

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Краснов Александр Анатольевич,
кандидат физико-математических наук

Новосибирск 2015

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Расчетные параметры вакуумной системы бустера NSLS-II	9
1.1. Бустерный синхротрон NSLS-II	9
1.2. Время жизни пучка и требование на степень разрежения	13
1.3. Синхротронное излучение	19
1.3.1. Параметры синхротронного излучения	19
1.3.2. Расчет параметров синхротронного излучения в бустере	20
1.3.3. Фотонно-стимулированная десорбция	26
1.4. Возможность получения высокого вакуума на основе нераспыляемых геттеров	30
1.4.1. Прототип дипольной вакуумной камеры, покрытой нераспыляемым геттером Ti-Zr-V	34
1.5. Расчет профиля давлений для бустера NSLS-II, вызванного термо-/фотонно-стимулированной десорбциями	42
Глава 2. Проектирование вакуумной системы бустера	47
2.1. Вакуумная система бустера	47

2.2. Конструкция вакуумной камеры дипольных магнитов	55
2.2.1. Расчеты неравномерного нагрева, вызванного синхротронным излучением	56
2.2.2. Расчеты механической прочности вакуумной камеры	62
2.2.3. Оценка влияний токов Фуко	66
2.2.4. Изготовление камер эллиптической формы	70
2.3. Требование к проектированию вакуумных камер импульсных магнитов	72
2.3.1. BUMР магнит	72
2.3.2. Кикеры впуска/выпуска	75
2.3.3. Камеры впускного и выпускного септумов	78
2.3.3.1. Технология изготовления вакуумной камеры септум магнитов	81
2.3.3.2. Технология пайки	81
Глава 3. Вакуумные испытания, методика измерения коэффициента термического газовыделения	84
3.1. Установка для прогрева и измерения	84
3.2. Прогрев и методика измерений	87
3.3. Временная зависимость коэффициента термического газовыделения	90
3.4. Вакуумные испытания	92

Глава 4. Автоматизация вакуумной системы бустера	93
Глава 5. Запуск бустера NSLS-II	98
Заключение	105
Литература	107

Введение

Синхротронное излучение (СИ)- это излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися по искривлённым магнитным полем траекториям с релятивистскими скоростями. Впервые экспериментально излучение было обнаружено при проведении экспериментов с электронами на синхротроне с энергией 70 МэВ фирмы «Дженерал Электрик». Отсюда и название синхротронного излучения [2]. В последние годы синхротронное излучение используется для проведения самых передовых экспериментов по физике и химии, биологии и медицине, геологии и археологии [1, 2, 3].

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.

В настоящее время для получения максимальной яркости в непрерывном режиме накопительные кольца создаются в комплексе с постоянно работающими инжекторами на энергию основного кольца (линейные ускорители или бустерные синхротроны) [4, 5, 6, 7]. Перестройка магнитной системы не проводится при инъекции на полной энергии, а электроны

добавляются 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. В первую очередь необходимо гарантировать получение требуемого уровня вакуума, 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. Для обеспечения контроля общего и парциального давлений остаточного газов необходимо правильно распределить датчики давления и масс-спектрометры.

Во-вторых, немаловажно обеспечить требуемую быстроту откачки системы. Для этого вакуумные камеры должны обладать достаточной проводимостью, а вакуумные насосы- необходимой быстротой откачки.

Исследовательские работы, выполняемые пользователями на станциях СИ, идут непрерывно, и поэтому вакуумная система (как и каждая другая система) должна обеспечивать высокую надежность при эксплуатации, и длительные периоды бесперебойной работы. Применительно к бустеру NSLS-II (National Synchrotron Light Source-II) суммарное время остановки комплекса не должно превышать 24 часов в год из-за каких-либо неисправностей.

На сегодняшний день в мире работают и строятся в большинстве своем источники СИ 3^{ого} поколения, к таким относится NSLS-II в BNL (Брукхейвенская Национальная лаборатория, США), в котором в 2014 г. были получены первые пучки электронов (средний ток 25 мА). Основные параметры комплекса NSLS-II представлены в [8].

NSLS-II состоит из линейного ускорителя электронов на 200 МэВ, бустерного синхротрона до энергии инжекции 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.

Основу данной диссертации составляют результаты работ, выполненные автором по расчетам профиля давлений остаточных газов, разработке вакуумной системы бустера, а также проектированию и экспериментальному исследованию основных элементов вакуумной системы. В процессе выполнения работ были получены экспериментальные данные по определению теплового режима вакуумных камер дипольных магнитов в зависимости от мощности синхротронного излучения (СИ), падающего на внутреннюю стенку камеры, что является **актуальной** проблемой для оптимизации конструкций вакуумных камер будущих современных ускорительных комплексов. Эти работы были выполнены в период с 2008 по 2014 гг.

На защиту выносятся следующие положения:

Вакуумная система бустера NSLS-II с рекордным током накопления (20 мА) и удовлетворяющая требованиям на степень разрежения $2 \cdot 10^{-8}$ Торр в присутствии синхротронного излучения;

Вариант использования нераспыляемых геттеров в вакуумной системе;

Расчет распределения давлений остаточного газа для бустера NSLS-II с учетом термо- и фотонно-стимулированной десорбций;

Расчеты и эксперименты по определению механической прочности и теплового режима вакуумных камер диполей, представлена оптимизированная конструкция вакуумных камер;

Сборка и запуск вакуумной системы бустера с полученными требуемыми параметрами.

Глава 1

Расчетные параметры вакуумной системы бустера

NSLS-II

1.1. Бустерный синхротрон NSLS-II

Одной из систем, существующих или строящихся источников СИ 3^{ого} поколения являются бустерные синхротроны (предускорители), с энергией равной энергии заряженных частиц в основном кольце накопителя. В Таблице 1.1.1 приводятся основные параметры нескольких современных бустерных синхротронов.

Как видно из таблицы 1.1.1 каждый бустер по-своему уникален, но в параметрах бустера NSLS-II заложен рекордный, на сегодняшний день, средний ток пучка 20 мА, что влечет за собой необходимость проведения более аккуратных расчетов устойчивости вакуумной камеры вследствие неравномерного нагрева, вызванного СИ.

Магнитная структура бустера включает 4 квадранта (суперпериода), состоящих из поворотной секции и прямолинейного промежутка. Магнитная структура обеспечивает горизонтальный эмиттанс меньше 37,4 нм·рад, но при этом накладывает ограничения на апертуру вакуумных камер. На Рис. 1.1.1 представлены бетатронные функции и дисперсия для одной поворотной секции [13]. Каждая поворотная секция включает в себя: 8 дефокусирующих

(BD) с углом поворота $8,39^\circ$ и 7 фокусирующих (BF) с углом поворота $3,27^\circ$ дипольных магнитов, 6 квадрупольных и 4 секступольных магнитов.

Бустер NSLS-II имеет два основных режима работы, различающиеся частотой повторения инъекции и экстракции сгустков электронов.

Работа бустера в 1 Гц режиме: магнитное поле, равное 0,075 Тл, соответствующее энергии электронов при инъекции (200 МэВ), поддерживается в течение 300 мс. Затем за время 300 мс поле увеличивается до максимального (1,1 Тл), что соответствует максимальной энергии при выпуске, сохраняется в течение 10 мс, затем уменьшается до 0,01 Тл за 300 мс, и возвращается к начальному значению за 100 мс.

Работа бустера в 2 Гц режиме: увеличение магнитного поля с 0,075 Тл до 1,1 Тл за 250 мс, затем «полочка» в течение 20 мс, и спад до первоначальной величины за 180 мс.

Заметим также, что максимальная скорость нарастания магнитного поля одинакова для обоих режимов. На Рис. 1.1.2 представлены режимы работы бустера.

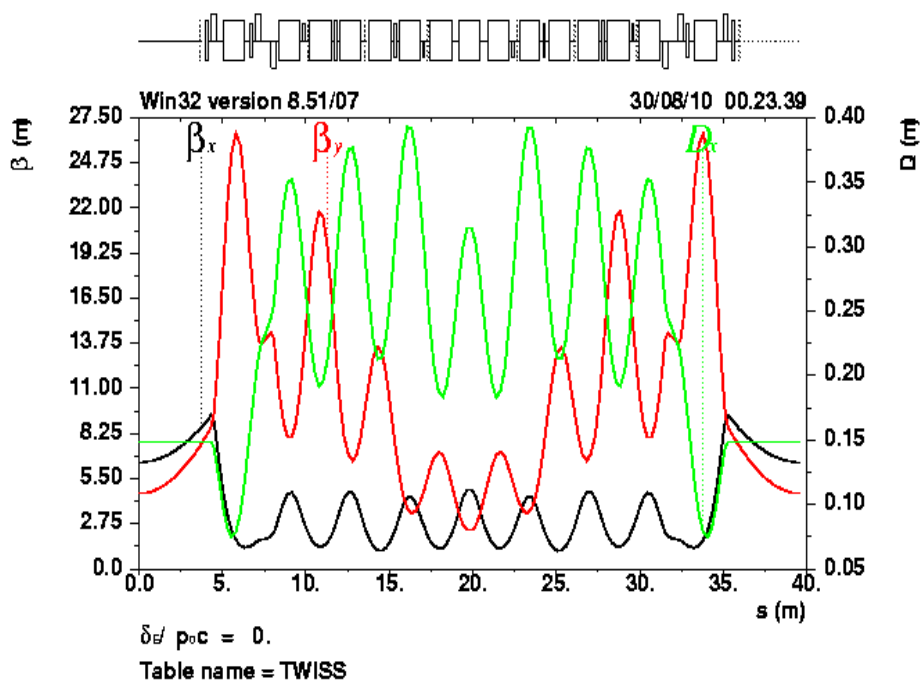


Рис. 1.1.1. Оптические функции одного суперпериода. Ось OY (слева) соответствует β -функциям, ось OY (справа) - дисперсии. По горизонтали отложено расстояние четверти периметра бустера. Все размерности в метрах.

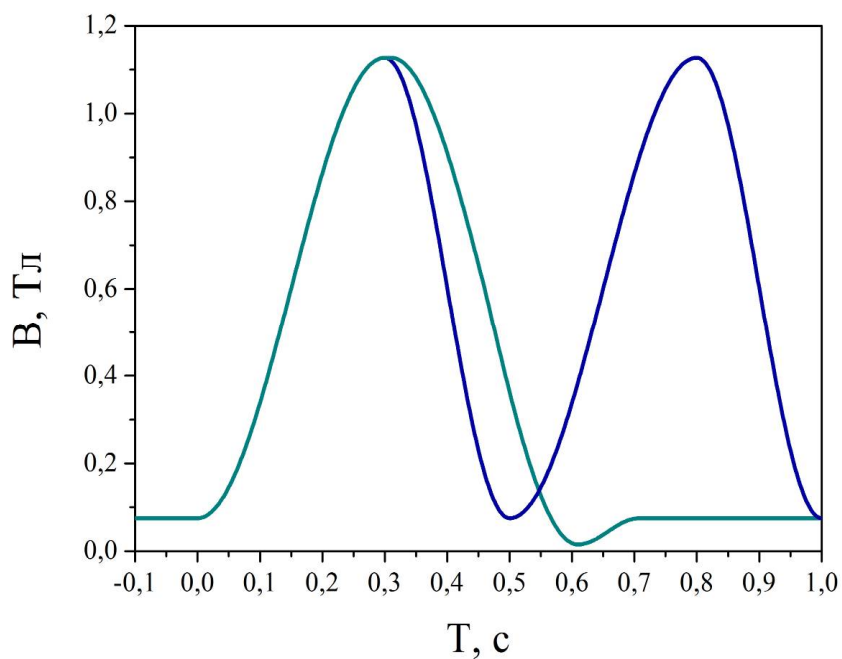


Рис. 1.1.2. Изменение магнитного поля в различных режимах работы бустера.

Таблица 1.1.1. Основные параметры современных бустеров

	ASP [9]	SOLEIL [10]	SLS [11]	ALBA [12]	NSLS-II [13, 14]
Энергия, ГэВ	3	2,5	2,4	3	3
Периметр, м	130,2	157	270	249,6	158,4
Частота повторения, Гц	1	3	3	3	1 (2)
Гор. эмиттанс, нм·рад	34	150	9	9	37,4
Ток, мА	7	15	1	5	20
ВЧ частота, МГц	500	352	500	500	500

1.2. Время жизни пучка и требование на степень разрежения

Необходимый уровень вакуума определяется требованием на время жизни пучка, т.е. на время, за которое количество заряженных частиц уменьшится в e раз из-за рассеяния на молекулах остаточного газа.

Частота рассеяния на молекулах остаточного газа, приводящих к потере частиц, определяется из соотношения:

$$f_s = N \cdot \sum_i n_i \sigma_i v = -\frac{\partial N}{\partial t}, \quad 1.2.1$$

где N - число электронов, n_i - плотность i компоненты атомов остаточного газа, σ_i - сечение взаимодействия с i компонентой атомов остаточного газа, в результате которого происходит потеря частицы, v - скорость электронов, равная скорости света.

Уравнение 1.2.1 имеет решение: $N(t) = N_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$, где N_0 - число частиц в момент времени $t = 0$.

Соответственно, обратная величина “вакуумного” времени жизни пучка в ускорителе определяется суммой частот рассеяния на каждой компоненте остаточного газа:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i n_i \sigma_i v. \quad 1.2.2$$

Требование на вакуум бустерного синхротрона менее жесткие, чем к основному кольцу. Режим работы бустера такой, что с частотой повторения 1 Гц в него инжектируется новая порция электронов, ускоряется и перепускается в основное кольцо. Для этого достаточно обеспечить время жизни пучка в течение нескольких десятков секунд. В режиме длительной эксплуатации вакуум будет улучшаться вследствие тренировки системы. Однако важно иметь достаточное время жизни электронов (10 секунд) при первых запусках синхротрона на энергии инжекции.

“Вакуумное” время жизни пучка в ускорителе определяется упругим и неупругим рассеянием на атомах и электронах остаточного газа.

Сечение упругого и неупругого рассеяния на остаточном газе определяются следующими выражениями [15]:

$$\sigma_{in} \approx 4r_e^2 \alpha \cdot Z_i^2 \left[\left(\frac{4}{3} \ln \frac{E}{\Delta E} - \frac{5}{6} \right) \cdot \ln 183 Z_i^{-1/3} + \frac{1}{9} \left(\ln \frac{E}{\Delta E} - 1 \right) \right] [\text{м}^2], \quad 1.2.3$$

$$\sigma_{en} \approx \frac{2\pi \cdot r_e^2 Z_i^2}{\gamma^2} \cdot \frac{\beta_{усред} \cdot \beta_{y0}}{a_y^2} [\text{м}^2], \quad 1.2.4$$

$$\sigma_{ie} \approx 4 \cdot \alpha \cdot r_e^2 \cdot Z_i \cdot \left\{ \left(\frac{4}{3} \ln \frac{E}{\Delta E} - \frac{5}{6} \right) \cdot \ln(1440 \cdot Z_i^{-2/3}) + \frac{1}{9} \ln \left(\frac{E}{\Delta E} - 1 \right) \right\} [\text{м}^2], \quad 1.2.5$$

$$\sigma_{ee} \approx \frac{2\pi \cdot r_e^2 Z_i}{\gamma} \cdot \frac{E}{\Delta E} [\text{м}^2], \quad 1.2.6$$

где σ_{in} , σ_{en} - сечения неупругого и упругого рассеяния на ядрах остаточного газа, соответственно, σ_{ie} , σ_{ee} - сечения неупругого и упругого

рассеяния на электронах остаточного газа, соответственно, Z_i - заряд ядра атома, E - энергия релятивистской частицы, ΔE - энергетический акцептанс ускорителя, r_e – классический радиус электрона, метр, α - постоянная тонкой структуры, $\beta_{\text{сред}}$ - средняя величина вертикальной бета-функции, метр, β_{y0} - максимальная величина вертикальной бета-функции, метр, γ - релятивистский фактор, a_y - малая полуось дипольной вакуумной камеры, метр.

В Таблице 1.2.1 представлены сечения упругого и неупругого рассеяния и парциальные давления, вычисленные автором, исходя из формул (1.2.3-1.2.6), для молекул остаточного газа для времени жизни 10 секунд и энергии электронов 200 МэВ.

Значительное влияние на время жизни пучка оказывает упругое рассеяние на ядрах остаточного газа. Спектр остаточных газов в непрогретых вакуумных камерах имеет характерный состав: водород - 80÷90%, СО - 20÷10%, остальные элементы <3÷5% (после длительного действия ионизирующего излучения). С учетом этого, в циклических ускорителях, функционирующих при комнатной температуре, СО оказывает доминирующее влияние на “вакуумное” время жизни электронных и позитронных пучков. Поэтому, для обеспечения «вакуумного» времени жизни пучка около 10 секунд, парциальное давление не должно превышать $5 \cdot 10^{-6}$ Торр для водорода, и 10^{-7} Торр для СО.

Однако пучок электронов, движущийся в накопительном кольце, вызывает ионизацию остаточного газа в вакуумной камере. Образовавшиеся ионы удерживаются электрическим полем пучка, что приводит к ухудшению эффективного вакуума и изменению фокусирующих сил, действующих на пучок, из-за чего растет эмиттанс пучка. Вследствие взаимодействия такого пучка с остаточным газом уменьшается время жизни электронов, а также могут создаться условия для развития ионной неустойчивости [16].

Время нарастания ионной неустойчивости [16, 17]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{r_e \cdot c \cdot \beta_{y_{\text{сред}}} \cdot \lambda_{\text{ион}}}{3 \cdot \gamma \cdot \sigma_{y_{\text{сред}}} \cdot (\sigma_{y_{\text{сред}}} + \sigma_{x_{\text{сред}}})} \cdot \frac{\omega_{\text{ион}}}{\Delta\omega_{\text{ион}}}, \quad 1.2.7$$

где r_e - классический радиус электрона, м, c - скорость света, м/с, γ - Лоренц-фактор, $\sigma_{y_{\text{сред}}}$ и $\sigma_{x_{\text{сред}}}$ - усредненные вертикальный и радиальный размеры пучка вдоль периметра кольца, соответственно, м, $\beta_{y_{\text{сред}}}$ - средняя β -функция вдоль бустера (рассматривается вертикальный размер камеры, так как он наиболее критичен), м, $\lambda_{\text{ион}}$ - линейная плотность ионов, ион/м, $\Delta\omega_{\text{ион}}/\omega_{\text{ион}}$ - разброс по частоте ионных колебаний, равный 0,3 (для бустера NSLS-II).

Линейная плотность ионов:

$$\lambda_{\text{ион}} = \frac{n_b \cdot N_b}{K_B \cdot T} \sigma_{\text{ион}} \cdot P, \quad 1.2.8$$

где n_b - количество сгустков электронов (для оценок: $n_b=100$), N_b - количество частиц в сгустке ($\approx 10^9$), $\sigma_{\text{ион}}$ - среднее сечение ионизации для остаточных газов

равняется $2 \cdot 10^{-22}$, м², P - давление в вакуумной камере, Па, K_B - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T - температура газа, К.

В Табл. 1.2.2 представлены параметры бустера, необходимые для расчета ионной неустойчивости. Проведенные расчеты (1.2.7) показывают, что при давлении 10^{-7} Торр время нарастания неустойчивости составляет 23 мс при энергии инжекции, и 350 мс при энергии экстракции. При давлении $2 \cdot 10^{-8}$ Торр время нарастания равняется 117 мс при энергии инжекции, и 1750 мс при энергии экстракции. Видно, что время нарастания неустойчивости в обоих случаях много меньше времени затухания пучка на энергии инжекции в многосгустковом режиме. Однако, при первичной проводке пучка в односгустковом режиме, более предпочтительно давление $2 \cdot 10^{-8}$ Торр, обеспечивающее время нарастания неустойчивости порядка времени затухания.

Таблица 1.2.1. Сечения упругого и неупругого рассеяния и необходимые парциальные давления молекул остаточного газа для обеспечения времени жизни 10 с

Молекулярная масса	Газ	σ_{en} , барн	σ_{in} , барн	σ_{ee} , барн	σ_{ie} , барн	P , Торр
2	H ₂	17,6	0,106	0,127	0,111	$5 \cdot 10^{-6}$
16	CH ₄	351,76	1,9	0,64	0,52	$3 \cdot 10^{-7}$
18	H ₂ O	580,4	3,0	0,64	0,5	10^{-7}
28	CO	879,4	4,62	0,9	0,69	10^{-7}
40	Ar	2849	14	1,15	0,83	$3 \cdot 10^{-8}$
44	CO ₂	1442	7,56	1,4	1,08	$7 \cdot 10^{-8}$

Табл. 1.2.2. Параметры бустера для расчета ионной неустойчивости

Параметр	Инжекция	Выпуск
Энергия, ГэВ	0,2	3,15
Горизонтальный размер пучка, мкм	1321	427
Вертикальный размер пучка, мкм	1077	193
Количество частиц	10^9	10^9
Количество сгустков	100	100
Средняя β -функция, м	8,2	8,2
Время затухания: (τ_x , τ_y , τ_s)	(15,6; 15,6; 7,8) с	(4,62; 4,62; 2,31) мс

1.3. Синхротронное излучение (СИ)

1.3.1. Параметры синхротронного излучения [1, 2]

Спектр синхротронного излучения электронов имеет максимум при длине волны:

$$\lambda_c = \frac{0,559 \cdot R}{E^3} \text{ [нм]}, \quad 1.3.1$$

где E - энергия электронов, ГэВ, R - радиус орбиты, м.

Критическая энергия фотонов в спектре СИ:

$$E_c = 2,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{E^3}{R} \text{ [эВ]}, \quad 1.3.2$$

Для циклического ускорителя электронов полный поток Γ' фотонов СИ с энергией E_c выше работы выхода электронов из металлов ($E_r \approx 4 \div 6$ эВ для различных металлов) и, следовательно, способных стимулировать десорбцию газа с поверхности вакуумной камеры, оценивается как:

$$\Gamma' \approx 8 \cdot 10^{20} I \cdot E \text{ [фотон/с]}, \quad 1.3.3$$

где I - средний ток электронов, мА, E – энергия электронов, ГэВ.

Ниже приведены некоторые другие характеристики СИ, которые будут необходимы для дальнейших оценок.

Полная мощность СИ:

$$P_{СИ} = 88,5 \cdot \frac{E^4 \cdot I}{R} \text{ [Вт]}, \quad 1.3.4$$

Полное угловое расхождение СИ для фотонов вблизи E_c равно $2/\gamma$ [рад], где γ - релятивистский фактор, который для бустера NSLS-II ≈ 6000 . В зависимости от энергии фотонов E_{ph} полная угловая расходимость определяется из соотношений 1.3.5 и 1.3.6:

$$\Delta\varphi \approx \frac{2}{\gamma} \cdot \left(\frac{E_c}{E_{ph}}\right)^{1/3} \text{ [рад] при } E_{ph} \ll E_c \quad 1.3.5$$

$$\Delta\varphi \approx \frac{2}{\gamma} \cdot \left(\frac{E_c}{3 \cdot E_{ph}}\right)^{1/2} \text{ [рад] при } E_{ph} \gg E_c \quad 1.3.6$$

1.3.2. Расчет параметров синхротронного излучения в бустере

Основными источниками синхротронного излучения в бустере NSLS-II являются поворотные магниты. В Табл. 1.3.1 приведены параметры поворотных магнитов.

Все расчеты выполнены для случая, когда бустер работает в 2 Гц режиме, поскольку данный режим наиболее критичен для вакуумной системы.

Мгновенное значение генерируемой плотности мощности СИ [37]:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{1,41 \cdot 10^{-2} \cdot E^4(t) \cdot I}{R} \text{ [Вт/мрад]}, \quad 1.3.7$$

где E - энергия электронов, ГэВ, I - ток пучка, мА, R - радиус поворота магнита, м.

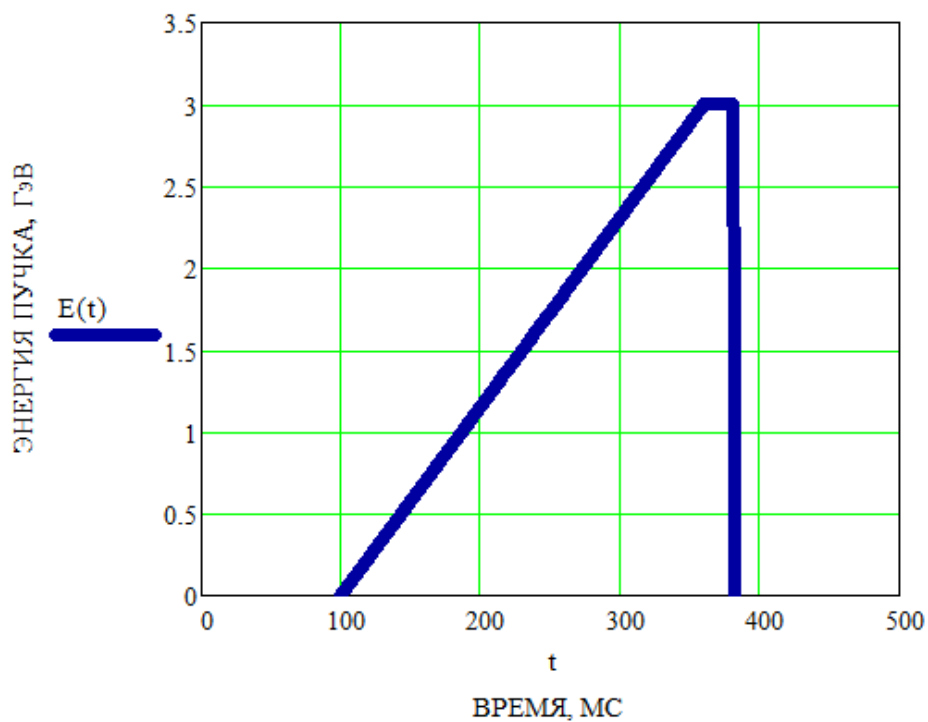


Рис. 1.3.1. Энергия пучка в течение одного цикла

Табл. 1.3.1. Основные параметры дипольных магнитов бустера

	Дефокусирующий (BD) магнит	Фокусирующий (BF) магнит
Радиус поворота, м	8,87	21,7
Угол поворота, °	8,39	3,27
Эффективная длина магнита, м	1,3	1,24
Максим. магнитное поле, Тл	1,12	0,46
Количество, шт	32	28

Рис. 1.3.1 и 1.3.2 иллюстрируют типичный цикл ускорения и зависимость плотности мощности СИ от времени, в течение цикла ускорения, при условии линейного возрастания магнитного поля в дипольных магнитах.

Соотношение между пиковой и средней мощностью СИ при 2 Гц:

$$f = \frac{(dP/d\theta)_{\max}}{(dP/d\theta)_{\text{average}}} = \frac{2,575}{0,372} = 6,9, \quad 1.3.8$$

Максимальная линейная плотность мощности СИ на погонный метр для каждого типа дипольного магнита вычисляется с учетом импульсного режима бустера [37]:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{14,1 \cdot E^4 \cdot I_{\max}}{R^2} \cdot \frac{1}{f} \text{ [Вт/м]}, \quad 1.3.9$$

Для дефокусирующего магнита:

$$\frac{dP}{dl_{BD}} = \frac{14,1 \cdot 3^4 \cdot 20}{8,87^2} \cdot \frac{1}{6,9} = 42 \text{ [Вт/м]},$$

Для фокусирующего:

$$\frac{dP}{dl_{BF}} = \frac{14,1 \cdot 3^4 \cdot 20}{21,7^2} \cdot \frac{1}{6,9} = 7 \text{ [Вт/м]},$$

Полная мощность СИ от всех поворотных магнитов:

$$P_{\Sigma} = \frac{dP}{dl_{BD}} \cdot l_{BD} \cdot n_{BD} + \frac{dP}{dl_{BF}} \cdot l_{BF} \cdot n_{BF} = 42 \cdot 1,3 \cdot 32 + 7 \cdot 1,24 \cdot 28 \approx 2000 \text{ [Вт]},$$

где l_{BD} , l_{BF} - длина дефокусирующего и фокусирующего магнитов, n_{BD} , n_{BF} - количество дефокусирующего и фокусирующего магнитов, соответственно.

Максимальная критическая энергия фотонов в бустере в ВД:

$$E_c = 2,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3^3}{8,87} = 6,69 \text{ [кэВ]}.$$

Средняя линейная плотность потока фотонов:

$$\Gamma' \approx 8 \cdot 10^{20} \cdot \frac{I \cdot E}{f \cdot \Pi} = 8 \cdot 10^{20} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{6,9 \cdot 158,4} = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ [фотон/с/м]},$$

Полное угловое расхождение:

$$\Delta\varphi \approx \frac{2}{\gamma} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

На Рис. 1.3.3 представлена зависимость потока фотонов от времени. В Таблице 1.3.2 показаны основные параметры СИ с учетом импульсного режима работы.

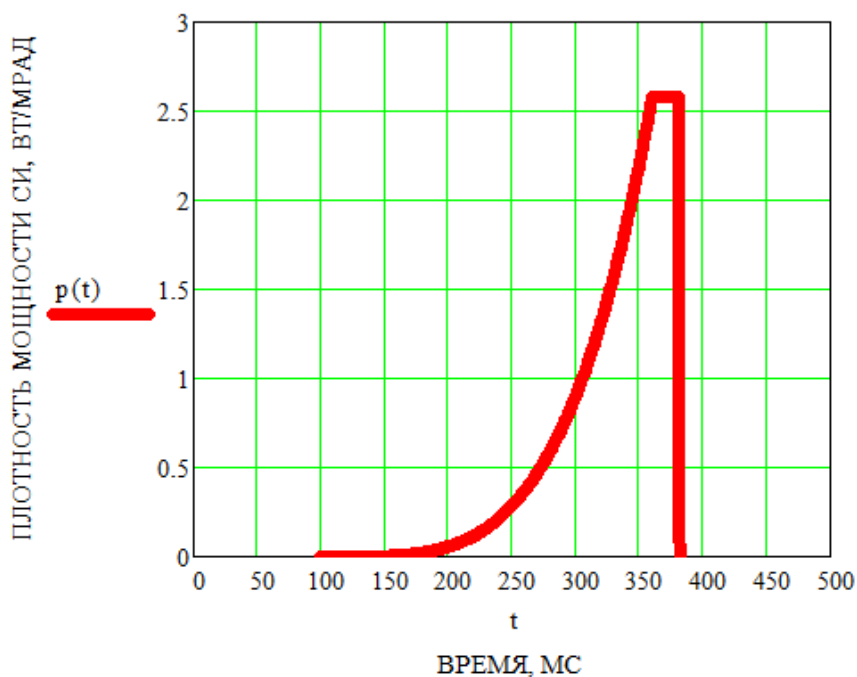


Рис.1.3.2. Мгновенное значение генерируемой мощности СИ в течение цикла ускорения

На Рис. 1.3.4 показана схема для расчета мощности синхротронного излучения на стенках дипольных вакуумных камер, где R - радиус поворота дипольного магнита, b - горизонтальный размер вакуумной камеры, L - расстояние от места излучения до места попадания излучения на камеру, $\Delta\varphi$ - полное угловое расхождение.

Расстояние от места излучения до места попадания излучения на камеру:

$$L = \sqrt{R \cdot b + \frac{b^2}{4}} = 461 \text{ [мм]},$$

Вертикальный размер синхротронного излучения: $a = a_0 + L \cdot \Delta\varphi = 0,35$ [мм], где a_0 - вертикальный размер пучка электронов, равный при энергии экстракции 0,2 мм.

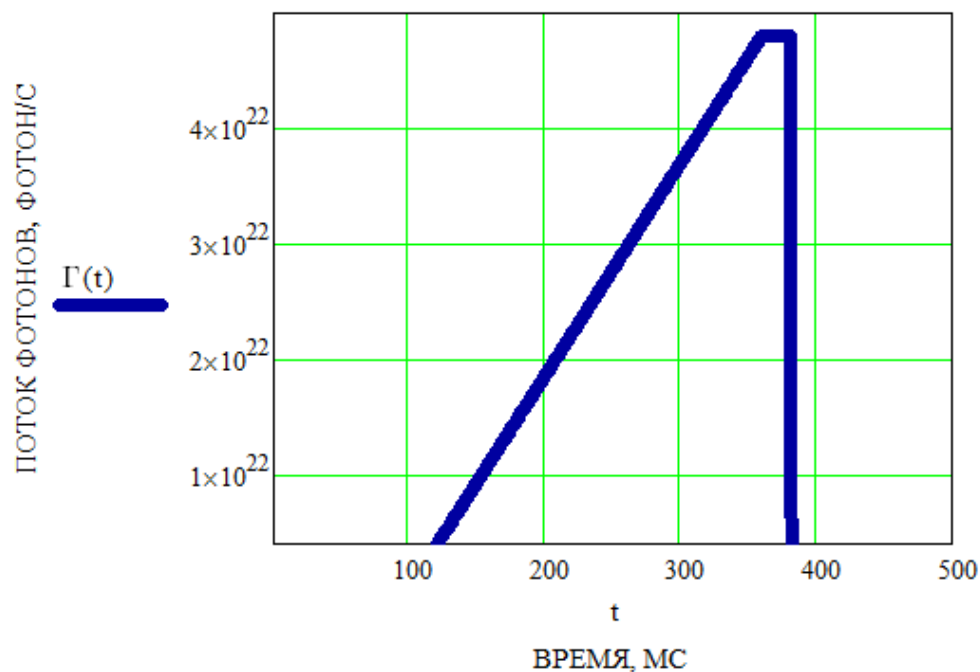


Рис.1.3.3. Поток фотонов от времени

Таблица 1.3.2. 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
Макс. критическая энергия СИ при полной энергии электронов, кэВ	6,69
Средний поток фотонов, фотон/с/м	$4,4 \cdot 10^{16}$
Соотношение между пиковой и средней мощностью СИ при 2 Гц	6,9

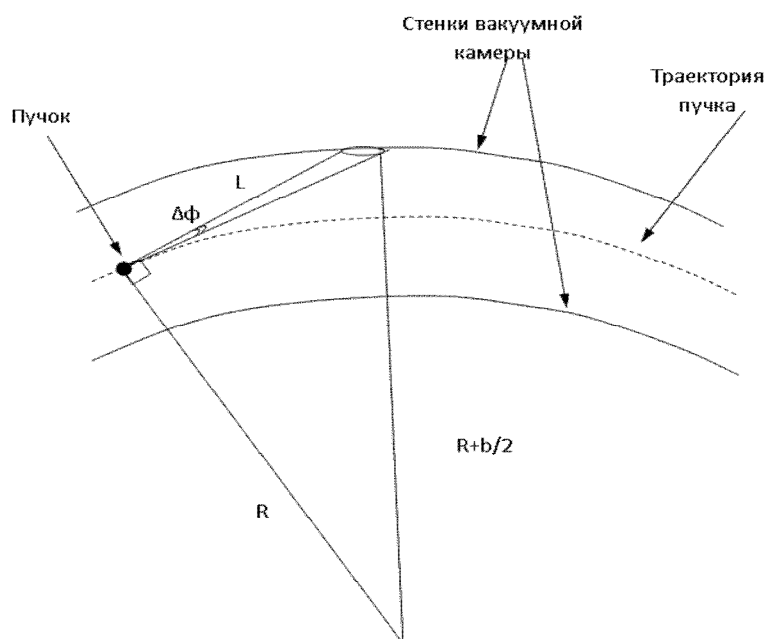


Рис. 1.3.4. Упрощенная схема излучения СИ на стенки вакуумных камер. R - радиус поворота дипольного магнита, b - горизонтальный размер вакуумной камеры, L - расстояние от места излучения до места попадания излучения на камеру, $\Delta\phi$ - полное угловое расхождение

1.3.3. Фотонно-стимулированная десорбция

Десорбция газа под действием синхротронного излучения происходит в два этапа: фотоны выбивают с облучаемой поверхности фотоэлектроны (на некоторой глубине от поверхности), которые, в свою очередь, могут привести к десорбции молекул газа с поверхности вакуумной камеры, причем как при вылете с поверхности, так и при попадании на нее.

Основной характеристикой десорбции под действием фотонов является среднее число молекул, десорбированных одним фотоном η [молекула/фотон] коэффициент фотонно-стимулированной десорбции, который изменяется по мере очистки (тренировки) поверхности по закону:

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)^{-\alpha} \quad [\text{молекула/фотон}], \quad 1.3.10$$

где η_0 - начальное значение коэффициента десорбции, Γ - фотонная доза, фотон/м, Γ_0 - фотонная доза, фотон/м, при которой коэффициент десорбции равняется η_0 , α - показатель степени, который изменяется в пределах $0,6 \div 1,0$ [27]. Формула справедлива при фотонной дозе $\Gamma > 10^{19}$ фотон/м. Большим значениям α соответствуют большие значения η_0 . Единица измерения дозы [фотон/м] выбрана из соображений, что, несмотря на узкую направленность СИ (1.3.5 и 1.3.6), облучению прямыми и отражёнными фотонами, а так же, фотоэлектронами подвержена вся поверхность вакуумной камеры. Поэтому

единицу измерения дозы облучения поверхности [фотон/м²] заменяют на [фотон/м].

Начальное значение коэффициента десорбции сильно зависит от материала вакуумной камеры, степени очистки, условий и длительности хранения камер до вакуумирования, и изменяется в пределах 0,01÷0,1 по Н₂ и 0,003÷0,03 по СО для непрогретых систем. Для получения низких значений η_0 проводят химическую очистку в ультразвуковых ваннах, и предварительный прогрев вакуумных камер непосредственно перед установкой, в непрогретую «на месте» вакуумную систему. Для прогретых систем η_0 изменяется в пределах 0,003÷0,01 по Н₂ и 0,0003÷0,003 по СО. На Рис. 1.3.5 показаны коэффициенты фотонно-стимулированной десорбции для не прогретых «на месте» вакуумных камер (а), и для прогретых при 350 °С в течение 24 часов (б) [28].

Как будет показано в разделе 1.5, 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. Поскольку СО оказывает доминирующее влияние на “вакуумное” время жизни электронных пучков, то для достижения величины $2 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон, как видно из Рис. 1.3.5, необходимо накопить дозу на уровне 10^{23} фотон/м, для прогретой или непрогретой камеры перед непосредственной установкой в тоннель бустера. В таком случае прогрев камер перед установкой оказывается неоправданным.

В среднем интенсивность газоотделения, вызванная фотонно-стимулированной десорбцией, на единицу длины бустера NSLS-II при токе пучка 20 мА и $\eta(\Gamma)=2\cdot 10^{-5}$ (при $\Gamma=2\cdot 10^{23}$ фотон/м) составляет $5,2\cdot 10^{-8}$ л·Торр/(с·м). Поток же газа со стенок камеры в результате термодесорбции (10^{-11} л·Торр/с/см² при длительной откачке без прогрева) составит $1\cdot 10^{-8}$ л·Торр/(с·м), т.е. почти в 5 раз меньше даже при высокой степени очистки поверхности под действием СИ [30].

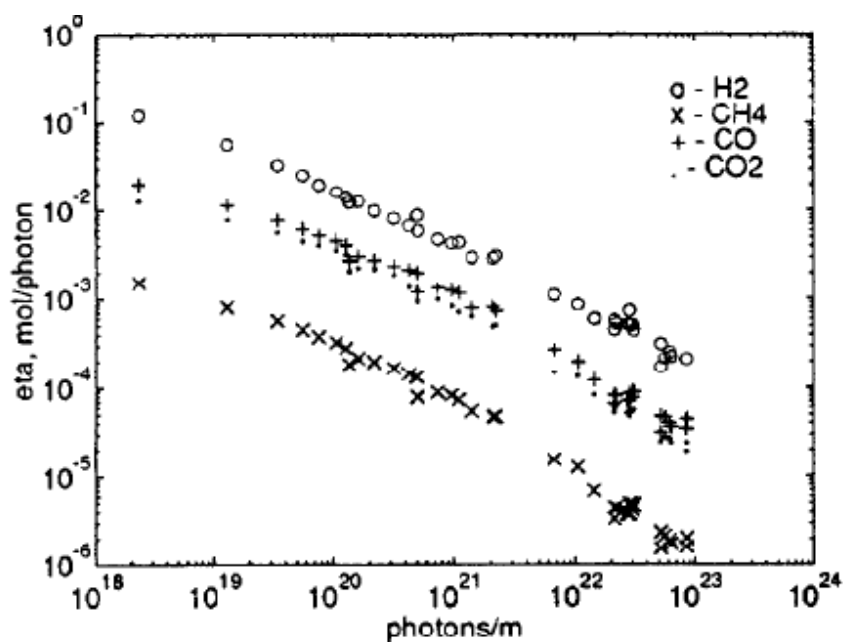


Рис. 1.3.5. (а) Коэффициенты фотонно-стимулированной десорбции для непрогретых «на месте» вакуумных камер из нержавеющей стали

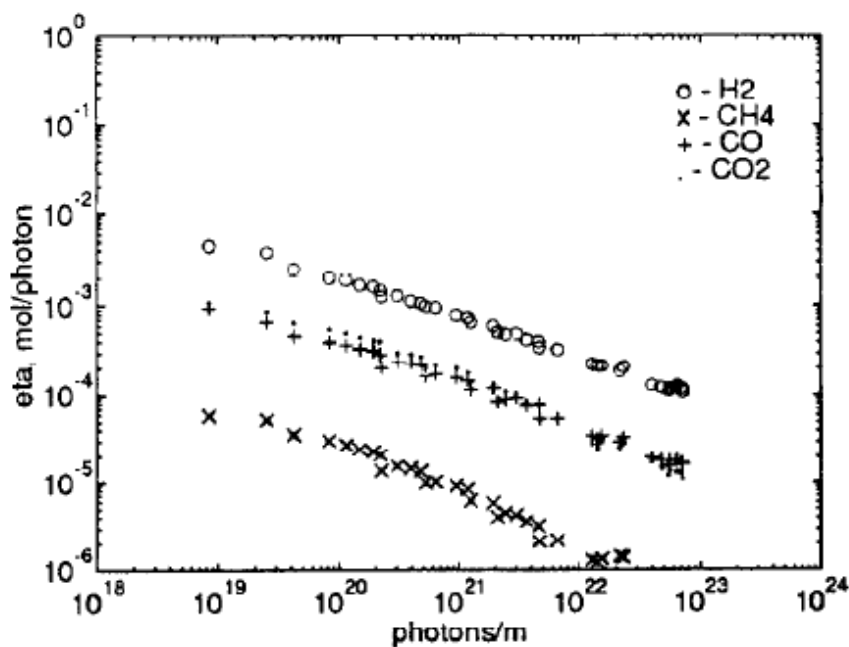


Рис. 1.3.5. (б) Коэффициенты фотонно-стимулированной десорбции для вакуумных камер из нержавеющей стали прогретых при 350°C в течение дня

1.4. Возможность получения высокого вакуума на основе нераспыляемых геттеров

При проектировании вакуумной системы бустера рассматривался вариант применения современных средств откачки на основе хемосорбции газов (нераспыляемые геттеры или НЕГ) путем поглощения активных газов поверхностью металлов.

В настоящее время на «вооружении» вакуумщиков-специалистов имеется большое множество различных средств получения вакуума на основе геттеров, это и сосредоточенные насосы (картриджи из нераспыляемых геттеров, устанавливаемые через подсоединительные фланцы внутрь вакуумной камеры) и распределенные насосы (нераспыляемые геттеры, нанесенные на внутреннюю поверхность стенок вакуумных камер).

За последние годы, в основном, усилиями группы К. Бенвенути в CERN (Центр Европейских Ядерных Исследований, Швейцария) нераспыляемые геттеры, с точки зрения, потребительских свойств получили впечатляющее развитие.

Впервые геттерные насосы были применены на ускорителе LEP (Большой Электронно-Позитронный Коллайдер) в CERN. Насосы представляли собой полоски константана шириной 30 мм, с нанесением на них с обеих сторон геттер Zr84–Al16 марки St'101 фирмы SAES Getters. Такие

насосы располагались внутри вакуумной камеры LEP, обеспечивая откачку около 23 км вакуумной камеры при общем периметре в 27 км [21].

Геттерные насосы начинают откачивать остаточные газы только после того, как очищается поверхность геттеров от окислов, для этого применяется активация геттеров. Активация St'101 осуществлялась пропуском тока 95 А через полосу в течение 45 минут. Данная величина тока нагревала геттер до температуры 750° С. Такая резистивная активация требует размещения сильноточных электрических вводов и изоляции геттеров, что ограничивает величину площади НЕГ, которую можно разместить в вакуумной камере и делает конструкцию вакуумной камеры сложной и громоздкой. На Рис. 1.4.1 показано сечение дипольной вакуумной камеры LEP.

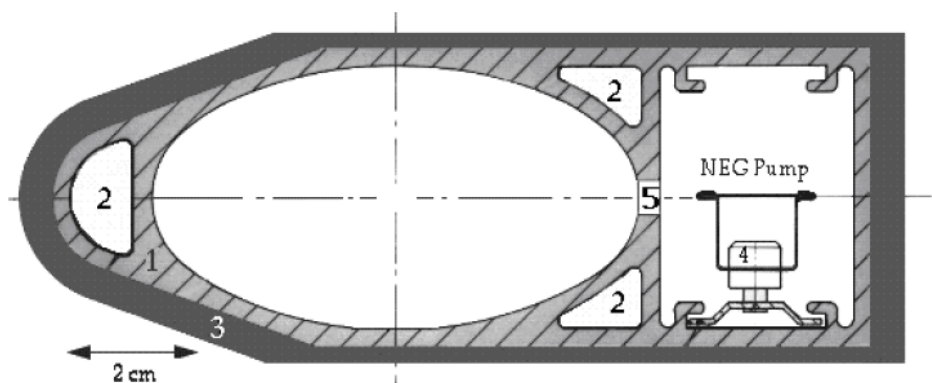


Рис. 1.4.1. Сечение дипольной вакуумной камеры LEP (NEG Pump-геттерный насос; 1- алюминиевая вакуумная камера; 2- водяное охлаждение; 3- свинцовая защита; 4- изолятор; 5- канал, соединяющий камеру пучка и камеру откачки с НЕГ) [21]

С целью большего увеличения скорости откачки геттерное покрытие стали наносить прямо на стенки вакуумной камеры, при этом превращая внутреннюю поверхность вакуумной камеры из источника газовой нагрузки в эффективный насос, что снижает равновесное давление в вакуумных системах.

В процессе поиска подходящего состава НЕГ, обладающего минимальной температурой активации, было исследовано 18 покрытий различного состава из элементов Ti, Zr, Hf, Nb, V, и некоторые двойные и тройные их сплавы. Был обнаружен оптимальный состав покрытия Ti(30%)–Zr(20%)–V(50%) с температурой активации 180⁰ С [18].

Измерения коэффициентов прилипания для данного покрытия показали, что для водорода эта величина находится в пределах 0,6% – 2%, и 40% – 80% для СО и СО₂ [19], при этом поглощение водорода происходит в объем пленки геттера благодаря диффузии водорода, а СО и СО₂ образуют слой на поверхности геттера.

Измерения статического давления в вакуумных камерах длиной 2 м с различными диаметрами от 34 мм до 100 мм, покрытых НЕГ Ti-Zr-V дали значения ниже 10⁻¹³ Торр после активации покрытия при температуре 200⁰ С в течение 24 часов [20].

Высокая предельная растворимость кислорода для элементов VI группы таблицы Менделеева позволяет производить многократные циклы пассивация (вскрытие на атмосферу)/реактивация при температуре активации без

заметного уменьшения скорости откачки. Измерения, выполненные для Ti-Zr-V, показали, что после 52 пассиваций быстрота откачки по водороду уменьшается на 50% [19].

Применение нераспыляемых геттеров позволяет получать покрытия вакуумных камер с предельно малыми толщинами (до трех микрон), превосходными вакуумными характеристиками, малой температурой активации, прочным креплением покрытия к стенке вакуумной камеры и возможностью проведения многократных пассиваций/реактиваций покрытия. Но для окончательного решения о применении НЕГ в вакуумных камерах ускорителей необходимо было ответить на вопрос о динамическом поведении давления газа в такой вакуумной камере в процессе облучения ее стенок синхротронным излучением.

Было показано, что при дозе $\Gamma' = 10^{19}$ фотон/м, коэффициенты фотодесорбции имеют следующие величины: $\eta_{H_2} = 10^{-5}$ молекул/фотон, $\eta_{CO} = 1,3 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон, $\eta_{CH_4} = 10^{-7}$ молекул/фотон. При достижении дозы $\Gamma' = 2 \cdot 10^{21}$ фотон/м коэффициенты фотодесорбции для водорода и метана не изменяются, а для СО уменьшаются до $\eta_{CO} = 10^{-5}$ молекул/фотон. При этом динамическое давление по всем газам меньше на два-три порядка, чем при облучении вакуумных камер из нержавеющей стали [29].

Нераспыляемые геттеры также уменьшают коэффициенты ионно-стимулированной десорбции, и увеличивают быстроту откачки молекул, тем

самым препятствуя, увеличению давления в ускорителях/накопителях многозарядных ионов [24, 25].

1.4.1. Прототип дипольной вакуумной камеры, покрытой нераспыляемым геттером Ti-Zr-V

Для проверки возможности и качества напыления геттера, а также измерения коэффициента прилипания по водороду в ИЯФ СО РАН 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 [22, 23, 38].

Камера перед напылением была промыта с использованием стандартной процедуры очистки и прогрева при температуре 250 °С в течение 24 часов, для выявления возможных микротечей и предварительного обезгаживания камер от загрязнений в процессе финишной сборки. На Рис. 1.4.2 показан спектр остаточных газов после прогрева и охлаждения до комнатной температуры. Напыление НЕГ осуществлялось методом магнетронного напыления во внешнем соленоидальном поле, который позволяет получать равномерные покрытия на материале основы. Катод состоит из трех переплетенных проволочек Ti, Zr и V с толщиной 0,5 мм и степенью чистоты больше 99%. Напыление происходило в атмосфере аргона при давлении 5Е-3 Торр. В процессе напыления потенциал катода устанавливается -280 В, относительно заземленной камеры. Ток на катоде составлял 40 мА/м. Величина внешнего

соленоидального поля варьировалась в диапазоне 250÷300 Гс. Для лучшей адгезии температура на камере поддерживалась на уровне 85÷90 °С, и в процессе напыления вакуумная камера нагревается на 20÷30 °С.

Для оценки толщины покрытия используется выражение:

$h = t \cdot I \cdot 100 \cdot D^{-1}$, где h - толщина покрытия, мкм, t - время напыления, час, I - ток на катоде, А/м, D - диаметр вакуумной камеры, мм. При времени напыления 17 часов, толщина покрытия Ti-Zr-V составит 2 мкм.

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. 1.4.3 показан спектр химических элементов, полученный на станции РФА-СИ.

Отношение давлений на краях камеры в течение инъекции водорода используется как индикатор качества активации НЕГ. Теоретически величина перепада давлений может быть вычислена из диффузионной модели Кнудсена, для одномерного газового потока через камеру с сорбирующими стенками. При квази-стационарных условиях, т.е. $\frac{\partial n}{\partial t} \approx 0$, плотность газа вдоль вакуумной камеры описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$u \frac{d^2 n(z)}{dz^2} - \alpha C n(z) = 0, \quad 1.4.1$$

где n [молекул/см³] – молекулярная плотность газа; α – коэффициент прилипания; $C = A \cdot \bar{v} / 4$ [см³/(с·см)] – идеальная быстрота откачки стенками на единицу длины; \bar{v} [см/с] – среднеарифметическая скорость молекул, A [см²/см] – площадь поверхности стенок вакуумной камеры на единицу длины (периметр); $u = A_c D$ [см⁴/сек] – проводимость вакуумной камеры на единицу длины; A_c [см²] – сечение вакуумной камеры; D [см²/с] – коэффициент Кнудсена.

Уравнение применимо, если длина камеры много больше, чем характеристический размер $f = \frac{4 \cdot S}{\Pi}$, где S и Π – площадь и периметр сечения вакуумной камеры, соответственно, а также, если коэффициент прилипания $\alpha < f / L$.

Общее решение для уравнения (1.4.1) имеет вид:

$$n(z) = A_1 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha C}{u}} \cdot z\right) + A_2 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha C}{u}} \cdot z\right)$$

При граничных условиях ($n(L) = n_2$, $\frac{\partial n}{\partial z}(0) = 0$), решение выражения для

плотности газа или давления имеет следующий вид:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{P_2}{P_1} = \cosh\left[L \sqrt{\frac{\alpha C}{u}}\right]$$

Отношение давлений на краях камеры в зависимости от коэффициента прилипания показано на Рис. 1.4.4.

При напуске водорода с одного из краев измеренное отношение давлений соответствует коэффициенту прилипания по водороду 0,2%. Однако, реальная величина коэффициента прилипания в разы больше, и ограничивается чистотой напускаемого газа, и углеводородами (метан и др.) создаваемыми датчиками измерения давления, которые не откачиваются геттером.

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 η – коэффициент фотонно-стимулированной десорбции, молекул/фотон;
 Γ' – 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 ~ 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·см²); α – коэффициент прилипания; T – температура, при которой находится газ, К; M – молекулярная масса, а.е.м.; A – площадь поверхности стенок, см².

В Табл. 1.4.1 представлено равновесное давление для водорода и CO , рассчитанное с учетом коэффициента прилипания для каждого газа и

коэффициента фотонно-стимулированной десорбции, достигнутой при дозе облучения больше 10^{21} фотон/м.

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 [29]:

$$P = \eta \cdot \frac{\dot{\Gamma}}{K \left(\sigma_{ph} \cdot \dot{\Gamma} \cdot \frac{\sqrt{b \cdot R}}{1 - R_{ph}} + \sigma_e \cdot \frac{I}{e} \right)} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Torr}$$

В Таблице 1.4.2 представлены входные параметры для расчета среднего динамического давления метана для бустера. 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 1.4.1. Равновесное давление для водорода и СО, рассчитанное с учетом коэффициента фотонно-стимулированной десорбции и коэффициента прилипания

	H ₂	СО
η , молекул/фотон	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
α	0,002	0,5
S , л/(с·см ²)	44	11,6
A , см ²	1300	
Γ' , фотон/с	$8,8 \cdot 10^{16}$	
P , Торр	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$

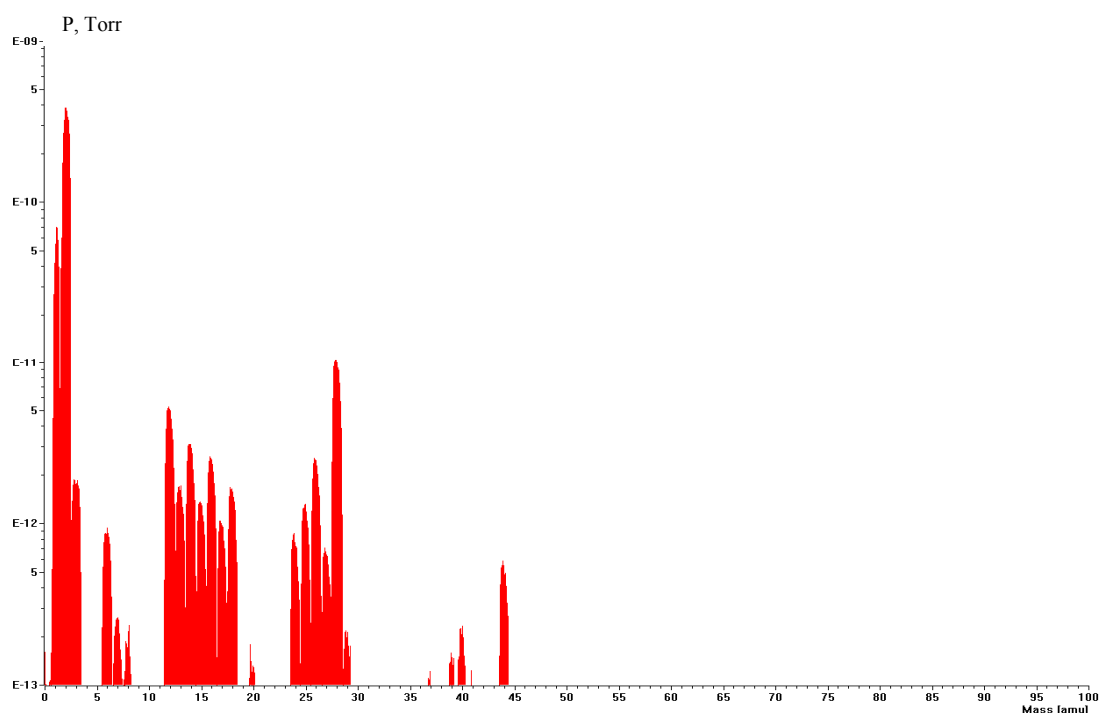


Рис. 1.4.2. Спектр остаточных газов в камере после предварительного прогрева и охлаждения до комнатной температуры. Давление остаточных газов (в Торр), измеренное масс-спектрометром, отложено по ОУ, по ОХ – молекулярная масса газов (в а.е.м.)

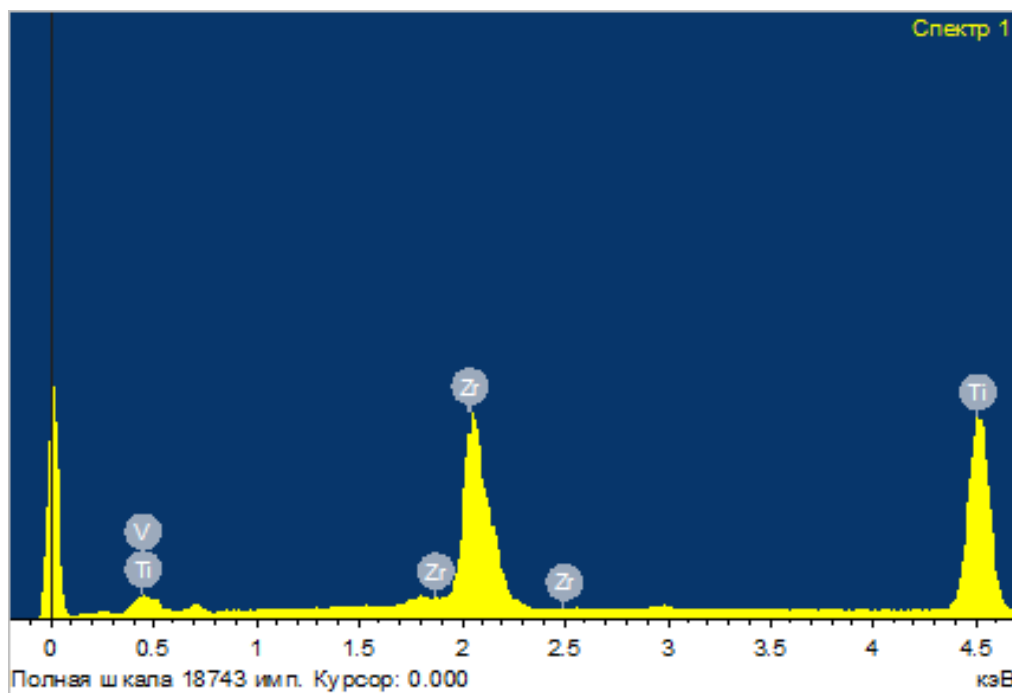


Рис. 1.4.3. Спектр химических элементов на образцах

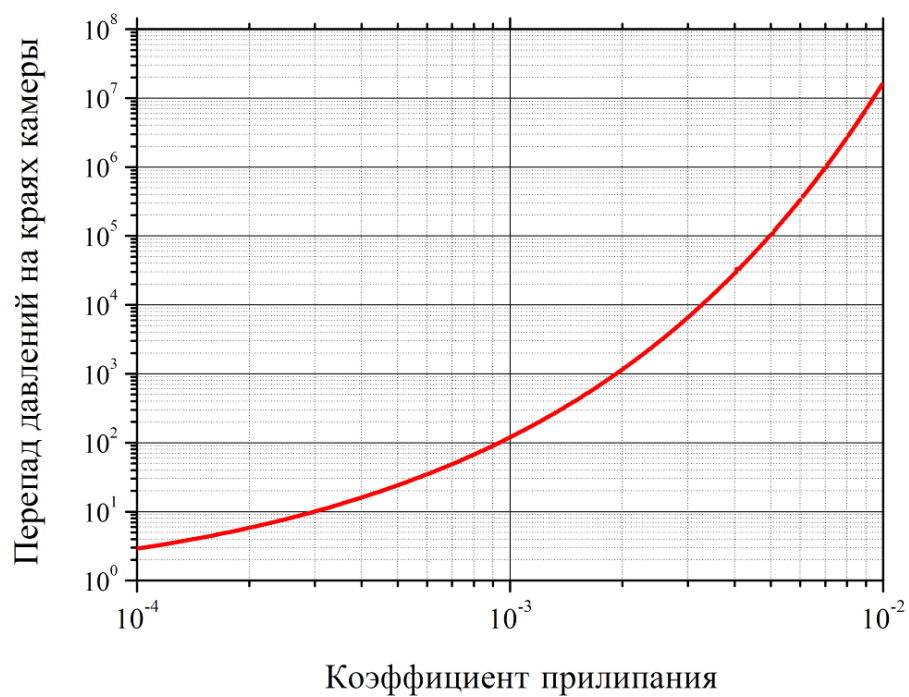


Рис. 1.4.4. Отношение давлений на краях камеры в зависимости от коэффициента прилипания

Таблица 1.4.2. Входные параметры для расчета среднего динамического давления метана

Энергия электронов, ГэВ	E	3,15
Ток пучка, А	I	0,02
Длина поворотного участка, м	L	31
Радиус траектории в дипольных магнитах, м	R	8,87/21,7
Внутренний размер дипольной камеры по горизонтали, м	b	0,041
Длина дипольного магнита, м	L_m	1,3/1,24
Средний поток СИ в поворотной секции, фотон/м/с	$\dot{\Gamma}$	$8,8 \cdot 10^{16}$
Начальное значение коэффициента фотодесорбции метана, молекул/фотон	η	10^{-7}
Сечение диссоциации метана при взаимодействии с релятивистскими электронами, м ²	σ_e	$\sim 4 \cdot 10^{-22}$
Среднее сечение диссоциации метана при взаимодействии с фотонами СИ, м ²	σ_{ph}	$\sim 10^{-22}$
Эффективный коэффициент отражения фотонов СИ под малыми углами	R_{ph}	$\sim 0,7$
Переводной коэффициент, 1/(м ³ ·Торр)	K	$3,2 \cdot 10^{22}$

1.5. Расчет профиля давления для бустера NSLS-II, вызванного термо-/фотонно-стимулированной десорбциями

Для организации откачки вакуумных камер в бустере применяются сосредоточенные магниторазрядные насосы, равномерно распределенные по периметру ускорителя.

Плотность молекул газа при комнатной температуре, применительно к эллиптическим камерам бустера (в единицах давления):

$$q_i - \sum_p S_{pi} \delta(z - z_p) [P_i - P_{0i}] + u_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial z^2} = 0. \quad 1.5.1$$

Здесь q_i - суммарный коэффициент газовыделения с погонной длины камеры, л·Торр/с/см; S_{pi} - быстрота действия сосредоточенных насосов, расположенных на координатах z_p ; м³/с; δ - дельта функция Дирака; P_i - давление остаточных газов в камере, вызванной термо- и фотостимулированными воздействиями, Торр; P_0 - предельный уровень разрежения, создаваемый соответствующим сосредоточенным насосом, Торр; $u = 10^{-3} \cdot D \cdot A$ - молекулярная проводимость вакуумной камеры единичной длины, л/(с·м); A - поперечное сечение вакуумной камеры, м²; D - коэффициент диффузии Кнудсена.

Для эллиптических камер бустера коэффициент диффузии Кнудсена вычисляется согласно следующему выражению: $D = \frac{2\sqrt{2}}{3} \hat{v} \frac{a \cdot b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$, м², где

$\hat{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$, м/с - среднеарифметическая по модулю скорость молекул, a, b -

полуоси эллипса, метр.

Тогда, если допустить постоянство интенсивности десорбции вдоль камеры, распределение давления вдоль камеры между насосами будет параболическим (Рис.1.5.1) и иметь следующее решение с учетом граничных условий:

$$P(x) = -\frac{q_{\Sigma} \cdot x^2}{2u} + \frac{q_{\Sigma} \cdot L}{2u} \cdot x + \frac{q_{\Sigma} \cdot \Pi \cdot L}{S_{эфф}}, \quad 1.5.2$$

где q_{Σ} - суммарный коэффициент газовыделения десорбированных молекул, л·Торр/с/см; L - расстояние между насосами, см; u - молекулярная проводимость камеры на единицу длины для воздуха, л·м/с; $S_{эфф}$ - эффективная быстрота откачки насосов, л/с.

В силу симметрии, среднее превышение динамического давления над давлением P_0 на входе насосов составит:

$$\Delta \hat{P} = \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{12u} L^2 \quad [\text{Торр}], \quad 1.5.3$$

где Γ' - фотонный поток на единицу длины камеры пучка, фотон/с/см; L - расстояние между насосами, см; q - коэффициент термического газовыделения, л·Торр/с/см²; Π - периметр сечения камеры, [см], $K \approx 3,2 \cdot 10^{19}$,

молекула/(л·Торр) - переводной коэффициент, равный количеству молекул в литровом объеме при давлении 1 Торр при комнатной температуре ~300 К.

Давление на входе насосов определяется из соотношения:

$$P_0 = \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{S} L \quad [\text{Торр}], \quad 1.5.4$$

где S - быстрота откачки насосов, л/с, которую выбирают так, чтобы P_0 составляло около 1/3 от $\Delta\hat{P}$. Т.е. $S \approx 3 \cdot 12u / L$ (повышение S неоправданно увеличивает стоимость откачной системы, уменьшение S , приводит к тому, что P_0 начинает составлять значимую часть среднего давления). Таким образом, полное среднее динамическое давление оценивается как:

$$\hat{P} \approx \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{9u} L^2 \quad [\text{Торр}]. \quad 1.5.5$$

Вышеприведенный расчет является упрощенным и применяется лишь в качестве первой итерации для определения основных параметров системы вакуумной откачки проектируемого ускорителя. При дозах $\Gamma > \Gamma_0 = 10^{19}$ фотон/м и $\alpha = 2/3$ поток десорбированных молекул оказывается пропорционален кубическому корню от фотонного потока:

$$Q = \eta(\Gamma) \cdot \Gamma' \cdot k \propto \Gamma^{1/3}, \quad 1.5.6$$

где Q - поток десорбированных молекул, л·Торр/с; Γ' - фотонный поток, фотон/с; $\eta(\Gamma)$ - коэффициент фотонно-стимулированной десорбции, молекула/фотон.

Это позволяет проводить усреднение молекулярных потоков на участках, где интенсивность облучения изменяется в десятки раз [29]. Давление квадратично зависит от расстояния между сосредоточенными насосами, поэтому, чем ближе насосы будут располагаться друг к другу, тем меньше будет перепад давления между центром камеры и местом, где установлены сосредоточенные насосы. Молекулярная проводимость вакуумной камеры пучка находится в кубической зависимости от характерного размера поперечного сечения камеры, поэтому эффективность сосредоточенных насосов будет определяться проводимостью камеры.

Для поворотной секции бустера NSLS-II ($a_1=0,0205$ м, $v_1=0,012$ м, $u_1 = 3,485$ л·м/с, $L=32$ м) и инжекционного промежутка ($a_2=0,03$ м, $v_2=0,01$ м, $u_2 = 3,89$ л·м/с, $L=7,5$ м) был рассчитан профиль давления (Рис. 1.5.2). В спецификации на вакуумную систему задано, что величина коэффициента термического газовыделения составляет 10^{-10} л·Торр/с/см², но как будет показано в Главе 3, уже через 4 дня откачки коэффициент термического газовыделения уменьшается на порядок.

Для достижения уровня вакуума не хуже $2 \cdot 10^{-8}$ Торр необходимо, чтобы величина коэффициента фотонно-стимулированной десорбции не превышала $2 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон. Как видно из Рис. 1.3.5, данная величина достигается при накопленной дозе фотонов 10^{23} фотон/м (или интеграле тока около 1,43 А·час).

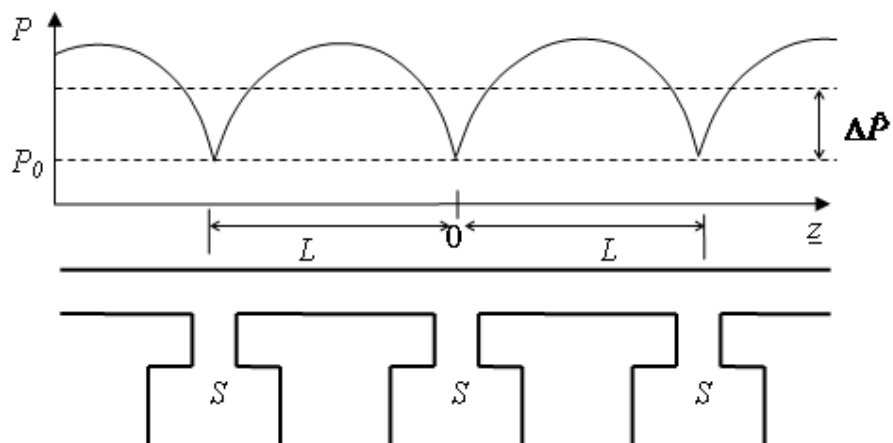


Рис.1.5.1. Схематическое расположение равномерно расположенных сосредоточенных насосов с быстротой откачки S

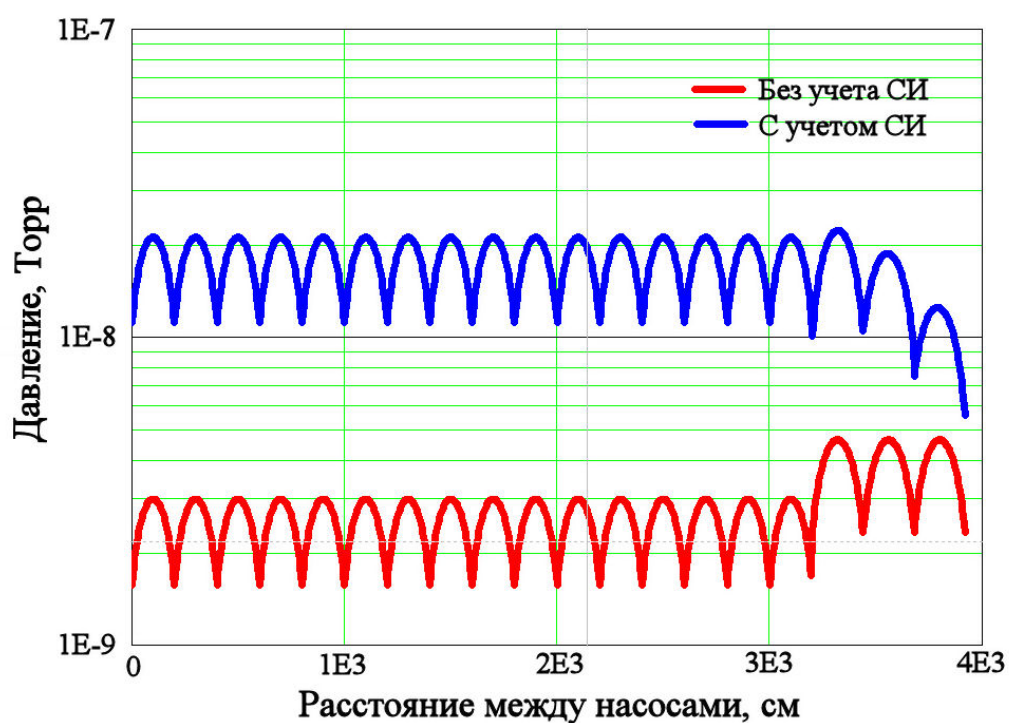


Рис.1.5.2. Профиль давления вдоль одного суперпериода. Коэффициент термического газовыделения равен 10^{-11} л·Торр/с/см², для поворотной секции: $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон, $\Gamma = 8,8 \cdot 10^{16}$ фотон/м/с; для инжекционного промежутка (среднее): $\Gamma = 1,8 \cdot 10^{16}$ фотон/м/с, $\eta = 4,3 \cdot 10^{-4}$ молекул/фотон

Глава 2

Проектирование вакуумной системы бустера

2.1. Вакуумная система бустера

На Рис. 2.1.1 показана общая схема вакуумной системы бустера [35, 36].

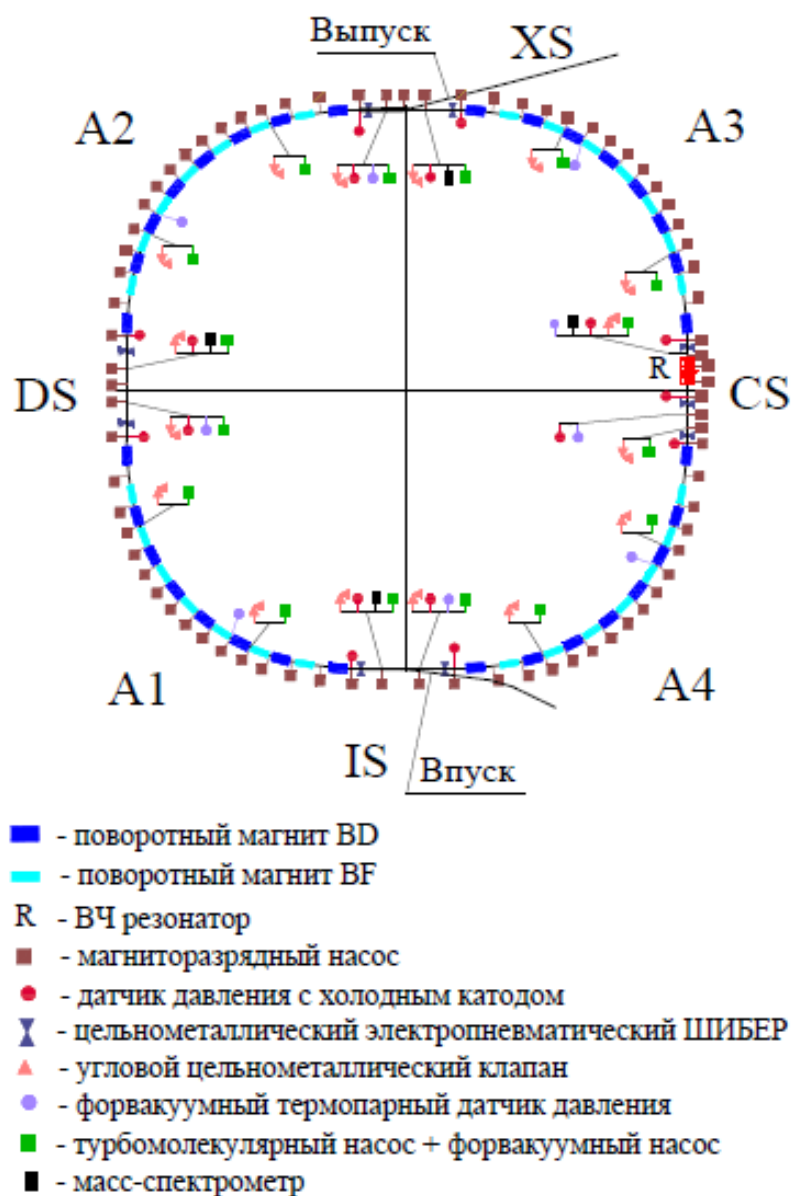


Рис.2.1.1. Схема вакуумной системы бустера NSLS-II

Вакуумная система бустера, с периметром 158,4 м, состоит из 4 суперпериодов (каждый из которых включает в себя поворотную секцию длиной 31 м и 8-метровый прямолинейный промежуток), изолированных друг от друга цельнометаллическими электропневматическими прямопролетными клапанами Ду 63, с временем срабатывания $\sim 2\div 3$ с. Высокий вакуум достигается магниторазрядными насосами (45 л/с), расположенными на расстоянии $2\div 2,3$ м друг от друга (по 15 насосов в поворотных секциях и по 2-3 в прямолинейных промежутках) [30].

Для обеспечения необходимого уровня вакуума и для соблюдения «гладкости» камеры, порты откачки изготавливаются из сплошной трубы с пазами под откачку с суммарной площадью $5,2 \text{ см}^2$ (Рис. 2.1.2). Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса определяется пазами и составляет 13 л/с.

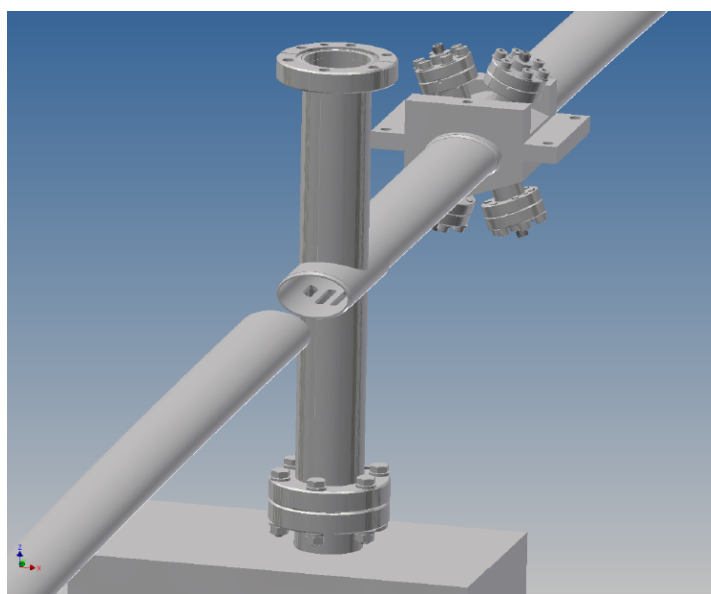


Рис. 2.1.2. Пикап-электроды и порт откачки с пазами

На Рис. 2.1.3 представлено распределение давлений на 16-метровом участке поворотной секции, в случае различных расположений насосов и быстроты откачки. Так как быстрота откачки определяется размерами пазов в откачных постах, то увеличение быстроты откачки магниторазрядных насосов с 45 л/с по воздуху до 100 л/с, приводит к увеличению эффективной быстроты откачки всего лишь на 3 л/с. При этом среднее динамическое давление в камере уменьшится на 9÷10 %. С другой стороны, увеличение расстояния между насосами в 2 раза, при быстроте откачки 45 л/с, влечет за собой ухудшения вакуума в 3 раза. Если же увеличить быстроту откачки насосов, при таком расположении, до 100 л/с, динамическое давление улучшится на 5÷7 %.

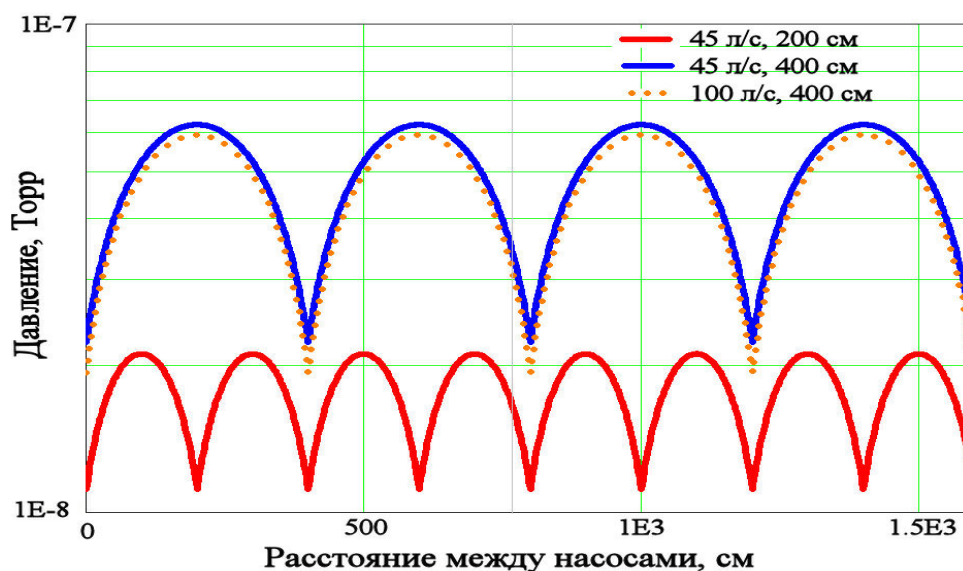


Рис. 2.1.3. Распределение давлений в поворотной секции, в зависимости от быстроты действия насосов. Насосы с быстротой откачки 45 л/с располагаются через каждые 2 м (сплошная красная линия), насосы 45 л/с (синяя линия) и 100 л/с (пунктир)- через 4 м

Таким образом, оптимальный результат достигается при использовании насосов с быстротой откачки 45 л/с (по воздуху), расположенных через каждые 2÷2,3 м.

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.

В Таблице 2.1.1 представлен полный перечень вакуумного оборудования бустера.

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. При изготовлении камер из алюминиевых или медных сплавов искажения магнитных полей будут увеличены в 26 и 41 раз, соответственно.

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/с). Из-за малого расстояния между магнитами в поворотных секциях, вакуумная камера одного гирдера (магнитной сборки с общей несущей балкой) 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), сильфоны, пикап-электроды, а также специальные плавные переходы с эллипса на круглые отверстия диаметром 46 мм. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat Ду 63, соединения вакуумной камеры выполнены аргонно-дуговой сваркой. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного нагревом, применены сварные сильфонные узлы (Рис. 2.1.4).

Большинство камер в прямолинейных промежутках имеют эллиптическое сечение $62 \times 22 \text{ мм}^2$, с молекулярной проводимостью 4 л·м/с. Толщина стенки камеры 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 высокотемпературным ($\approx 980 \text{ }^\circ\text{C}$) медно-оловянистым припоем CuSn10 ребра жесткости из нержавеющей стали 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм.

Камеры септумов состоят из двух частей, основной камеры, по которой циркулирует пучок электронов в бустере, и камеры впуска (для впускного септума), через которую пучок инжектируется в бустер, или камеры выпуска

(выпускной септум), через которую пучок выпускается в направлении основного кольца NSLS-II.

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 малому размеру пучка электронов, эллипс $17 \times 15 \text{ мм}^2$ (с толщиной стенки 0,3 мм). С целью сохранения гладкости камеры, а, следовательно, и импеданса, сифоны в промежутках впуска/выпуска снабжены ВЧ экранами, изготовленными из нержавеющей стали марки 316 LN (Рис. 2.1.5).

Также для обеспечения разрыва замкнутого витка в промежутке впуска установлена керамическая камера диаметром 95 мм.

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

Пикап-электроды в поворотных секциях имеют апертуру аналогичную дипольной вакуумной камере, в прямолинейных промежутках- эллипс $62 \times 22 \text{ мм}^2$.

Таблица 2.1.1. Вакуумное оборудование бустера

Название промежутка	Магниторазряд насос	Форвакуум датчик	Высоковак датчик	Масс-анализатор	Шибер	Клапан форвакуум откачки
Поворот_1	16	1	2	1	2	2
Диагностика	2	1	2	-	-	2
Поворот_2	16	1	2	-	2	2
Выпуск	3	1	2	-	-	2
Поворот_3	16	1	2	1	2	2
Резонатор	6	2	3	1	1	2
Поворот_4	16	1	2	1	2	2
Впуск	2	1	2	-	-	2
Итого	77	9	17	4	9	16

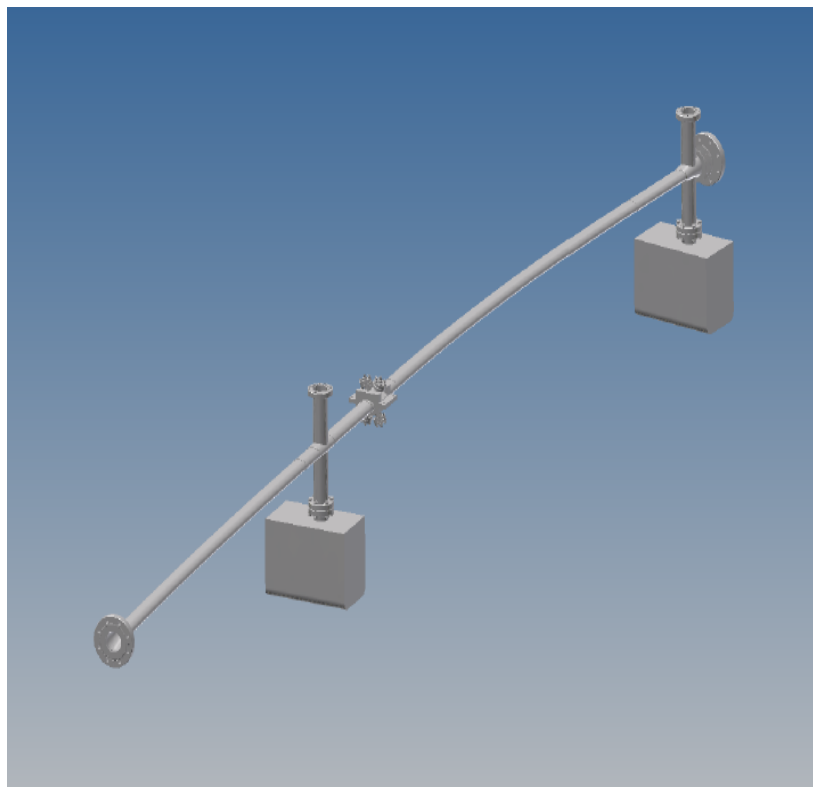


Рис. 2.1.4. Вакуумная камера одного гирдера поворотной секции

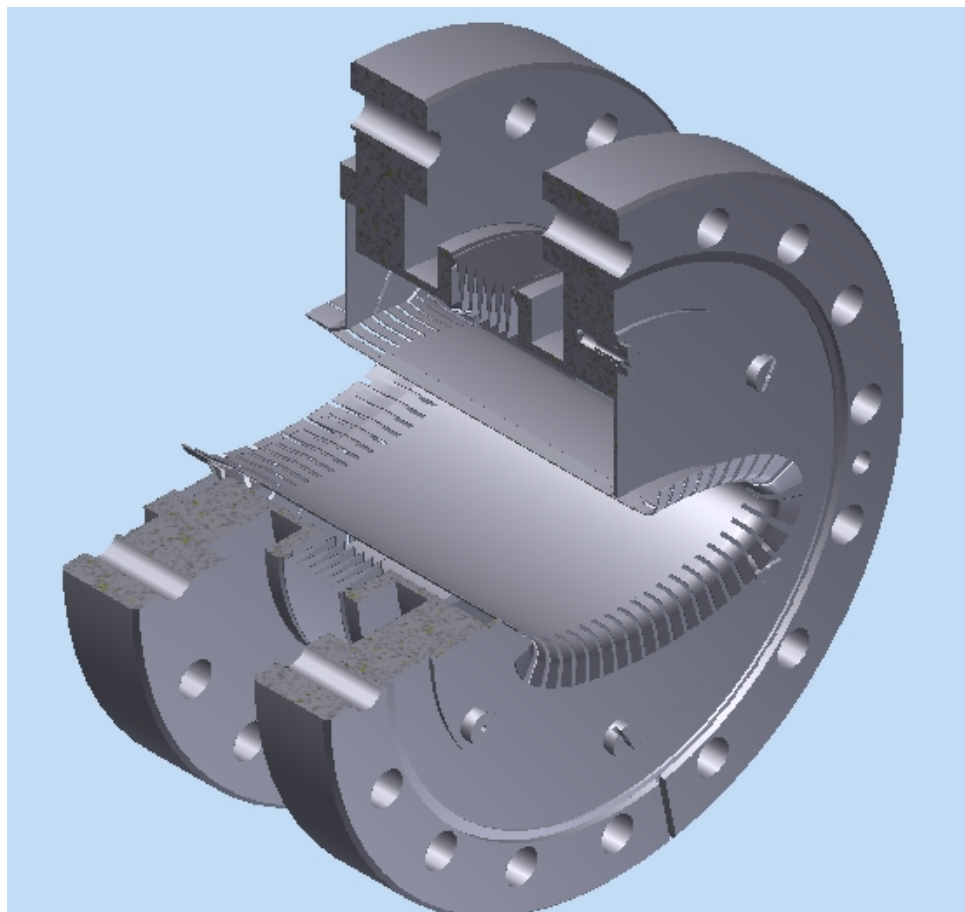


Рис. 2.1.5. Сильфонный узел апертурой 62x22 мм с ВЧ экранами

2.2. Конструкция вакуумной камеры дипольных магнитов

Синхротронное излучение, помимо фотонно-стимулированной десорбции молекул остаточных газов со стенок вакуумной камеры, приводит также к возникновению механических напряжений в вакуумной камере из-за неравномерности нагрева.

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

В тоже 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. Конфигурация этих токов такая, чтобы возникающее при этом магнитное поле стремится ослабить внешнее магнитное поле. Таким образом, влияние вихревых токов приводит к запаздыванию ведущего магнитного поля от номинального. Кроме того, возникают нелинейные искажения магнитного поля, которые могут повлиять на динамику пучка. Особенно важно учесть влияние вихревых токов при проектировании быстрых импульсных магнитов,

использующихся при инъекции и экстракции, так как характерное время изменения магнитного поля в них составляет сотни микросекунд.

2.2.1. Расчеты неравномерного нагрева, вызванного синхротронным излучением

Перенос тепла от внутренней поверхности стенки вакуумной камеры к внешней, за счет теплопроводности, с последующей передачей по воздуху ядру магнита, происходит при помощи последовательной теплопередачи и описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\lambda \cdot h \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c \cdot T = 0, \quad 2.2.1$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T - температура нагрева, К; c - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); h - толщина вакуумной камеры, м. Координата x выбирается вдоль сечения камеры.

Общее решение данного уравнения имеет вид:

$$T(x) = C_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{c}{\lambda \cdot h}} \cdot x\right) + C_2 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{c}{\lambda \cdot h}} \cdot x\right) = 2C_1 \cdot Ch\left(\sqrt{\frac{c}{\lambda \cdot h}} \cdot x\right), \quad 2.2.2$$

Зная мощность СИ можно найти решение для данного случая:

$$T(x) = \frac{P}{2 \cdot \lambda \cdot h \cdot \sqrt{\frac{c}{\lambda \cdot h}} \cdot th\left(\sqrt{\frac{c}{\lambda \cdot h}} \cdot x\right)}, \quad 2.2.3$$

где P - мощность синхротронного излучения, Вт/м.

На Рис. 2.2.1 представлено распределение температур по сечению вакуумной камеры. Таким образом, синхротронное излучение, падающее на

стенки вакуумной камеры, приводит к неравномерному нагреву с перепадом температур $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сечению камеры.

Для абсолютной достоверности расчетов были проведены эксперименты по определению коэффициента конвективного теплообмена и распределения температуры по сечению камеры, с толщиной стенки 1 мм , под действием СИ [31]:

Первой частью экспериментов было определение коэффициента конвективного теплообмена в реальных условиях эксплуатации дипольных камер. По камере, которая была сверху и снизу закрыта швеллерами, имитирующими полюса магнита, пропускался ток. Вакуумная камера была покрыта слоем каптона, для обеспечения электрической изоляции от швеллеров. Измерялся нагрев не только самой камеры, но также температура швеллеров. При мощности $41,7\text{ Вт/м}$ камера нагревается до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что хорошо согласуется с расчетами. На Рис. 2.2.2 показана зависимость температуры нагрева от мощности. Из графика видно, что коэффициент конвективного теплообмена равен $8,6\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Второй частью экспериментов было измерение распределения температур в четырех точках по сечению камеры, а также определение изгиба вакуумной камеры в результате неравномерного нагрева, имитирующего воздействие СИ. Для этой цели был создан прототип вакуумной камеры из нержавеющей стали с апертурой $41\times 24\text{ мм}^2$. В Институте гидродинамики СО

РАН было выполнено напыление оксида алюминия (Al_2O_3) толщиной 100 микрон, поверх которого была нанесена полоска нихрома шириной 5 мм и толщиной 200 микрон. Один конец вакуумной камеры жестко закреплялся, а другой находился в свободном положении. Камера была закрыта швеллерами так же, как и в предыдущем эксперименте. Измерение изгиба свободного конца вакуумной камеры проводилось при помощи штангенциркуля. Точка измерения изгиба находилась на расстоянии 1,3 м от закрепленного конца, что соответствует длине дипольного ВД магнита. Имитация пучка СИ выполнялась пропусканием тока через полоску нихрома. При этом мощность, выделяемая в проводнике, подбиралась равной мощности СИ.

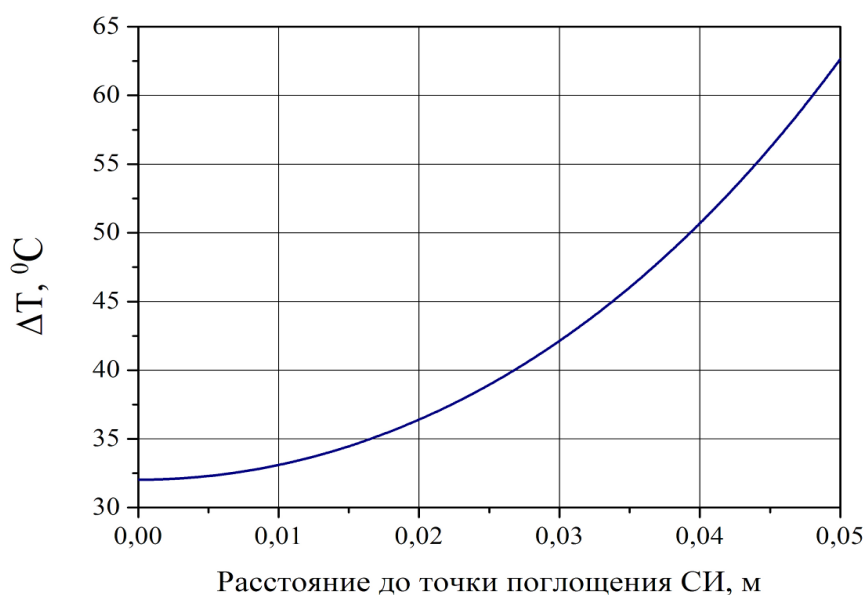


Рис. 2.2.1. Разность температуры нагрева вакуумной камеры, вызванного СИ, и температурой окружающей среды, в зависимости от расстояния до точки поглощения СИ по периметру сечения камеры. ($x=0,05$ – место падения СИ, $x=0$ – противоположная часть камеры)

На Рис. 2.2.3 представлена геометрия эксперимента. Экспериментальные данные представлены в Табл. 2.2.1.

Полученные экспериментальные данные подтвердили правильность проведенных расчетов. Механические деформации вакуумной камеры внутри магнита при обоих свободных концах будет 1 мм (Рис. 2.2.4).

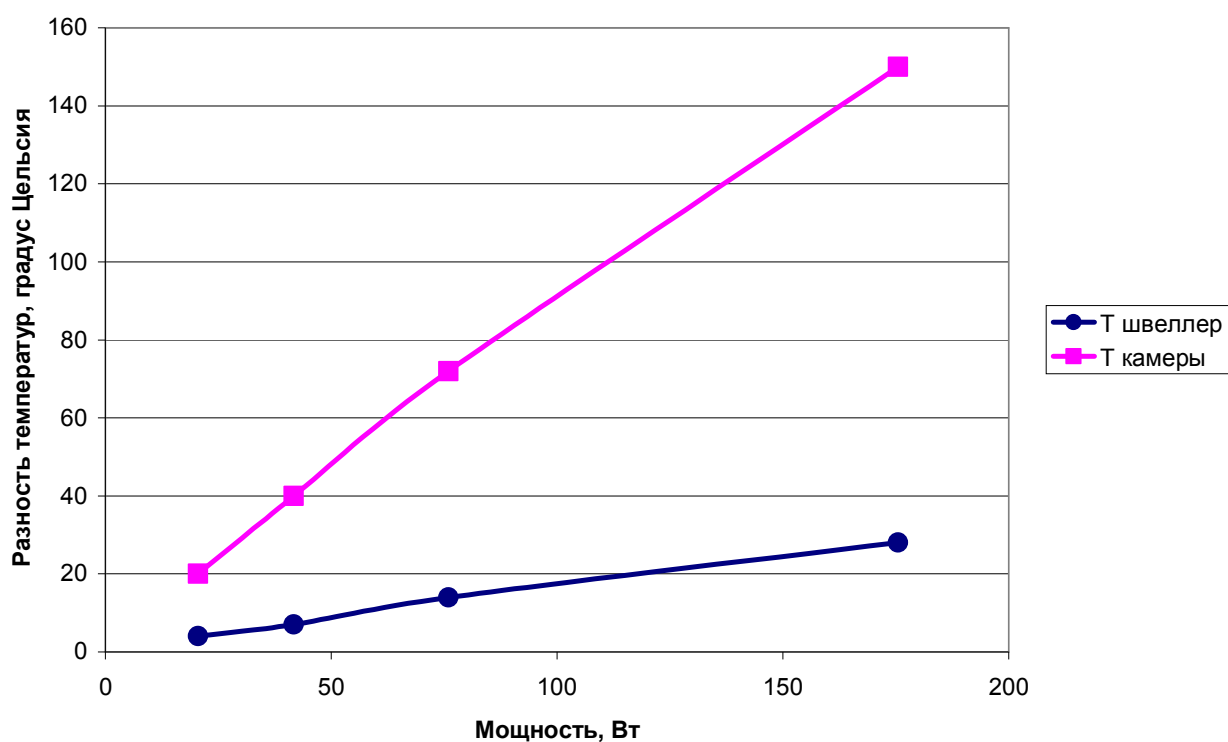


Рис. 2.2.2. Разность температур между нагревом камеры и окружающей среды

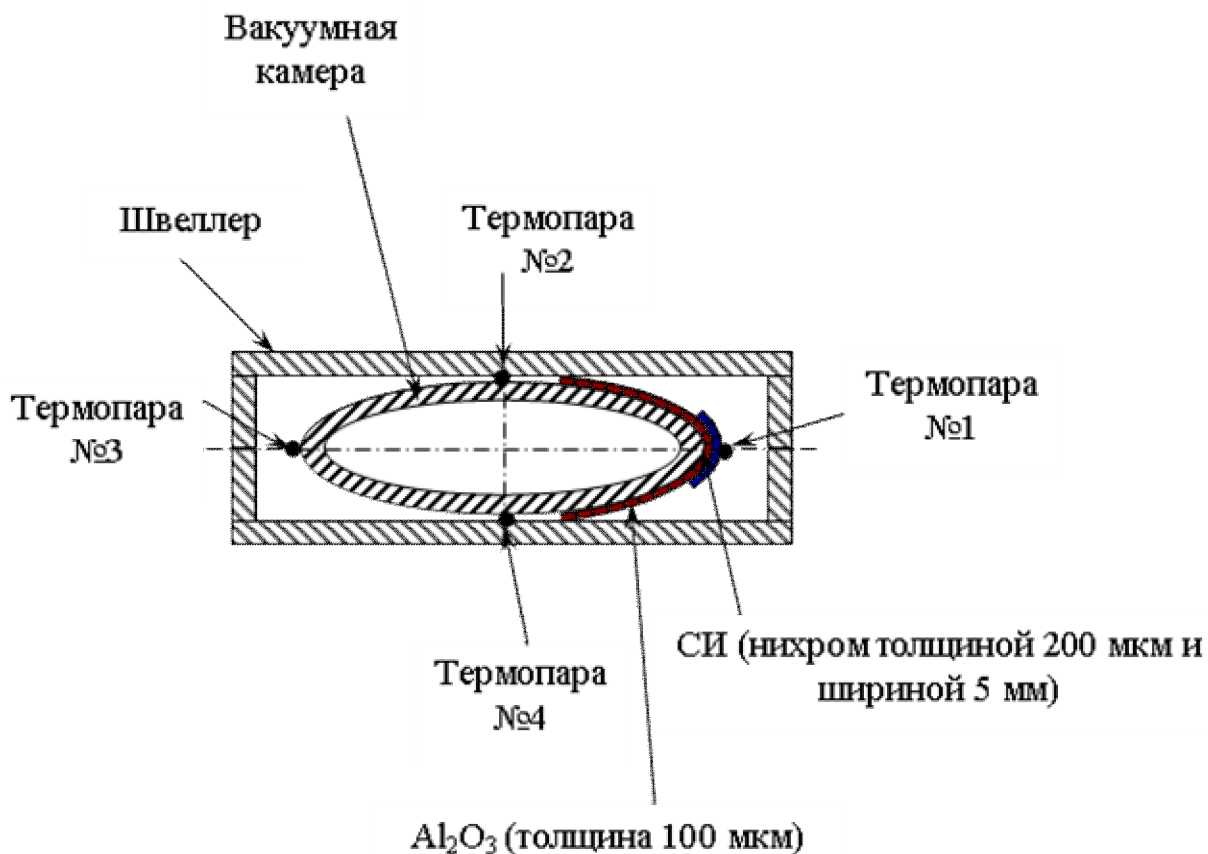


Рис. 2.2.3. Геометрия эксперимента

Таблица 2.2.1. Сравнение расчетов нагрева и механических деформаций вакуумной камеры с полученными экспериментальными данными

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

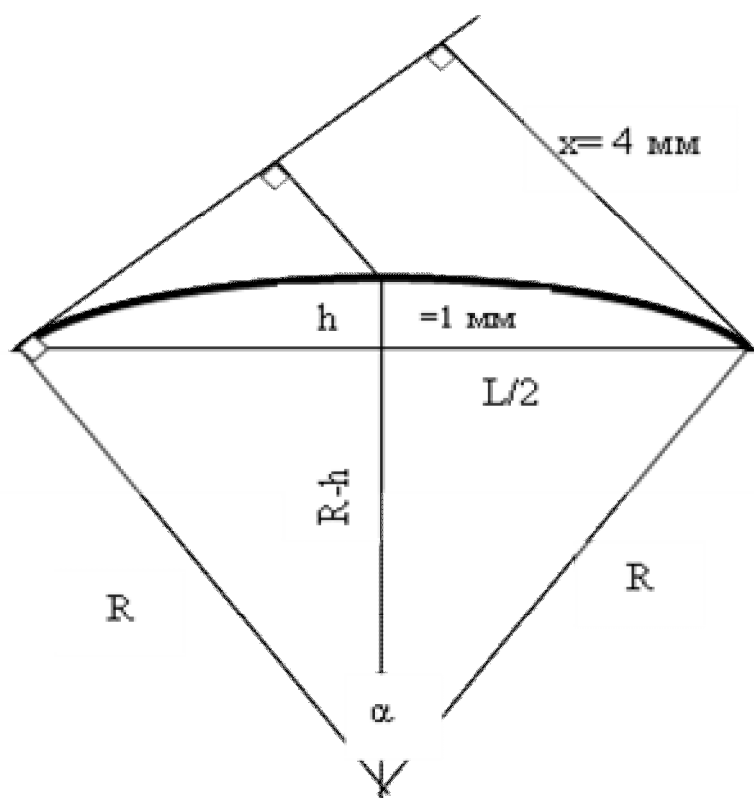


Рис. 2.2.4. Упрощенная схема прогиба камеры

2.2.2. Расчеты механической прочности вакуумной камеры

Для надежной работы, при воздействии атмосферного давления, достаточно изготавливать вакуумные камеры дипольных магнитов с толщиной стенки 0,7 мм. Однако, расчеты показали, что такая толщина стенки не гарантирует устойчивость камеры к нагрузкам, вызванным неравномерным нагревом под действием СИ. На Рис. 2.2.5 и 2.2.6 показаны расчеты максимально допустимой нагрузки и температуры нагрева вакуумной камеры, вызванного СИ, по сечению камеры дипольного магнита с толщиной стенки 0,7 мм.

Видно, что при мощности СИ, равной 42 Вт/м, стресс, испытываемый камерой, составляет 154 МПа при допустимых не более 180÷190 МПа для нержавеющей сталей.

Для достижения необходимой механической прочности было предложено увеличить толщину вакуумной камеры диполей до 1 мм. Кроме того, дополнительным фактором, в пользу принятия такого решения, являлось обстоятельство, что производитель обеспечивал лучшую равномерность толщины стенки камеры по ее сечению. На Рис. 2.2.7 и Рис. 2.2.8 представлены расчеты напряжений и температуры нагрева вакуумной камеры, вызванного СИ, по сечению камеры дипольного магнита с толщиной стенки 1 мм.

В результате воздействия атмосферного давления на камеру, находящуюся под вакуумом, в стенках камеры возникают механические

напряжения, величина которых достигает значения 50 МПа. Нагрев узкой полоски камеры (≈ 1 мм), под действием СИ, приводит к увеличению механических напряжений вдвое, до 114,5 МПа. Видно, что вакуумная камера дипольного магнита, с толщиной стенки 1 мм, имеет надежный запас по прочности, при таких величинах механических напряжений.

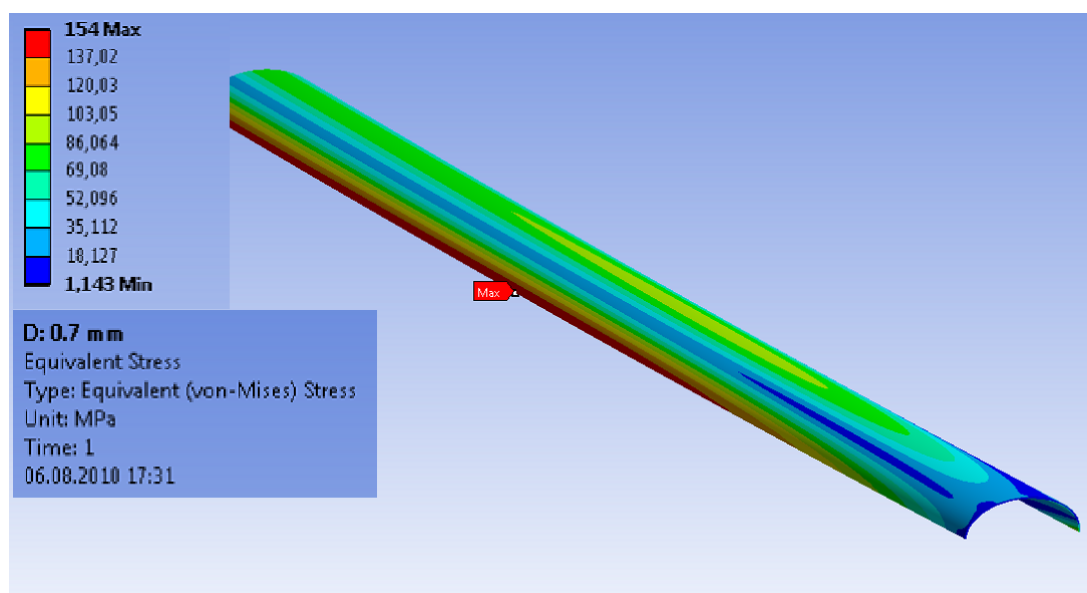


Рис. 2.2.5. Максимально допустимые нагрузки вакуумной камеры, вызванные нагревом СИ, по сечению камеры с толщиной стенки 0,7 мм в МПа

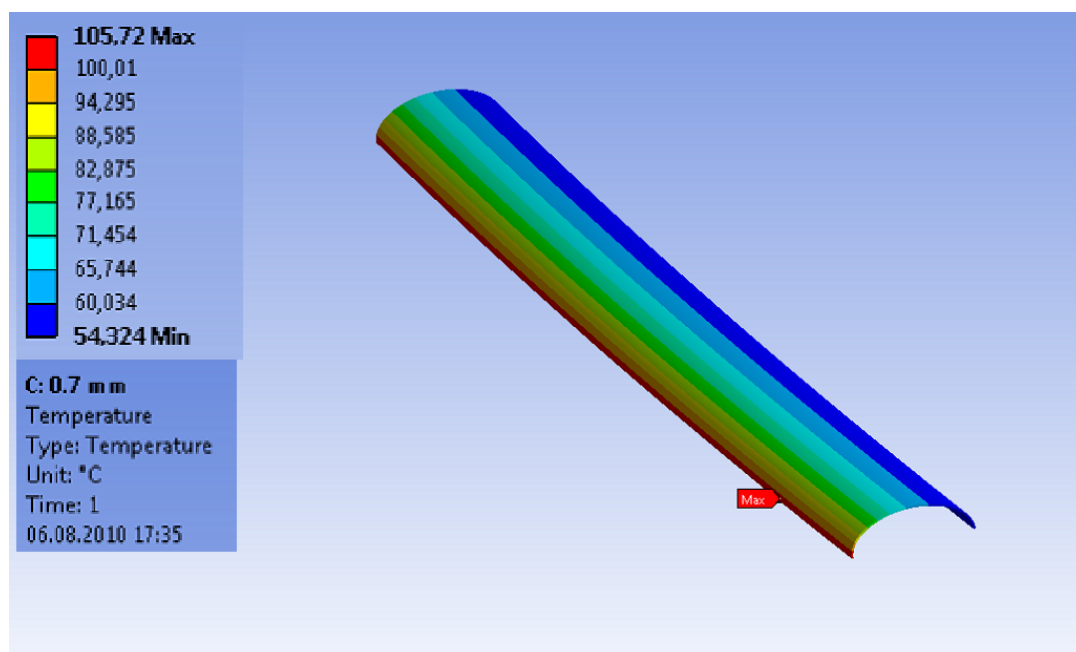


Рис.2.2.6. Температура нагрева вакуумной камеры по сечению камеры дипольного магнита с толщиной стенки 0,7 мм в °C

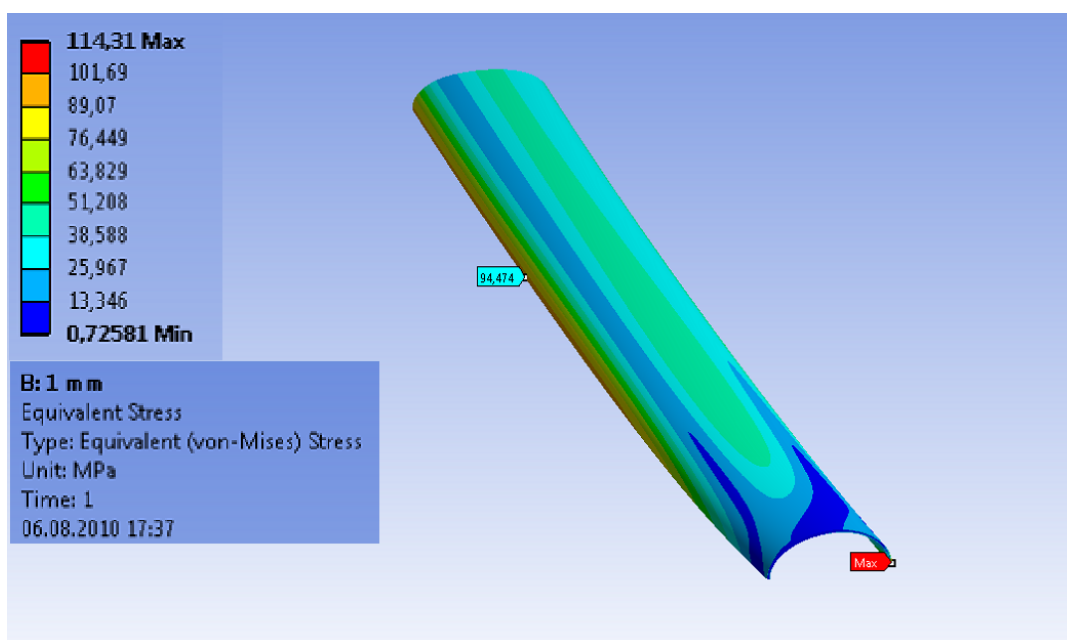


Рис. 2.2.7. Максимальные напряжения, возникающие в вакуумной камере под действием СИ, по сечению камеры с толщиной стенки 1 мм в МПа

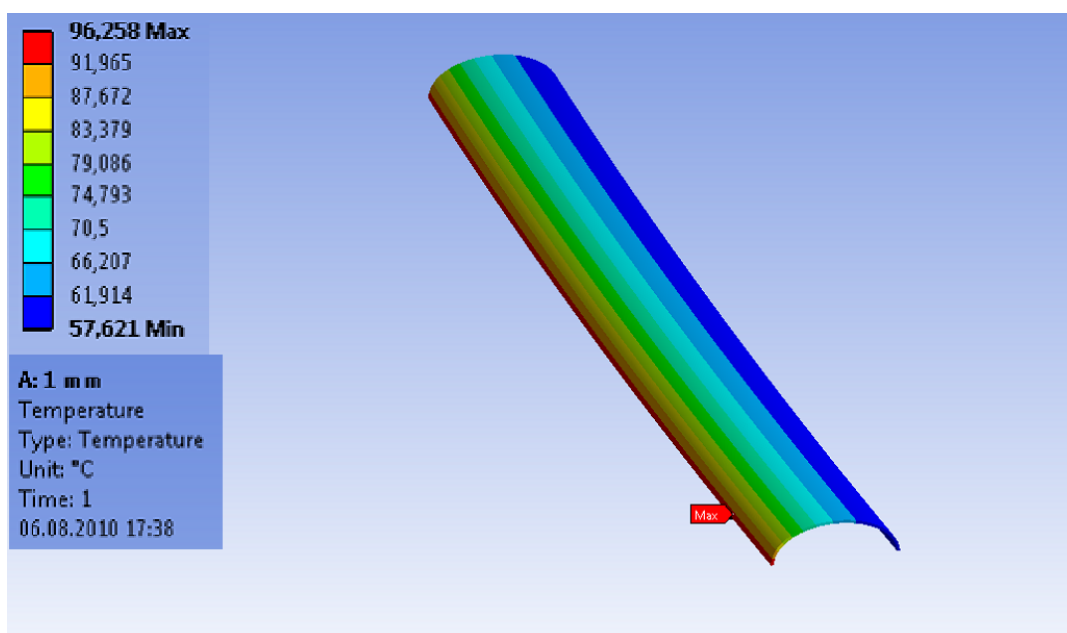


Рис. 2.2.8. Расчеты температуры нагрева вакуумной камеры по сечению камеры дипольного магнита с толщиной стенки 1 мм в °C

2.2.3. Оценка влияний токов Фуко

Согласно закону электромагнитной индукции, при изменении магнитного потока, пронизывающего электрический контур, в контуре возбуждается ЭДС индукции

$$\varepsilon = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}; \quad \Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

где ε - электродвижущая сила, В, Φ - поток магнитного поля через поверхность S , ограниченную контуром, Вб.

Металлическую вакуумную камеру, расположенную в зазоре дипольного магнита, можно представить в виде набора электрических контуров. При изменении ведущего магнитного поля, в камере индуцируются вихревые токи, величина которых зависит от скорости изменения ведущего магнитного поля, и удельной проводимости материала камеры. Распределение токов зависит от геометрии вакуумной камеры (Рис. 2.2.9).

Вихревые токи в свою очередь возбуждают магнитные поля, которые стремятся противодействовать внешнему магнитному полю. Исходя из симметрии, только четные гармоники возбужденного магнитного поля отличны от нуля. Практический интерес представляют только нулевая гармоника (дипольная составляющая), которая приводит к запаздыванию магнитного поля от номинального, и 2-ая гармоника (секступольная), приводящая к изменению хроматизма.

Для плоской вакуумной камеры, с толщиной стенки d , проводимостью χ , находящейся в магнитном зазоре h , величина секступольной компоненты оценивается следующим выражением [26]:

$$\frac{d^2 B}{dX^2} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \chi \cdot d}{h} \cdot \frac{dB_y}{dt}, \quad 2.2.4$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ - магнитная проницаемость вакуума, $\chi = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ – удельная проводимость нержавеющей стали.

В случае эллиптической камеры ($a=0,0205 \text{ м}$, $b=0,012 \text{ м}$, толщиной 1 мм), которая находится в дипольном ВД магните, несложно численно рассчитать искажение ведущего поля (Рис. 2.2.10).

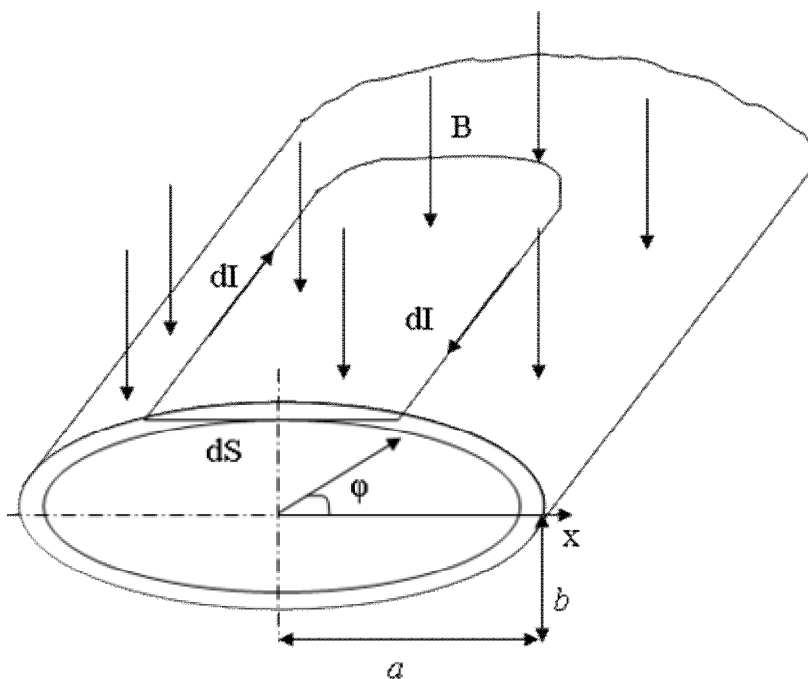


Рис.2.2.9. Геометрия задачи.

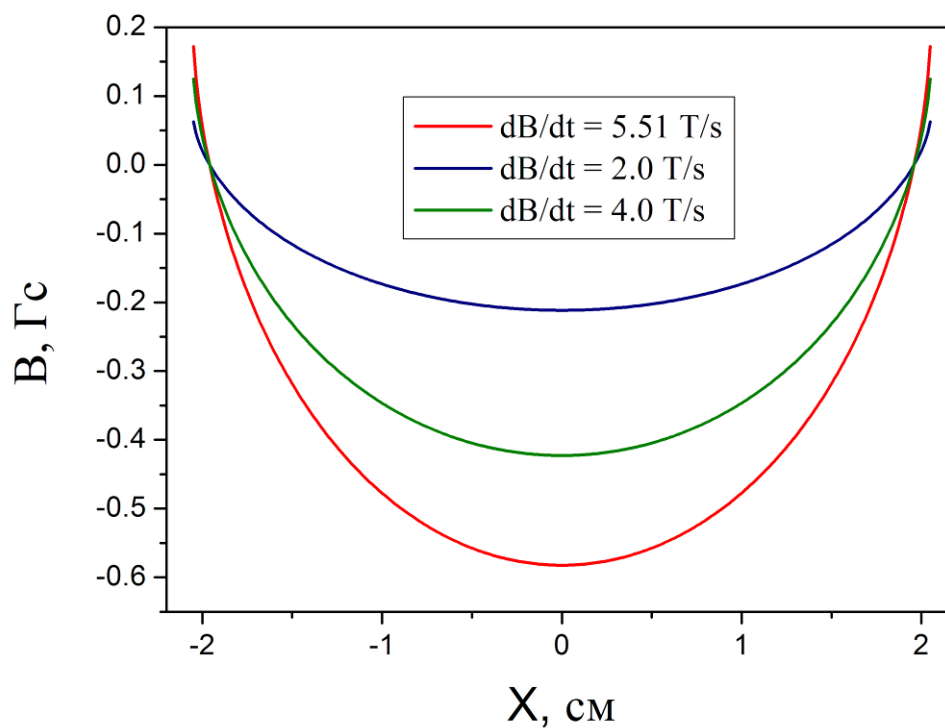


Рис.2.2.10. Магнитное поле, возбужденное вихревыми токами в камере дипольного магнита ВД, при различных скоростях изменения поля

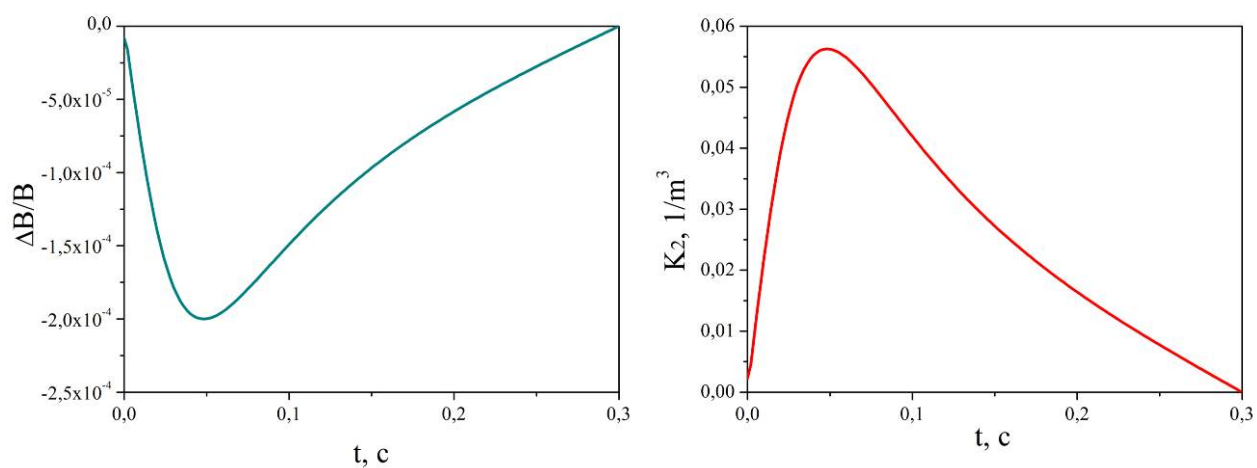


Рис. 2.2.11. Зависимость отклонения дипольного поля (слева), и секступольной компоненты K_2 в $1/m^3$ (справа) от времени при ускорении (300 мс) для ВД магнита

На Рис. 2.2.11 представлены ошибка дипольного поля и секступольная компонента магнитного поля, возбужденного индуцированными вихревыми токами в зависимости от времени в цикле ускорения. Видно, что для вакуумных камер дипольных магнитов, запаздывание магнитного поля пренебрежимо мало. Максимальное искажение секступольной компоненты для ВD магнита при наличии камеры составляет около 1,3 % (секступольная компонента ВD магнита без учета вакуумной камеры составляет $-4,6 \text{ м}^{-3}$). Для ВF магнита эти величины значительно меньше.

Вихревые токи, протекающие по камере, приводят к дополнительному нагреву вакуумной камеры. Значение мощности, выделенной в эллиптической камере за счет вихревых токов вычисляется согласно следующему выражению [32]:

$$\frac{P}{l} = \frac{d \cdot a^3}{\rho} \cdot B_0^2 \cdot \int_0^{2\pi} \cos^2(\varphi) \cdot \sqrt{\sin^2(\varphi) + \frac{b^2}{a^2} \cdot \cos^2(\varphi)} \cdot d\varphi \text{ [Вт/м]}, \quad 2.2.5$$

где $\frac{P}{l}$ [Вт/м] - выделенная мощность на эллиптическую вакуумную камеру; B_0 [Тл] - максимальное магнитное поле дипольного магнита; d [м] - толщина стенки вакуумной камеры; ρ [Ом·м] - удельное сопротивление нержавеющей стали, из которой изготовлена вакуумная камера; a [м] - большая полуось эллиптической дипольной вакуумной камеры, b [м] - малая полуось эллиптической дипольной вакуумной камеры.

Для представленных выше параметров, мощность, выделяемая в стенках вакуумной камеры дефокусирующего магнита, составляет не более 0,26 Вт/м,

а в фокусирующем в 2,5 раза меньше. В сравнении с мощностью нагрева СИ, этот эффект пренебрежимо мал.

2.2.4. Изготовление камер эллиптической формы

Производство необходимых радиусных камер эллиптического профиля для дипольных магнитов производилось после согласования с технологами по следующей методике:

- 1) Заготовка отрезается нужного размера с учетом допусков на приваривание предохранительных клапанов;
- 2) Перед загибкой радиуса привариваются предохранительные водяные клапаны, рассчитанные на 60 атм, иначе в процессе гибки произойдет деформация камеры. Рабочее давление составляет 40 атм;
- 3) Обеспечение необходимого радиуса камер (BD магнит 8,87 м, BF – 21,7 м) происходит до изготовления нужного сечения, так как загибание на вальцах камер эллиптической формы не представляется возможным;
- 4) Камера в разборной матрице сдавливается (Рис. 2.2.12), плавно и равномерно до полного смыкания;
- 5) Слив воды, сушка и контроль размеров;
- 6) Электрохимическая полировка внешней поверхности камеры.
- 7) Финальная процедура очистки была принята только после измерения коэффициента термического газовыделения на прототипе камеры:
 - Обезжиривание проводилось тщательной протиркой салфетками из отбеленной бязи, смоченными бензином;

- Для удаления механических и химических загрязнений применялась ультразвуковая мойка в щелочном растворе «Алтесо РЗ-36» (рН=9,7). Для данного щелочного раствора оптимальная температура составляет 60 °С. Процесс проходит в течение 30÷60 мин при частоте 18÷22 кГц;
- Промывка под сильной струей холодной воды;
- Промывка в горячей (90 °С) деминерализованной воде в течение 20 мин;
- Просушка в сушильном шкафу при температуре 150 °С до полного высыхания изделия



Рис. 2.2.12. Матрица для изготовления эллиптических камер

2.3. Требование к проектированию вакуумных камер импульсных магнитов

2.3.1. BUMP магнит

Наиболее сильно эффект вихревых токов, индуцированных в стенках камеры, проявляется в вакуумных камерах быстрых предупредных (BUMP) магнитов. Время нарастания магнитного поля около 1 миллисекунды. Конструкция вакуумной камеры BUMP магнита имеет форму эллипса с внутренней апертурой $60,3 \times 21$ мм². Для уменьшения влияния вакуумной камеры на магнитное поле толщина стенки была уменьшена до 0,5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются высокотемпературным припоем CuSn10 ребра жесткости из нержавеющей стали 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм. На Рис. 2.3.1 представлено сравнение магнитного поля без вакуумной камеры и с камерой.

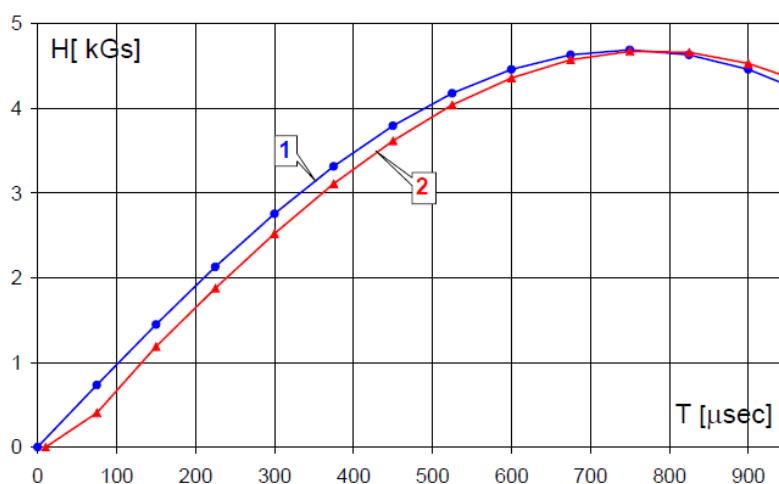


Рис. 2.3.1. Изменение поля от времени. 1- без вакуумной камеры, 2- с вакуумной камерой

На Рис. 2.3.2 представлено изменение величины секступольной компоненты от времени в импульсе. Поскольку ребра жесткости находятся на камере поперек линий тока, то по ним ток «не бежит» и вклад от ребер в затухание и нелинейности мал по сравнению с самой камерой.

Мощность синхротронного излучения линейно падает по мере удаления от источника излучения, поэтому наибольшему нагреву подвергается вакуумная камера первого BUMР магнита экстракционного промежутка. На Рис. 2.3.3 показан расчет распределения напряжений, возникающих из-за нагрева под действием СИ для камеры первого BUMР магнита промежутка выпуска. Камера состоит из прямого промежутка (апертура $50,4 \times 35$ мм² с толщиной стенки 1 мм), где устанавливаются квадрупольные линзы и корректора, и непосредственно самой камеры BUMР магнита.

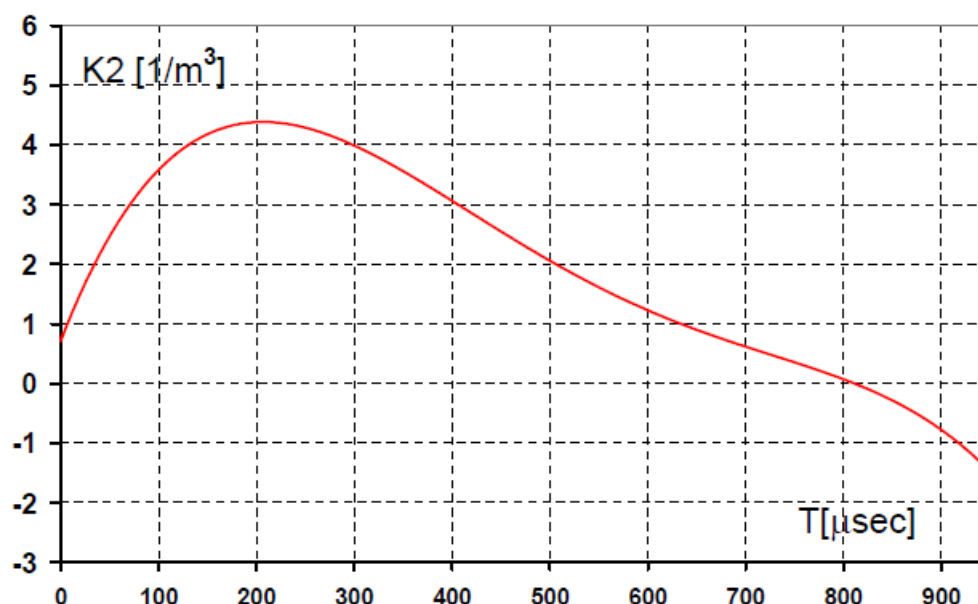


Рис.2.3.2. Зависимость секступольной компоненты в BUMР магните от времени

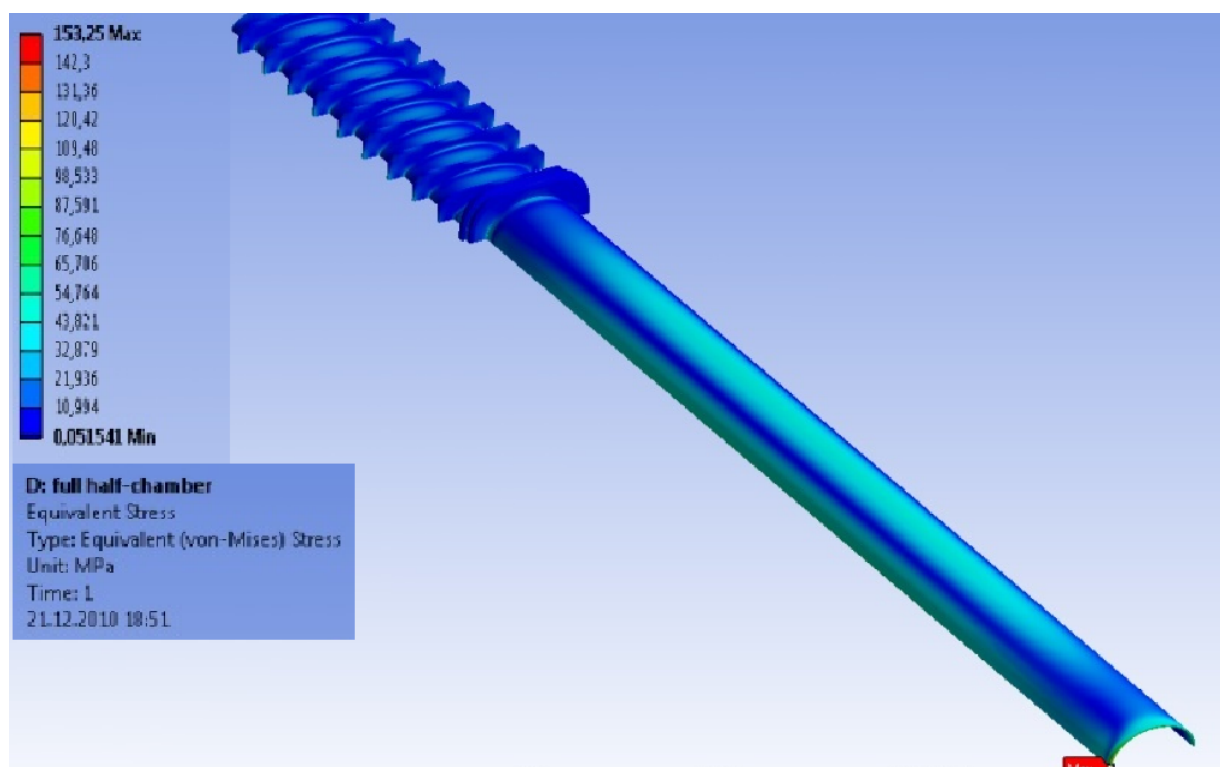


Рис.2.3.3. Расчет распределения напряжений, возникающих из-за нагрева под действием СИ для камеры первого BUMР магнита промежутка выпуска в МПа

Максимальная мощность СИ для прямолинейной части камеры составляет 15 Вт/м, что соответствует нагрузке около 130 МПа, для камеры с ребрами- 6,4 Вт/м, что соответствует нагрузке около 54 МПа. Такая нагрузка не приводит к появлению остаточных деформаций в камере BUMР магнита.

3D модель вакуумной камеры BUMР магнита представлена на Рис. 2.3.4.

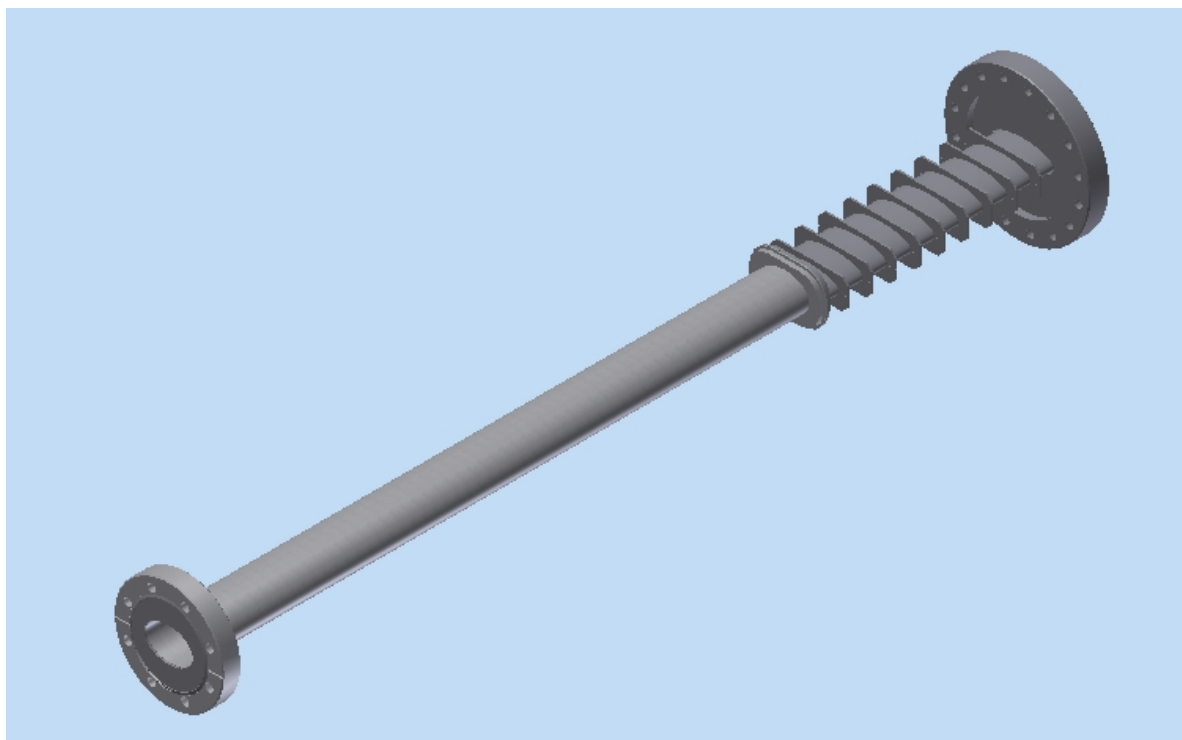


Рис. 2.3.4. Вакуумная камера первого выпускного BUMP магнита

2.3.2. Кикеры впуска/выпуска

Для выпуска или впуска частиц в бустер применяется метод однооборотной инжекции, который был бы невозможен без быстрых отклоняющих устройств- кикеров (от англ. «kick»- удар), сообщающие ступку электронов, засчет электромагнитного поля, поперечный импульс необходимой амплитуды в нужный момент времени. Длительность импульса не должна превышать времени оборота (релятивистские электроны совершат полный оборот в бустере за 530 нс).

Вакуумная камера кикеров была изготовлена из оксида алюминия (Al_2O_3) фирмой FRIATEC, Германия. Апертура камеры 60×20 мм², толщина стенки 8 мм. К камере по обоим концам припаивались кольца из ковара, к которым

затем приваривались аргонно-дуговой сваркой фланцы типа Conflat Ду100. На Рис. 2.3.5 показана полная сборка кикера вместе с камерой. Отдельно вакуумная камера представлена на Рис. 2.3.6. По всей внутренней поверхности камеры было нанесено покрытие из нитрида титана (TiN) толщиной 5 мкм. Покрытие сделано полосками шириной 3,4 мм через каждые 3,4 мм (Рис. 2.3.7), чтобы минимизировать искажение магнитного поля кикера. Покрытие на поверхность было нанесено химическим осаждением.

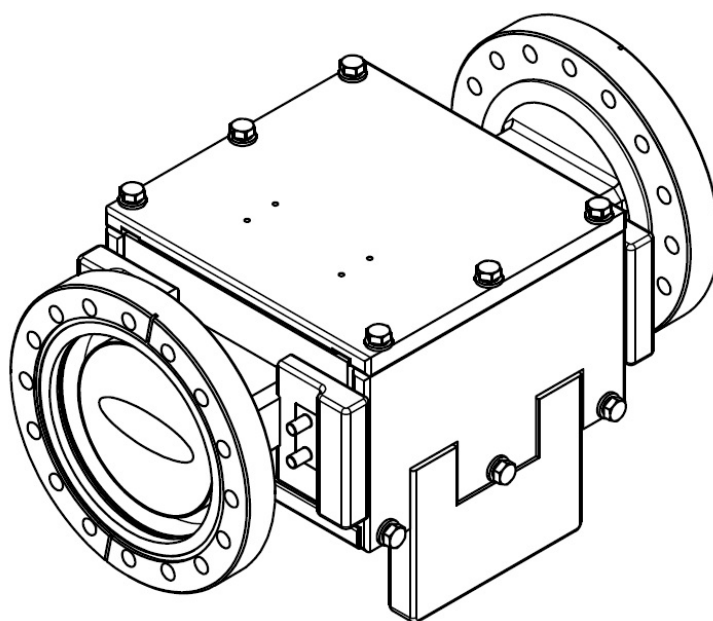


Рис. 2.3.5. Сборка кикера с вакуумной камерой

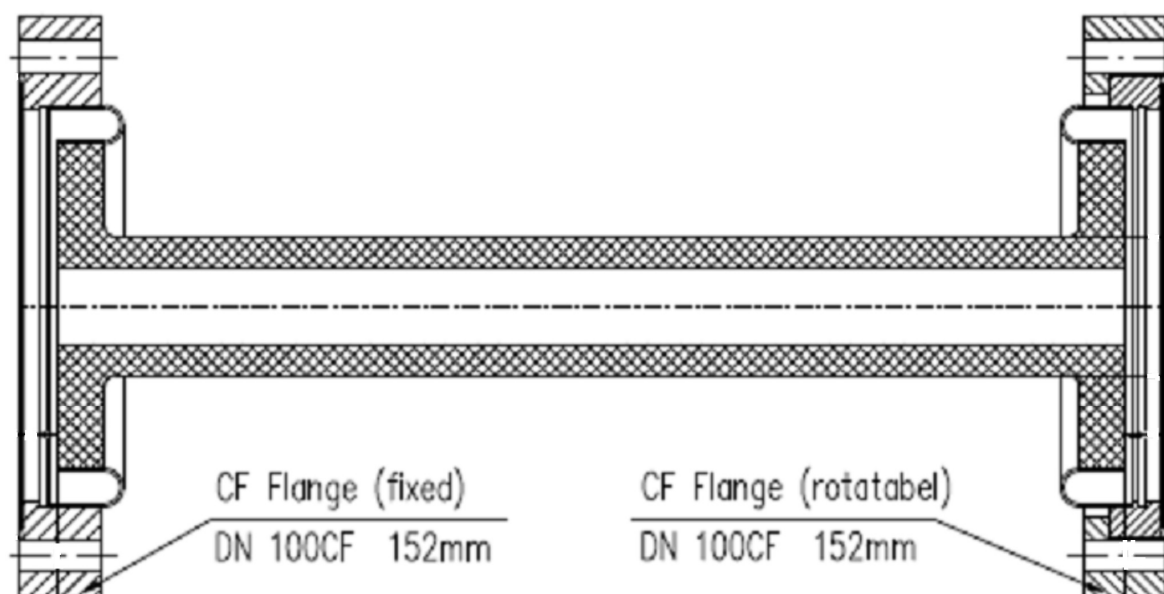


Рис. 2.3.6. Керамическая вакуумная камера кикера

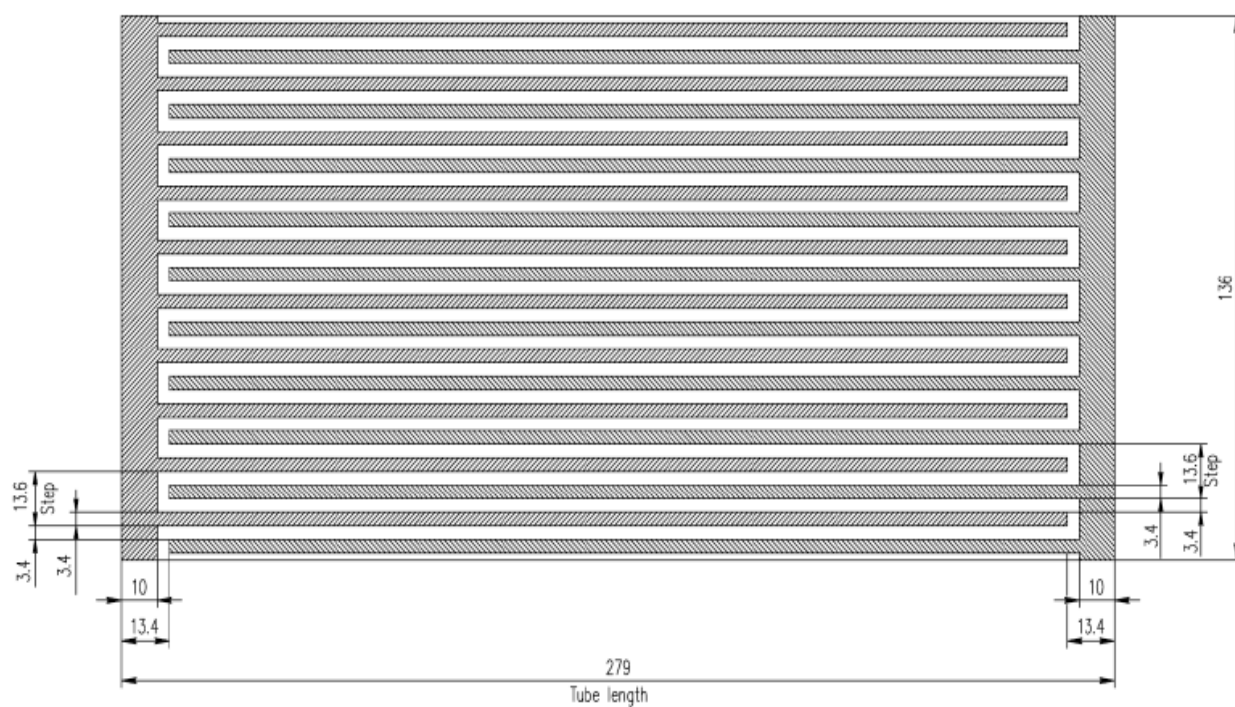


Рис. 2.3.7. Внутренняя поверхность кикера с нанесенным металлическим покрытием

Следующая методика позволила провести проверку качества адгезии покрытия на прототипе камеры кикера:

- 1) Нагрев камеры в вакуумной печи до 400 °С за 4 часа;
- 2) Прогрев при 400 °С в течение 4÷5 часов;
- 3) Остывание до комнатной температуры;
- 4) Вскрытие на атмосферу;
- 5) Проверка качества покрытия;
- 6) Процедура повторяется 4÷5 раз.

Температурные воздействия не привели к отшелушиванию покрытия.

2.3.3 Камеры впускного и выпускного септумов

Описания вакуумных камер септумов представлены в параграфе 2.1. На Рис. 2.3.8 представлена 3D модель выпускного септума.

Мощность синхротронного излучения для основных камер равно 1 Вт/м, поэтому к дополнительным нагрузкам не приводит. В камерах каналов впуска и выпуска СИ нет, есть только нагрузка, вызванная атмосферным давлением. На Рис. 2.3.9 и 2.3.10 показаны максимальные нагрузки, вызванные атмосферным давлением на стенки вакуумной камеры, для впускного и выпускного септумов, соответственно.

Указанные нагрузки не приводят к деформации камеры, можно с уверенностью заключить, что камеры септум магнитов надежно устойчивы к воздействию атмосферного давления.

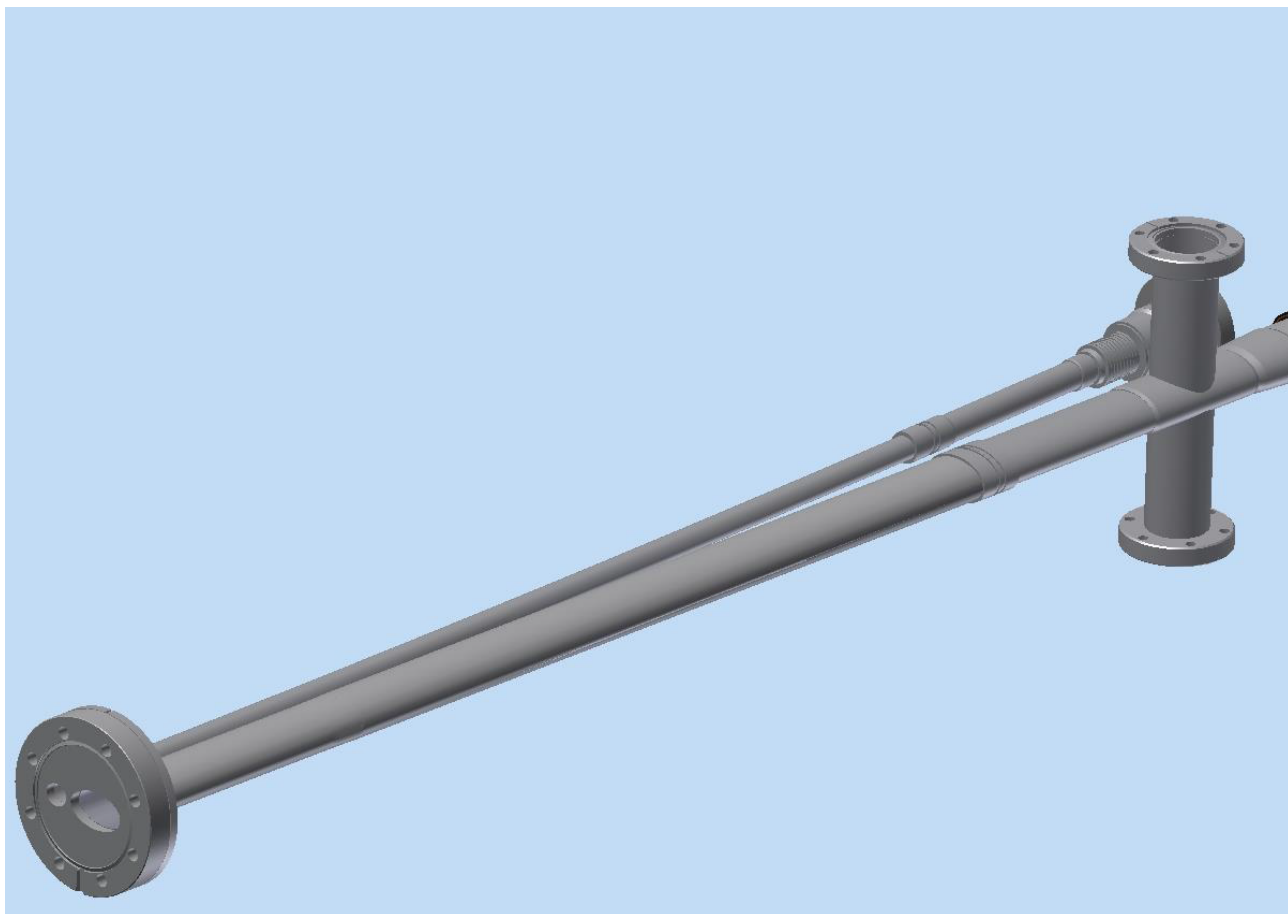


Рис. 2.3.8. 3D модель вакуумной камеры выпускного септума

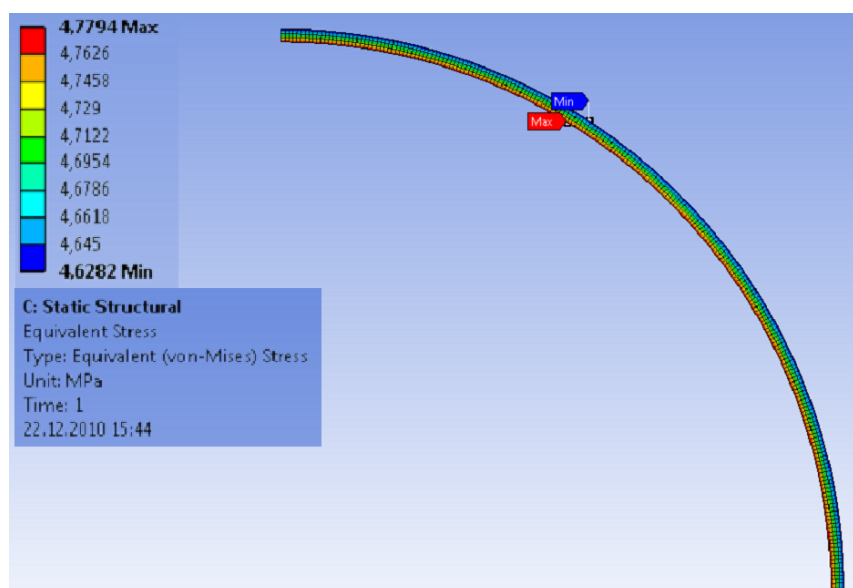


Рис. 2.3.9. Расчет нагрузки для камеры канала впуска пучка. Величина максимальной нагрузки составляет 4,8 МПа (представлена четверть сечения камеры)

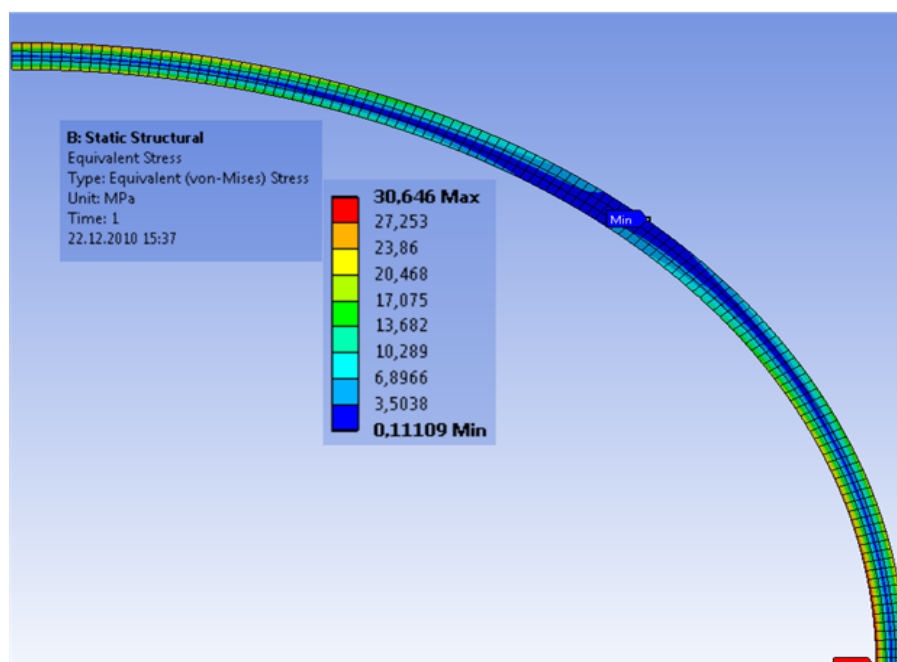


Рис. 2.3.10. Расчет нагрузки для камеры канала выпуска пучка. Величина максимальной нагрузки составляет 30 МПа (представлена четверть сечения камеры)

2.3.3.1. Технология изготовления вакуумных камер септум магнитов

Технология изготовления камер септум магнитов идентична технологии изготовления камер дипольного магнита, за исключением, тонкостенных деталей. Сварка тонкостенных деталей к толстостенным (например, фланцам) весьма затруднительна и чревата большим количеством брака, поэтому заменяется высокотемпературной пайкой в вертикальном положении:

1. Подготовка заготовок в размер;
2. Гибка труб нужного радиуса;
3. Изготовление профилей труб необходимых апертур при помощи матриц и пуансона;
4. Промывка отдельных узлов перед пайкой или сваркой как и для дипольных камер;
5. Пайка тонкостенных деталей в вертикальном положении;
6. Финальная сборка всех узлов на стапелях перед сваркой;
7. Сварка аргонно-дуговая с внутренним поддувом.

2.3.3.2. Технология пайки

Пайка осуществляется при температуре 1050 °С медно-оловянистым припоем CuSn10 при наличии «свидетеля» ПМГр Н-10-1,5В (Cu-88,5%, Ge-10%, Ni-1,5%). Пайка по свидетелю припоя означает, что во время пайки вне посредственной близости с деталями вакуумной камеры в вакуумной печи

располагается кусочек припоя ПМГр Н-10-1.5В. Пайка производится при температуре плавления припоя. Момент расплавления кусочка припоя определяется визуально через окно. Давление в печи на момент начала пайки, порядка 10^{-6} Торр.

На Рис. 2.3.11 и 2.3.12 представлены график временно-температурного режима пайки и изображение высоковакуумной печи, соответственно.

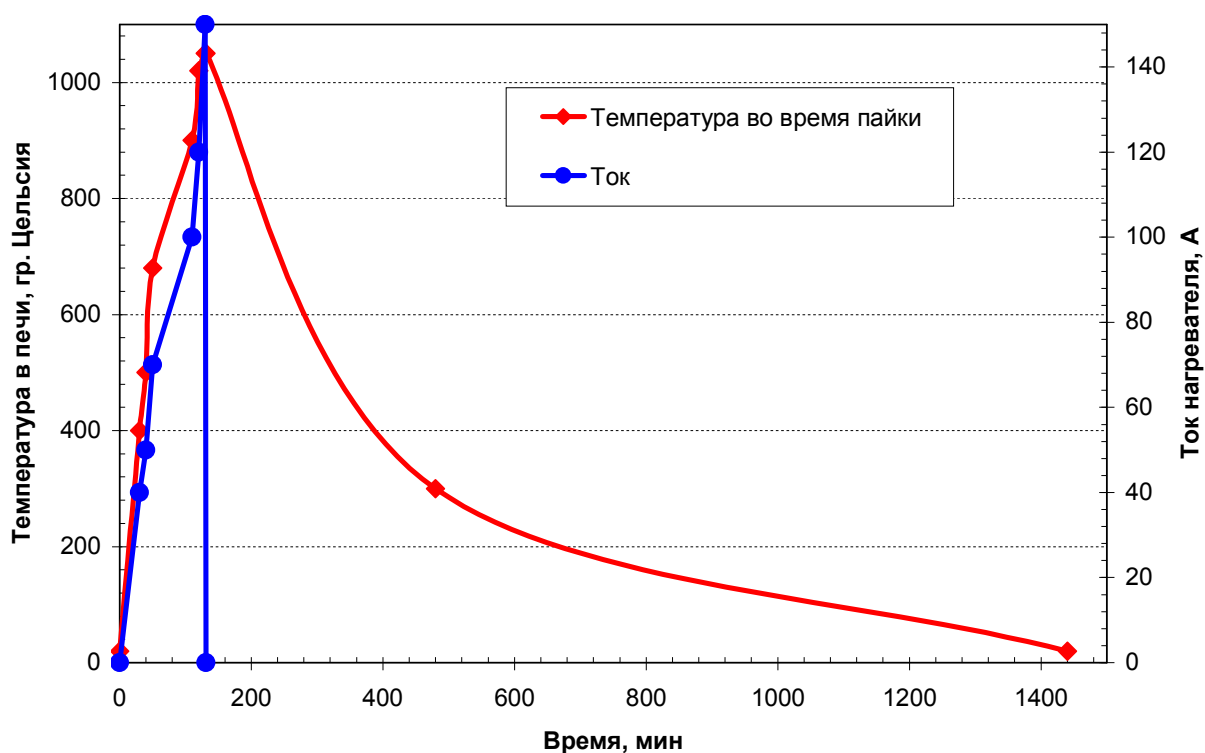


Рис. 2.3.11. Зависимость температуры в печи и тока нагревателя от времени во время пайки



Рис. 2.3.12. Внешний вид высоковакуумной печи

Глава 3

Вакуумные испытания, методика измерения коэффициента термического газовыделения

При получении вакуума 10^{-8} Торр, нет необходимости прогревать камеры на месте эксплуатации после сборки, но необходим предварительный прогрев до сборки всей вакуумной системы, для выявления возможных микротечей, и предварительного обезгаживания камер от загрязнений в процессе финишной сборки.

3.1. Установка для прогрева и измерений

На Рис. 3.1 представлена схема установки для прогрева и измерения коэффициента термического газовыделения.

Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярным насосом 1 и безмасленным спиральным насосом 2, через вакуумный клапан 4. Подключение течеискателя 3 осуществлялось через вакуумный клапан 4. Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления 5 и высоковакуумным датчиком давления 6.

Измерение давления в вакуумном объеме выполнялось датчиками давления с холодным катодом 7 и 8. Измерение парциальных давлений остаточных газов, а также дополнительная проверка на герметичность проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра 9.

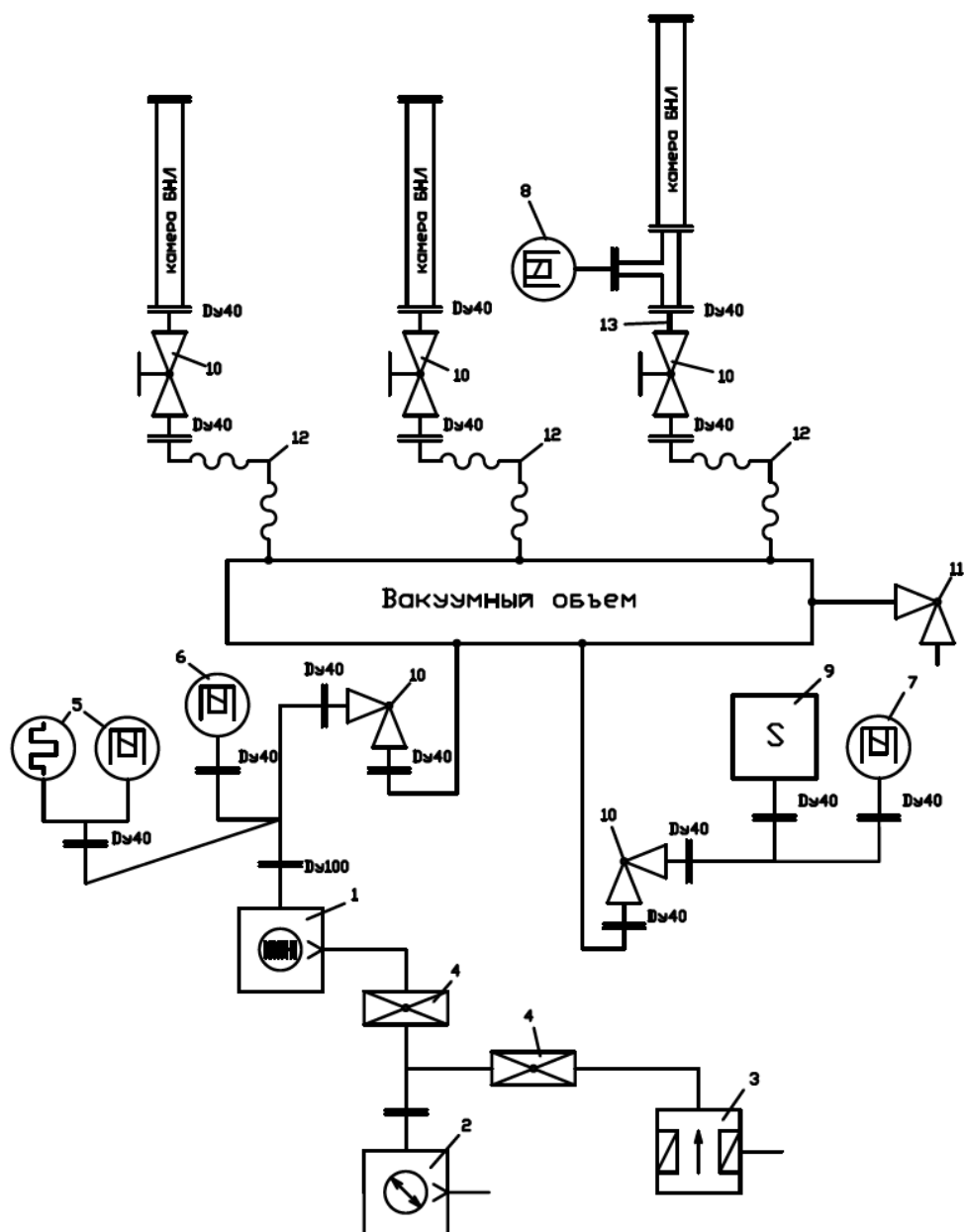


Рис. 3.1. Установка для прогрева и измерения коэффициента термического газовыделения (1- турбомолекулярный насос; 2-безмасленный спиральный насос; 3- течеискатель; 4- вакуумные угловые клапаны; 9- масс-спектрометр; 6, 7, 8- высоковакуумный датчик давления с холодным катодом; 5- широкодиапазонный датчик давления; 10- угловые цельнометаллические клапаны Ду40; 11- угловой цельнометаллический клапан Ду16; 12- сильфоны; 13- канал с калиброванной проводимостью)

Испытываемые вакуумные камеры подсоединялись к вакуумному объему через цельнометаллические угловые клапаны *10* и сильфонные узлы *12*. Напуск сухого азота осуществлялся через цельнометаллический угловой клапан *11*, также этот клапан можно использовать для подсоединения калиброванной гелиевой течи для настройки течеискателя или масс-спектрометра, канал калиброванной проводимости *13* необходим для измерения удельного коэффициента термического газовыделения.

Нагрев всей вакуумной системы проводился нагревательными элементами из нихрома. Температура во время прогрева измерялась термопарами хромель-копель.

3.2. Прогрев и методика измерений

Вакуумные камеры для бустера NSLS-II перед проведением измерений подвергались прогреву при $T = 250 \div 300^{\circ}\text{C}$ в течение 24 часов под вакуумом, при одновременном прогреве откачных портов, датчиков давления и масс-спектрометра (Рис.3.2).

С учетом того, что в большинстве вакуумных камер для бустера есть либо керамические вводы для пикап-электродов, либо они сами изготовлены из керамики, нагрев камер происходил со скоростью $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

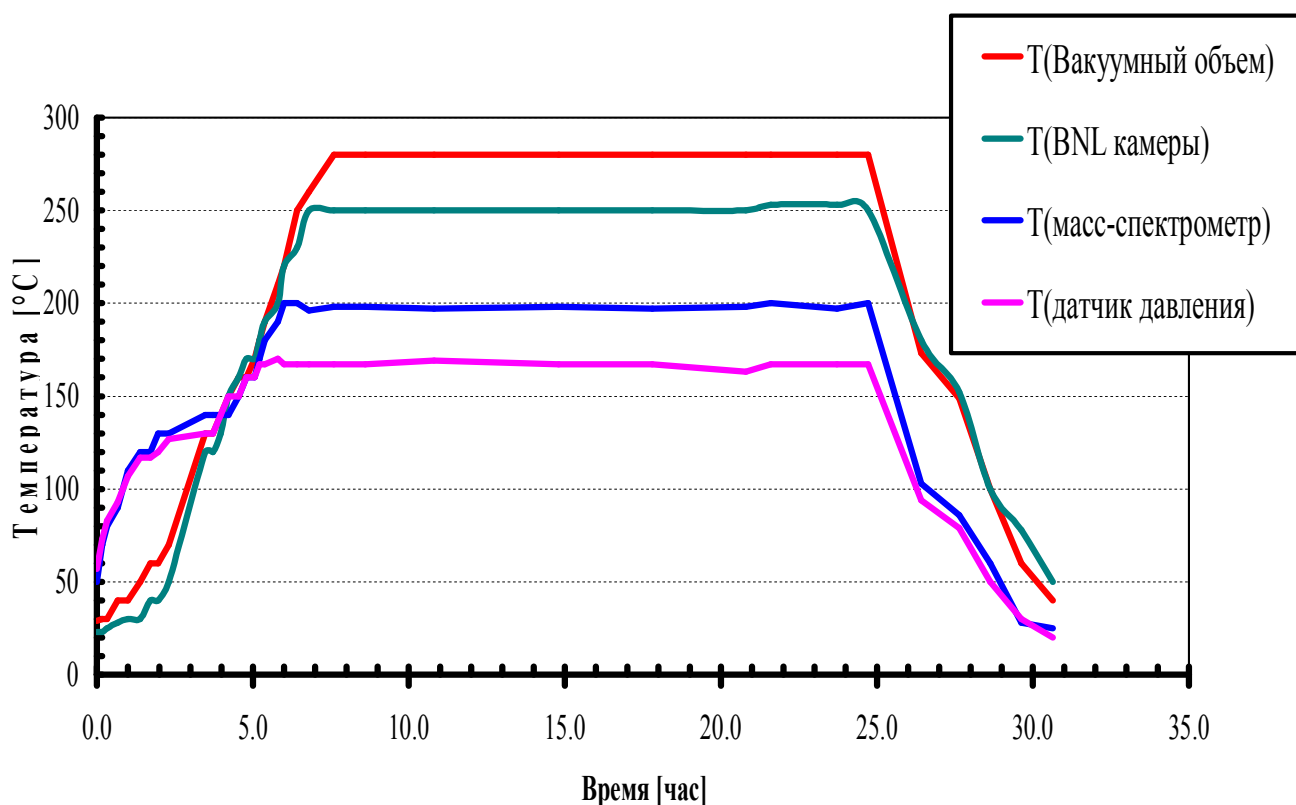


Рис. 3.2. Временнo-температурная диаграмма, иллюстрирующая прогрев установки с вакуумными камерами бустера

После остывания камер до комнатной температуры проводилась проверка на герметичность и определение коэффициента термического газовыделения, основанное на измерении перепада давлений на канале калиброванной проводимости с известной молекулярной проводимостью:

$$q = \frac{C \cdot \Delta P}{\Pi \cdot L} \cdot \alpha, \quad 3.2.1$$

где q - коэффициент термического газовыделения, Π - периметр сечения вакуумной камеры, L - длина камеры, C - молекулярная проводимость отверстия сечением равного сечению канала калибровочной проводимости, ΔP - перепад давлений между датчиками давления РМ3 и РМ2, α - коэффициент Клаузинга канала калибровочной проводимости.

Канал калибровочной проводимости имеет следующие размеры: диаметр 2 мм и длина 2 мм ($C= 0,3$ л/с для воздуха). При такой конфигурации коэффициент Клаузинга равен 0,5 [33]. Коэффициент термического газовыделения для прогретой до 250 °С камеры из нержавеющей стали должен быть порядка 10^{-12} л·Торр/с/см² [34]. По результатам экспериментов было получено, что коэффициент термического газовыделения достигал значений в диапазоне от 10^{-12} до $3 \cdot 10^{-12}$ л·Торр/с/см² для камер бустера.

Для вакуумных камер из нержавеющей стали, которые сначала прогревались при температуре 200÷250 °С, остывали до комнатной температуры (25 °С), «наполнялись» сухим азотом, снова откачивались через неделю, коэффициент термического газовыделения составлял $5 \cdot 10^{-11} \div 10^{-10}$

л·Торр/с/см² через 24 часа непрерывной откачки. Коэффициент термического газовыделения камеры из нержавеющей стали без предварительного прогрева через 24 часа непрерывной откачки составляет $3 \cdot 10^{-10} \div 10^{-9}$ л·Торр/с/см².

В реальных условиях температура окружающей среды в тоннеле, где располагается работающий ускоритель, может достигать 30÷40 °С. Рост температуры окружающей среды с 25 °С до 40 °С приводит к увеличению коэффициента термического газовыделения на 30÷50 %, что является несущественным вкладом к величине суммарного газового потока, вызванного термическим газовыделением.

3.3. Временная зависимость коэффициента термического газовыделения

В Главе 1 при расчетах профиля давлений, величина коэффициента термического газовыделения принималась 10^{-10} л·Торр/с/см². С целью подтверждения этих данных было проведено измерение коэффициента газовыделения для двух камер разных геометрических размеров из нержавеющей стали, но с одинаковыми способами очистки внутренней поверхности камер:

1. Химическая очистка внутренней поверхности вакуумных камер идентичной той, что применялась для камер BNL из нержавеющей стали;
2. Прогрев камер при температуре $200\div 250$ °С в течение 24 часов с последующим остыванием под вакуумом, проверка на герметичность;
3. Напуск сухого азота до 1 атм;
4. Повторная откачка через неделю после напуска азота и измерение коэффициента термического газовыделения через 1 день, через 4 дня, и через неделю после старта откачки.

На Рис. 3.3 представлены результаты измерения коэффициента термического газовыделения для двух различных камер, в зависимости от времени откачки, для комнатной температуры окружающей среды.

Как видно из результатов экспериментов, коэффициент газовыделения, для непрогретой повторно камеры, уже через 4 дня достигает величины порядка 10^{-11} л·Торр/с/см², вне зависимости от формы камеры.

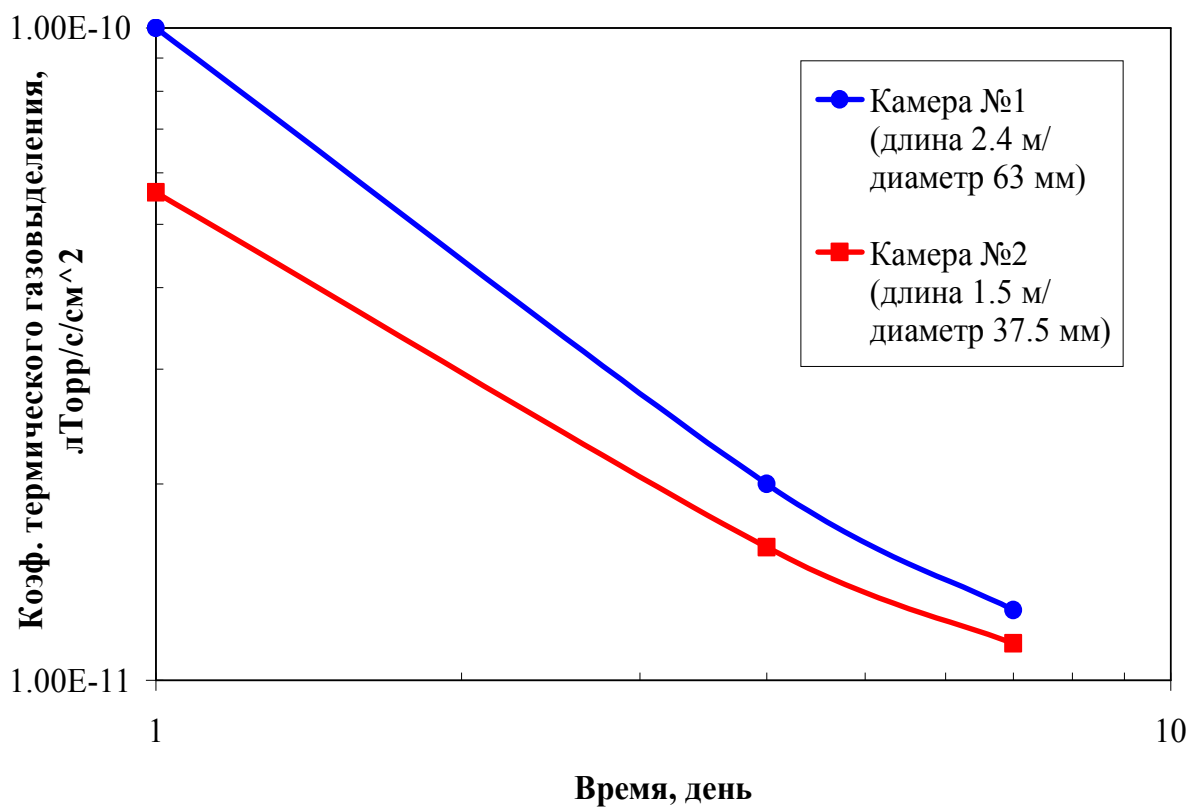


Рис. 3.3. Коэффициент термического газовыделения для двух различных камер в зависимости от времени откачки. Метод очистки внутренней поверхности камер одинаковый

3.4. Вакуумные испытания

Проведенные испытания прогрева и измерения коэффициента термического газовыделения на отдельной вакуумной камере позволили создать процедуру контроля качества для серии изготовленных камер:

- 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/с), 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.

Глава 4

Автоматизация вакуумной системы бустера

Все источники питания вакуумного оборудования и система автоматизации для них располагаются в 19" электрическом шкафу NEMA 12. Каждый шкаф объединяет в себе четыре радиостойки. В каждой радиостойке располагается вакуумное оборудование поворотной секции и, последующего по направлению движения пучка, прямолинейного промежутка. Схема расположения контроллеров вакуумного оборудования показана на Рис. 4.1.

Для питания и управления магниторазрядными насосами используются двухканальные контроллеры фирмы Varian, обеспечивающие включение/выключение насосов, а также управление подачей высокого напряжения и измерение тока насоса. Контроллеры подключаются к коммутатору Моха по последовательной связи и далее к управляющему компьютеру по сети Ethernet. Зная измеренный ток насоса можно оценить давление остаточных газов:

$$P = f(I), \quad 4.1$$

где P - давление остаточных газов в насосе, Торр; I - ток насоса, А.

Сигналы с датчиков давления обрабатываются трехканальными контроллерами MKS 937B, которые, как и контроллеры насосов, подключены к коммутатору Моха по последовательной связи.

Для управления вакуумными шиберами на бустере используется 4 шасси с PLC (Programmable Logic Controller), размещенные в четырех радиостойках. Каждый PLC обслуживает оборудование одной поворотной секции и прилегающего по ходу пучка прямолинейного промежутка. Вид радиостойки с вакуумным оборудованием приведен на Рис. 4.2. На передней панели каждого каркаса с вакуумным PLC смонтирован 6" сенсорный экран, на котором графически отображается состояние вакуумного оборудования и вакуума той части установки, которой управляет данный PLC.

Четыре вакуумных PLC бустера и два PLC, управляющие вакуумным оборудованием каналов транспортировки пучка LTB и BTS, объединены в единую систему автоматического управления шиберами. Такое объединение PLC способствует надежной выработки сигналов, разрешающих работу оборудования и инъекцию пучка в случае готовности вакуумной системы бустера. Шасси с вакуумным PLC включает несколько модулей цифрового ввода/вывода для приема сигналов блокировок от источников питания насосов и вакуумных датчиков давления и выдачи управляющих команд на закрытие шиберов. При появлении блокировочных сигналов от контроллеров насосов и измерителей вакуума, прилегающих к данному шиберу, возникающих из-за ухудшения уровня вакуума, PLC либо отдает команду на закрытие соответствующего шибера, либо выдает сигнал “соседнему” PLC, который управляет этим шибером. Кроме того, каждый вакуумный PLC выдает сигнал о состоянии управляемых им шиберов на PLC системы защиты

оборудования (Equipment Protection System). В PLC EPS сигналы о состоянии всех шиберов от всех вакуумных PLC обрабатываются в соответствии с выбранным режимом работы инжектора, и затем суммарный сигнал подается на систему блокировки пушки линейного ускорителя. Также PLC EPS выполняет функцию диспетчера блокировочных сигналов: он принимает все сигналы, приходящие от различных датчиков и логических устройств, касающиеся обеспечения безопасной работы бустера и его источников питания, и выдает суммарные сигналы, разрешающие работу, непосредственно на защищаемое оборудование. Важное внимание уделяется обеспечению снижения радиационной нагрузки на оборудование. Система EPS запрещает включение пучка, если не обеспечен режим проводки пучка до одного из трех поглотителей пучка, имеющих на инжекционном комплексе или до впуска в основное кольцо.

Также измерялась температура стенки вакуумных камер диполей и импульсных магнитов. Для этого в шасси вакуумных PLC бустера включены температурные измерительные блоки, к которым подсоединены резистивные температурные датчики, которые прикреплялись к вакуумной камере в местах излучения СИ при помощи каптона с клеевым слоем.

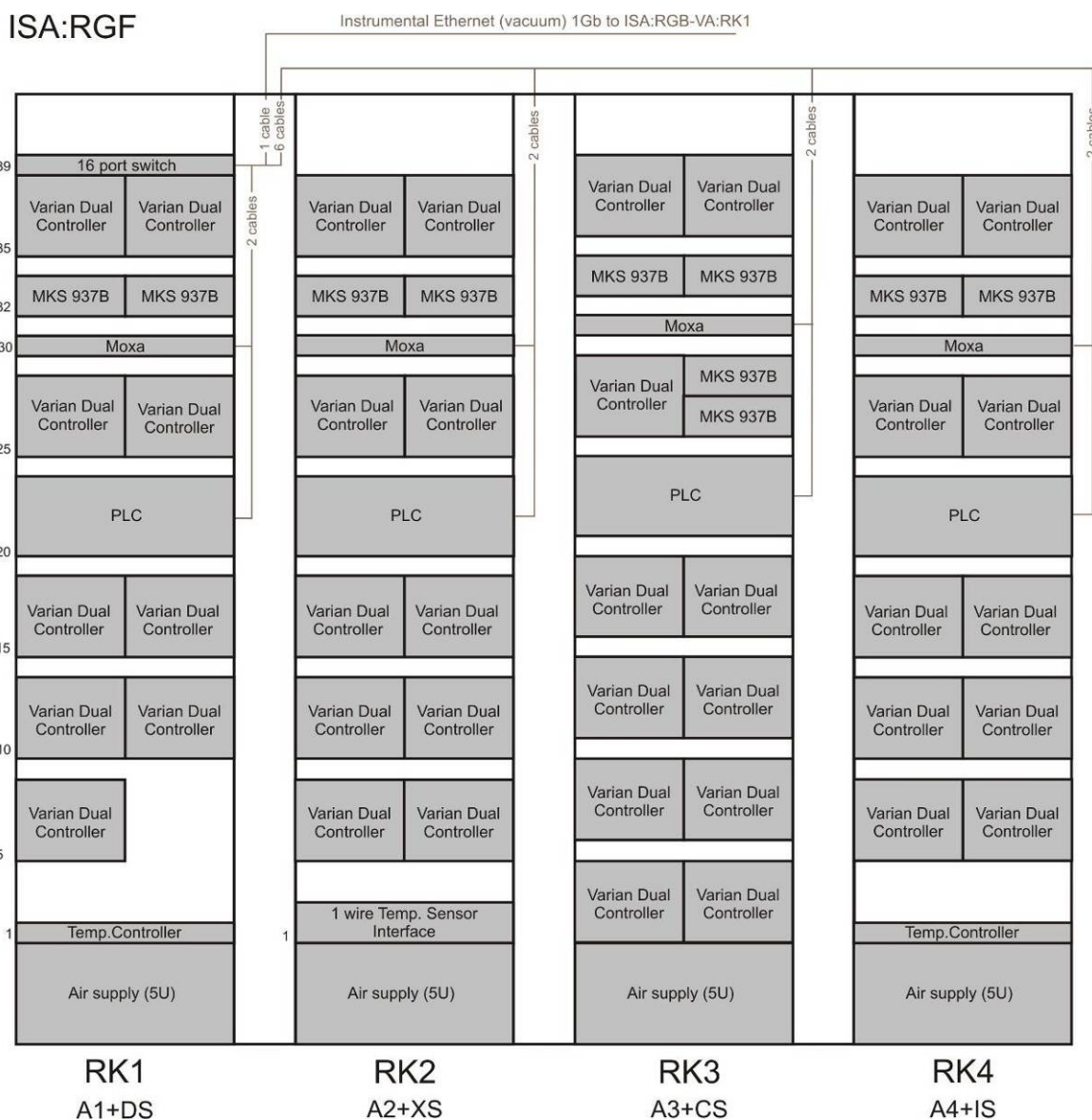


Рис 4.1. Схема расположения управляющего оборудования для вакуумной системы в стойке: Varian Dual Controller- источник питания для магниторазрядных насосов; MKS 937B- источник питания для датчиков давления; Temp. Controller- контроллер измерения температуры вакуумных камер и самой стойки; Air supply- воздушное охлаждение стойки; PLC (Programmable Logic Controller)- программируемый логический контроллер

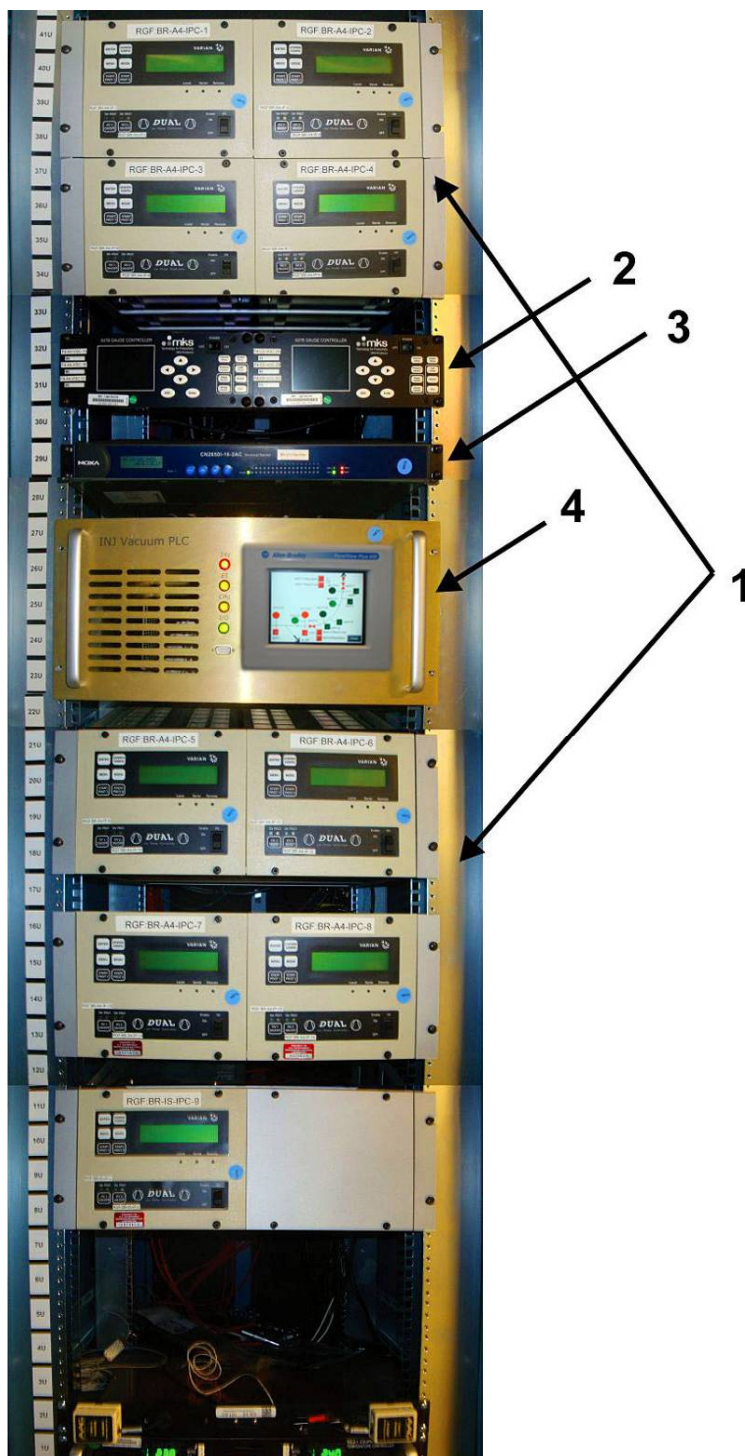


Рис 4.2. Пример радиостойки с вакуумным оборудованием: 1– двухканальные контроллеры магниторазрядных насосов Varian, 2– трехканальные контроллеры вакуумных датчиков давления MKS937B, 3– коммутатор Моха, 4 – каркас с шасси PLC

Глава 5

Запуск бустера NSLS-II

Сборка всей вакуумной системы бустера была осуществлена в кратчайшие сроки (менее трех месяцев). Вначале были собраны все поворотные секции, потом прямолинейные промежутки. После сборки всего промежутка (от шибера до шибера) он откачивался, вначале турбомолекулярной станцией (ТМН) до вакуума, при котором возможно включение магниторазрядных насосов (МРН), проверялся на герметичность, и далее откачка уже осуществлялась непосредственно одними МРН.

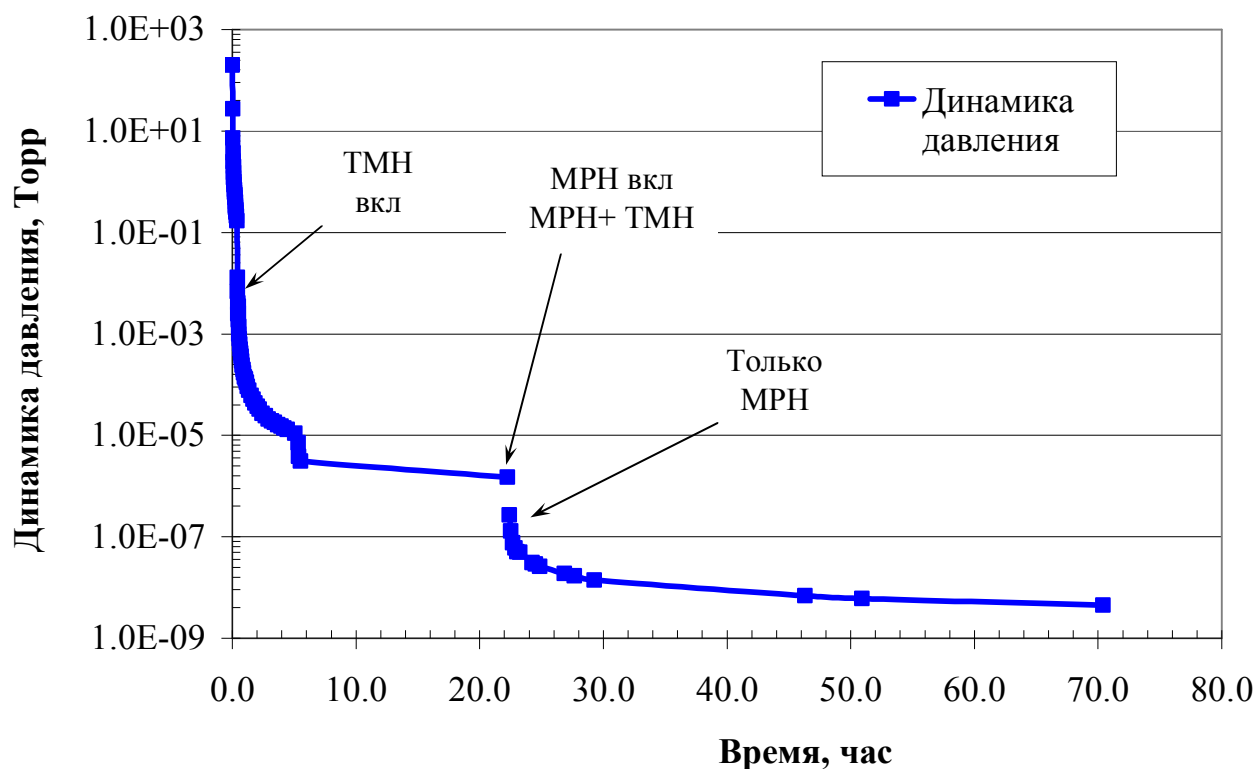


Рис.5.1. Проверка работоспособности магниторазрядных насосов при прорыве атмосферы в поворотной секции

При реальных условиях эксплуатации любая электрофизическая установка подвергается непредвиденным аварийным или экстремальным ситуациям. Для магниторазрядных насосов одним из экстремальных условий является вскрытие на атмосферу во время его работы, что может привести к механическому повреждению керамических изоляторов или к «загрязнению» внутренней поверхности насосов.

С этой целью на первой собранной в BNL, и откачанной магниторазрядными насосами до вакуума порядка 10^{-9} Торр поворотной секции, был искусственно совершен прорыв воздуха, до вакуума примерно 200 Торр. На Рис. 5.1 показана последовательность откачки секции после прорыва. Первоначально откачка осуществлялась турбомолекулярной станцией до вакуума 10^{-6} Торр, величины вакуума рекомендуемой для включения магниторазрядных насосов, и через 4 часа откачка поворотной секции происходила снова исключительно магниторазрядными насосами.

Как видно из Рис. 5.1, через трое суток вакуум в секции вернулся к своему первоначальному значению. Это говорит о том, что однократные аварийные прорывы атмосферы для магниторазрядных насосов неопасны, хотя и нежелательны. Как показывает многолетний накопленный опыт, при правильной эксплуатации, такие ситуации случаются крайне редко.

На Рис. 5.2 представлен уровень давления остаточных газов в каждом промежутке до запуска бустера. Первый и последний столбцы показывают уровень давления в перепускных каналах.

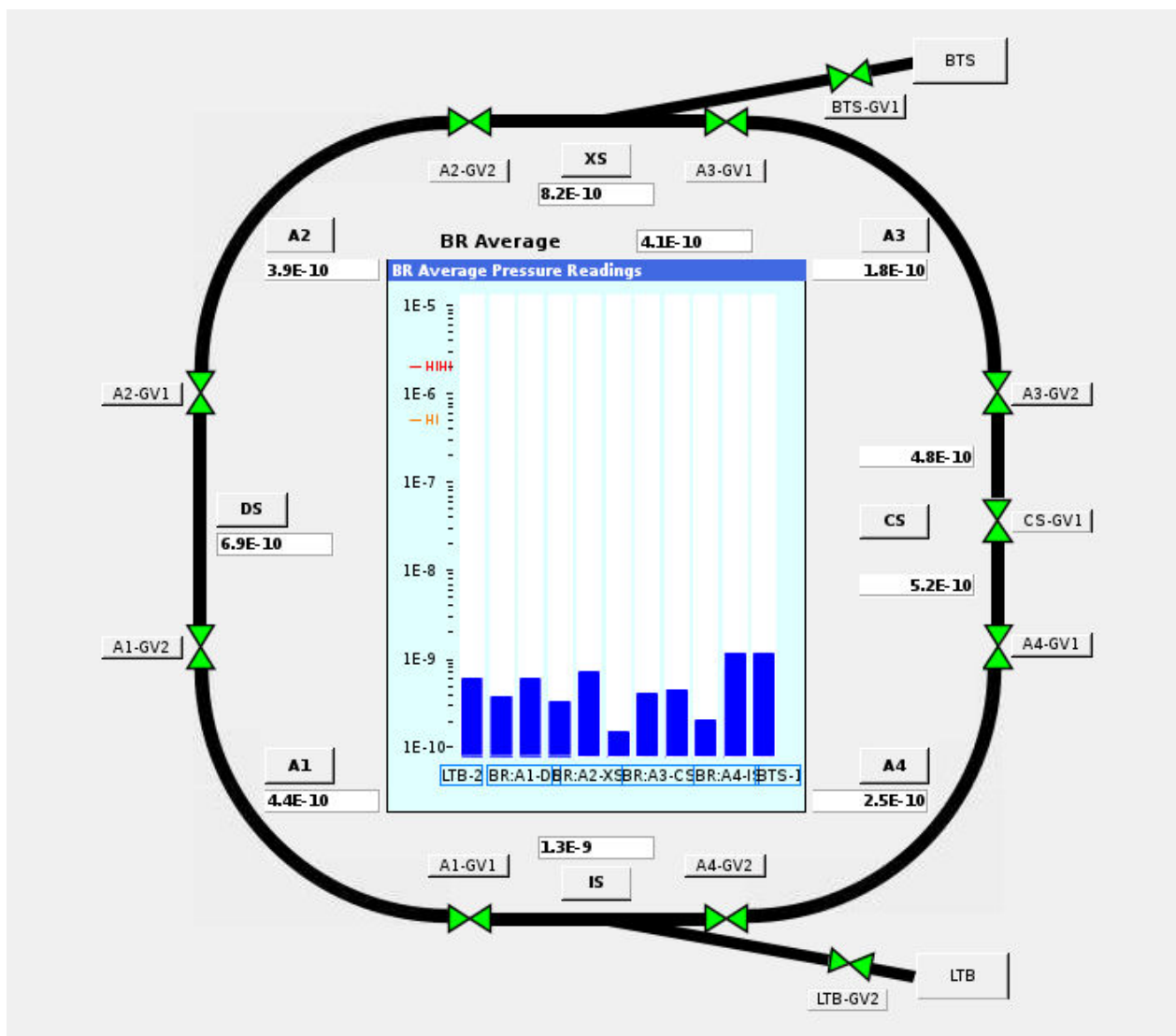


Рис. 5.2 Схема бустера с инъекционным и экстракционными каналами, на которой показаны (зеленым) цельнометаллические шиберы (A1÷A4-поворотные секции, IS- впуск, XS- выпуск, CS- резонаторный промежуток, DS- диагностика, LTB- перепускной канал от линейного ускорителя до бустера, BTS- перепускной канал от бустера до синхротрона NSLS-II) Уровень вакуума (в Торр) в каждом промежутке до начала запуска бустера с пучком указаны в белых полях и дублируются в гистограмме [35, 36]

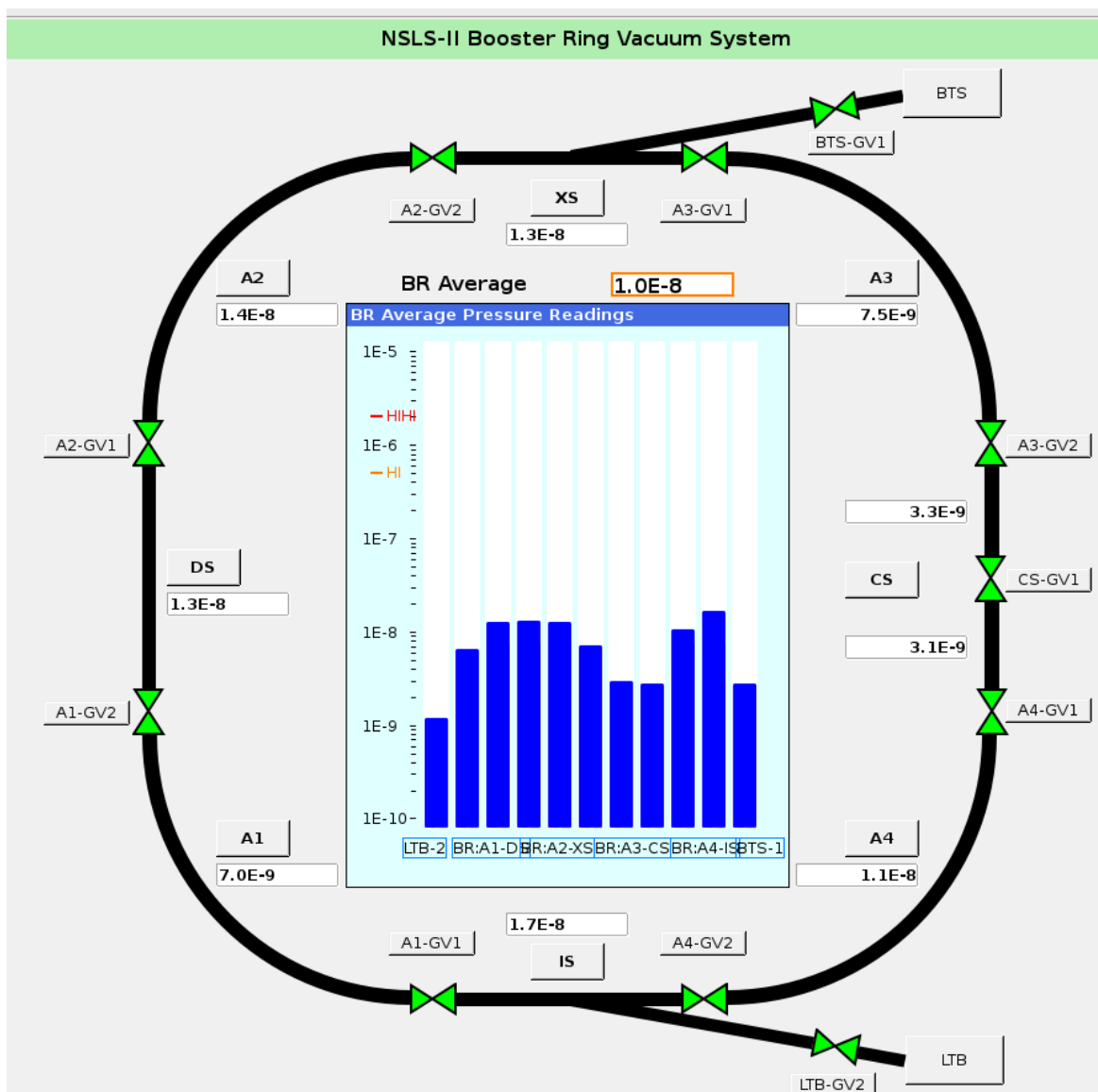


Рис. 5.3. Схема бустера с инжекционным и экстракционными каналами, на которой показаны (зеленым) цельнометаллические шиберы (A1÷A4-поворотные секции, IS- впуск, XS- выпуск, CS- резонаторный промежуток, DS- диагностика, LTB- перепускной канал от линейного ускорителя до бустера, BTS- перепускной канал от бустера до синхротрона NSLS-II) Уровень вакуума (в Торр) под действием синхротронного излучения после начала работ с электронами на энергии 3ГэВ представлены в белых полях и дублируются в гистограмме [35, 36]

В декабре 2013 года начались работы по запуску бустера и через два дня были получены первые пучки электронов. Максимальная энергия электронов (3 ГэВ) была достигнута через месяц после запуска бустера. На Рис. 5.3 показано динамическое давление в бустере, при наличии синхротронного излучения, после начала работ с электронами на энергии 3ГэВ.

В Табл. 5.1 приведено сравнение расчетов и экспериментальных данных в местах расположения датчиков давления.

Заметим, что расчетные данные давления в прямолинейных промежутках взяты в местах, соответствующих реальному расположению датчиков.

Экспериментальные результаты уровня вакуума были получены при среднем токе порядка 1,5 мА и достижении накопленной дозы, равной 0,2 Ач (см. Рис. 5.4).

С момента начала эксплуатации бустера не произошло никаких серьезных поломок вакуумной системы, что лучше всего свидетельствует о ее надежности и работоспособности.

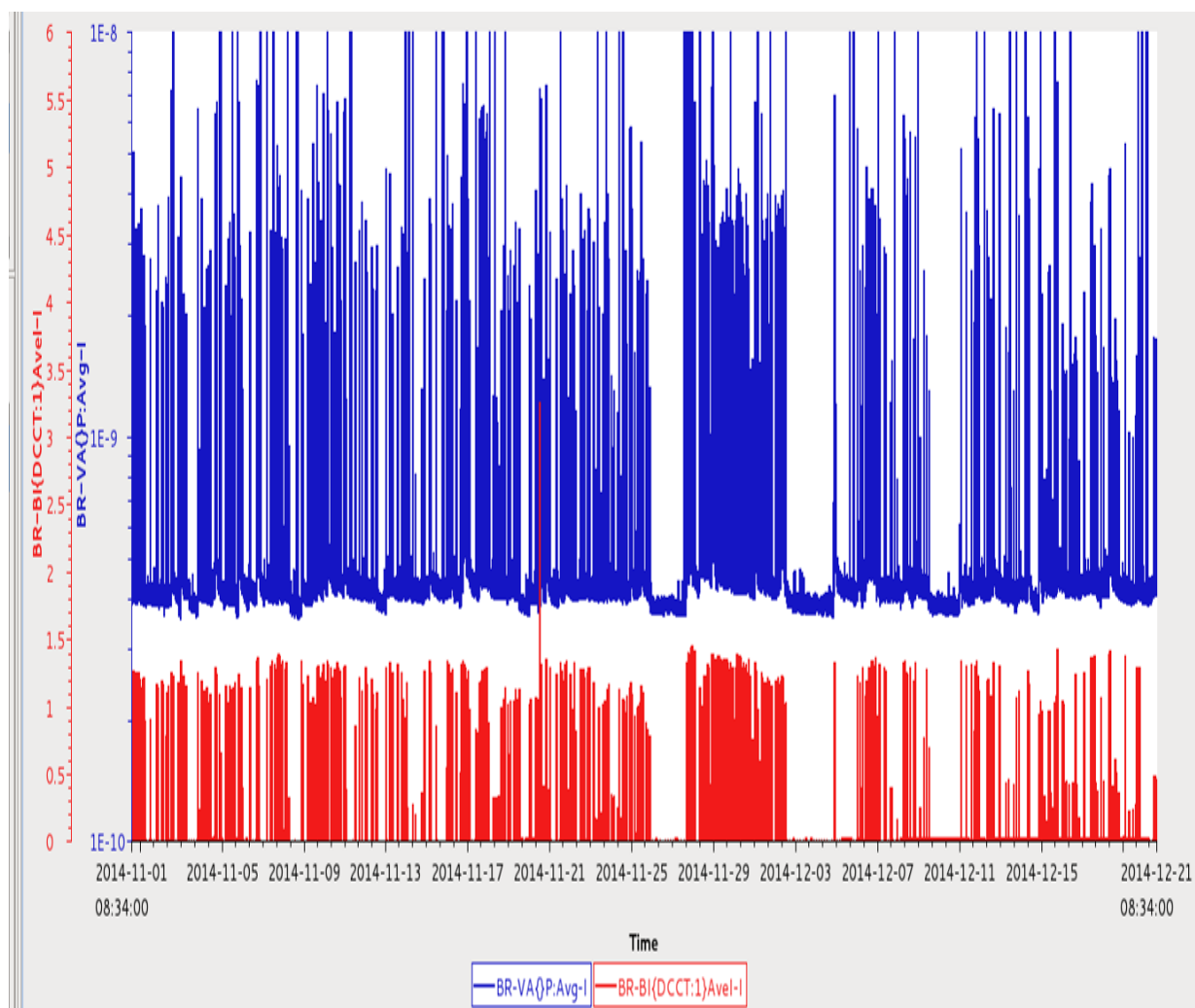


Рис. 5.4. Результаты работы бустера в период с 1 ноября по 21 декабря 2014 года. Средний ток пучка (красным) соответствовал $1 \div 1,5$ мА. Уровень вакуума (синим) равняется $4 \cdot 10^{-10}$ Торр в фоновом режиме и достигает максимума (10^{-8} Торр) при СИ. Диапазон тока пучка в бустере от 0 до 6 мА, диапазон давлений от 10^{-10} Торр до 10^{-8} Торр

Заключение

Основные результаты практической работы, экспериментальных и теоретических исследований, представляемые на защиту:

1. Проведен расчет распределения давлений остаточного газа для бустера NSLS-II с учетом термо- и фотонно-стимулированной десорбции.

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

3. Выполнены расчеты и эксперименты по определению механической прочности и теплового режима вакуумных камер диполей, представлена оптимальная конструкция камер. В результате было получено, что камера испытывает механические напряжения около 114,5 МПа под действием СИ. Экспериментальные и теоретические данные теплового режима вакуумных камер диполей показали, что камера нагревается на 60 °С.

4. Предложена и разработана вакуумная система бустера NSLS-II. Достигнут высокий средний вакуум без пучка на уровне $4 \cdot 10^{-10}$ Торр.

5. Разработана и осуществлена система измерения параметров и система контроля качества вакуумных камер.

6. Осуществлены сборка и запуск вакуумной системы бустера. Полученные измерения давления в фоновом режиме и после запуска синхротрона хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Динамическое давление достигнуто около $6,7 \cdot 10^{-9}$ Торр/мА при накопленной дозе на уровне 0,2 Ач.

В заключение выражаю искреннюю благодарность своим научным руководителям Анашину Вадиму Васильевичу и Краснову Александру Анатольевичу, которым я очень признателен за руководство всей моей научной работой, за ценные замечания и советы в написании диссертации. Также выражаю благодарность Левичеву Евгению Борисовичу, Чуркину Игорю Николаевичу и Гурову Сергею Михайловичу за их руководство при выполнении контракта, поддержку и участие. Пупкову Юрию Алексеевичу и Вострикову Владимиру Александровичу за плодотворное обсуждение текста диссертации и полезные дискуссии, Киселеву Владимиру Афанасьевичу за техническую консультацию на различных этапах написания текста диссертации. Автор также признателен в лице сотрудников ЭП ИЯФ СО РАН, принимавшим непосредственное участие в работах по созданию вакуумных элементов бустера NSLS-II: Б. Ф. Чиркову, А. Н. Косареву, В. Ф. Пактусову и многим другим. А также хочу выразить свою благодарность всему научно-конструкторскому отделу, в особенности Виктору Сергеевичу Кузьминых и Галине Ильиничне Эрг за проектирование всей вакуумной системы бустера.

Литература

- [1]. Г.Н. Кулипанов, А.Н. Скринский. «Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы», Успехи физических наук, т. 122, выпуск 3, 1977.
- [2]. К. Кунц (редактор). Синхротронное излучение: свойства и применения, издательство «Мир», М., 1981.
- [3]. V.A. Bordovitsyn (editor). Synchrotron radiation theory and its development, World Scientific Publishing Co, Singapore, 1999.
- [4]. L. Nadolski, J.C. Besson, P. Brunelle, et al. Status of the SOLEIL Project, APAC 2007, Indore, India, 2007.
- [5]. M. Belgroune, D. Einfeld, J. Bordas, et al. Status of the ALBA Project, Proceedings of FLS'06, Hamburg, Germany, 2006.
- [6]. M. Georgsson, L. Prastegaard, S. P. Muller, L. Dallin. Commissioning Report of the CLS Booster Synchrotron, Proceedings of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 2004.
- [7]. R.P. Walker. Overview of the Status of the DIAMOND Project, Proceedings of EPAC'06, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [8]. F. Willeke. Status of NSLS-II, Proceedings PAC'11, New York, NY, USA, 2011.
- [9]. S. Friis-Nielsen, S.P. Moller. Beam dynamics aspects of the ASP booster. Proceeding of the PAC 2005, Knoxville, Tennessee, USA, 16-20 May 2005.

- [10]. A. Loulergue. Status of the SOLEIL booster synchrotron. Proceeding of the PAC 2005, Knoxville, Tennessee, USA, 16-20 May 2005.
- [11]. W. Joho, M. Muñoz and A. Streun. The SLS booster synchrotron, Nucl. Instrum. and Meth. A, Vol. 562-1, pp. 1-11.
- [12]. M.Pont, E.Al-Dmour, G.Benedetti, D.Einfeld, A.Falone, M.de Lima Lopes, U.Iriso, M.Muñoz, and F.Pérez. Injector design for ALBA, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 26-30 June, 2006.
- [13]. T. Shaftan et al. “NSLS-II Booster Design”, NSLS-II Tech. note 0061 (2009).
- [14]. S. Gurov, A. Akimov, O. Anchugov, A. Semenov, et al. “Status of NSLS-II Booster”, Proceedings PAC’2011, New York, NY, USA, 2011.
- [15]. И.А. Кооп: “Разработка и экспериментальное изучение фокусирующей структуры электрон-позитронного накопителя с большой светимостью (ВЭПП-2М)”– диссертация кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 1976.
- [16]. В.Л. Ауслендер, С.И., Мишнев, А.Н. Скринский. Расчетные параметры пучка в накопителе ВЭПП-2. Препринт ИЯФ СО АН, Новосибирск, 1965.
- [17]. G. Stupakov, Ion effect estimates for the NSLS-II storage ring, NSLS-II tech note.
- [18]. C. Benvenuti, P. Chiggiato, F. Cicoira, and Y.L`Aminot. J. Vac Sci. Technol. A 16 (1), 148 (1998)
- [19]. C. Benvenuti, P. Chiggiato, P. Costa Pinta, A. Escudeiro Santana, T. Hedley, A. Mongelluzzo, V. Ruzinov, I. Wevers. Vacuum properties of TiZrV non-

evaporable getter films. *Vacuum* 60 (2001), p.57.

[20]. C. Benvenuti, A. Escudeiro Santana, V. Ruzinov. Ultimate pressure achieved in TiZrV sputter-coated vacuum chamber. *Vacuum* 60 (2001), p.279.

[21]. C. Benvenuti. A new pumping approach for the large electron positron collider (LEP). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 205, issue 3, pp. 391-401 (1983).

[22]. 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.

[23]. E. Abakumova, V. Anashin, K. Balewski, R. Boespflug, G. Gusev, E. Levichev, A. Krasnov, V. Kuzminykh, B. Nagorny, Yu. Pupkov, A. Semenov, V. Smaluk, M. Tischer, H.-P. Wedekind, K. Zapfe, A. Zhukov, K. Zolotarev. Performance of the vacuum system for the PETRA III damping wiggler section, *Vacuum*, 2012, №86, p. 822-826.

[24]. 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 Ar⁸⁺ beam at grazing incidence, *J. Vac. Sci. Technol. A* 7(1), Jan/Feb 2009, pp 139-144.

[25]. E. Mahner, J. Hansen, D. Kuchler, M. Malabaila and M. Taborelli. Ion-stimulated gas desorption yields of electropolished, chemically etched and coated (Au, Ag, Pd, TiZrV) stainless steel vacuum chambers and St707 getter strips

irradiated with 4,2 MeV/u lead ions. Physical review special topics - accelerators and beams 8, 053201 (2005).

[26]. D.A. Edwards, M.J. Syphers. An introduction to the physics of high energy accelerators, Wiley, 1993.

[27]. О.Б.Малышев: "Исследование фотодесорбционных процессов в прототипах вакуумных камер сверхпроводящих коллайдеров" – диссертация кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 1995.

[28]. V. Anashin, O. Malyshev, V. Osipov, V. Nazmov, V. Pindyurin, A. Salimov, I. Maslennikov, W. Turner, C. Foerster, C. Lanni. Photodesorption Experiments on SSC Collider Beam Tube Configurations. Proceedings PAC'93, 1-20 May, Washington, DC, USA, 1993.

[29]. А.А. Краснов: “Исследование и прогнозирование динамической плотности остаточных газов в вакуумных камерах современных ускорительно-накопительных комплексах”– диссертация кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, 2012.

[30]. 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.

[31]. 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.

[32]. Stefan Wilfert. Überlegungen zu den Vakuumsystemen der SIS 100/300-

Ringe Teil I, Bericht, Magdeburg, 2005.

[33]. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. Москва, “Высшая школа”, 1990.

[34]. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем, Москва, «Энергия», 1970.

[35]. 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.

[36]. V.V. Anashin, S.M.Gurov, V.A.Kiselev, A.A.Krasnov, A.M.Semenov. NSLS-II booster vacuum system. Труды XXIV Российской Конференция по ускорителям заряженных частиц “RUPAC-2014”, Обнинск, 6 - 10 октября 2014.

[37]. A. Chao, M. Tigner. Handbook of accelerator physics and engineering, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 1999.

[38]. Е.В. Абакумова, В.В. Анашин, К. Balewski, R. Voespflug, Г.А. Гусев, Е.Б. Левичев, А.А. Краснов, В.С. Кузьминых, В. Nagorny, Ю.А. Пупков, А.М. Семенов, В.В. Смалюк, М. Tischer, Н-Р. Wedekind, К. Zarfe, А.А Жуков, К.В. Золотарев. Вакуумная система секций охлаждения пучка PETRA III. // Вакуумная техника и технология. Том 21, №2, 2011, стр.85-89.