренней поверхности камеры, финишная проверка на герметичность;
- контроль размеров всей вакуумной камеры после прогрева;
- проверка изоляции пикап-электродов от корпуса;
- проверка изоляции камеры, установленной в магнит.

**Четвертая глава** посвящена описанию системы автоматизации вакуумного оборудования бустера.

**В пятой главе** представлены результаты запуска вакуумной системы бустера.

В декабре 2013 года началась эксплуатация бустера и через два дня были получены первые пучки электронов. Максимальной энергии электронов (3 ГэВ) удалось добиться через месяц после запуска бустера.

В таблице 4 приведены сравнительный анализ между расчетом и экспериментальными данными в местах расположения датчиков давления.

Таблица 4. Сравнительный анализ давления между расчетом и экспериментальными данными.

		A1	A2	A3	A4	DS	XS	IS
Расчет	без пучка	$1,6 \cdot 10^{-9}$ Торр	$1,6 \cdot 10^{-9}$ Торр	$1,6 \cdot 10^{-9}$ Торр	$1,6 \cdot 10^{-9}$ Торр	$2,4 \cdot 10^{-9}$ Торр	$1,7 \cdot 10^{-9}$ Торр	$2,3 \cdot 10^{-9}$ Торр
	$\frac{\Delta P}{\Delta I}$ Доза= 0,2 Ач	$4,2 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$4,2 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$4,2 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$4,2 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$6,8 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$8,3 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$5,3 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА
Эксперимент	без пучка	$4,4 \cdot 10^{-10}$ Торр	$3,9 \cdot 10^{-10}$ Торр	$1,8 \cdot 10^{-10}$ Торр	$2,5 \cdot 10^{-10}$ Торр	$6,9 \cdot 10^{-10}$ Торр	$8,2 \cdot 10^{-10}$ Торр	$1,3 \cdot 10^{-9}$ Торр
	$\frac{\Delta P}{\Delta I}$ Доза= 0,2 Ач	$4,7 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$9,3 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$5 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$7,3 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$8,7 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$8,7 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА	$1,1 \cdot 10^{-8}$ Торр/мА

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведен расчет профиля давлений остаточного газа для бустера NSLS-II с учетом термо- и фотонно-стимулированной десорбций.

Рассмотрен вариант использования нераспыляемых геттеров в качестве распределенных насосов в вакуумных камерах бустера.

Выполнены расчеты и эксперименты по определению механической прочности и теплового режима вакуумных камер диполей, представлена оптимизированная конструкция камер.

Предложена вакуумная система бустера NSLS-II. Получен высокий средний вакуум порядка  $10^{-9}$  Торр.

Разработана и осуществлена система измерения параметров и контроль качества вакуумных камер.

Осуществлены сборка и запуск вакуумной системы бустера. Полученный вакуум до и после запуска синхротрона хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах**

1. 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.
2. S. Gurov, A. Akimov, O. Anchugov, ..., A. Semenov, et al. "Status of NSLS-II Booster", Proceedings PAC'2011, New York, NY, USA, 2011.
3. А.М. Семенов, В.В. Анашин, А.А. Краснов, Н.-С. Hseuh, Т. Shaftan. Вакуумная система бустера NSLS-II. XVIII научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», материалы конференции, Судак, 2011.
4. Гуров С.М., Акимов А.В., Анчугов О.В., ..., Семенов А.М. и др., «Статус бустера NSLS-II», Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), Problems of atomic science and technology, 2012, №4, с 3-6.
5. V.V. Anashin, S.M.Gurov, V.A.Kiselev, A.A.Krasnov, A.M.Semenov. NSLS-II booster vacuum system. Труды XXIV Российская Конференция по ускорителям заряженных частиц "RUPAC-2014", Обнинск, 6 - 10 октября 2014.
6. А.М. Семенов, В.В. Анашин, С.М. Гуров, А.А. Краснов. Статус и описание вакуумной системы бустера NSLS-II, Известия РАН. Серия физическая, 2015, том 79, №1, с. 58-62.

СЕМЕНОВ Алексей Михайлович

**Разработка,  
исследование и запуск вакуумной  
системы бустера-синхротрона для  
источника синхротронного излучения  
третьего поколения NSLS-II**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор 12.10. 2015 г.

Подписано в печать 14.10. 2015 г.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 17

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

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