

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

На правах рукописи

СЕМЕНОВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЬНЫХ И
ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор физико-математических наук,
академик РАН Логачев Павел Владимирович

Новосибирск – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Материалы, используемые в высоковакуумной технике.....	22
1.1. Нержавеющая сталь.....	23
1.2. Медь и ее сплавы.....	26
1.3. Алюминий и его сплавы.....	29
1.4. Нераспыляемые геттеры.....	31
1.5. Керамические материалы на основе карбидов.....	36
1.5.1. Карбид бора.....	36
1.5.2. Карбид кремния.....	46
1.6. Сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат.....	51
1.7. Сцинтилляторы.....	57
1.8. Аэрогель.....	66
Глава 2. Вакуумные соединения для получения высокого и сверхвысокого вакуума.....	69
2.1. Сварное вакуумное соединение.....	69
2.2. Разъемные соединения с металлическими уплотнениями.....	76
Глава 3. Вакуумные насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума.....	89
3.1. Принцип действия магниторазрядного насоса.....	90
3.1.1. Диодный тип насоса.....	90
3.1.2. Эффект увеличения скорости откачки. Аргонная нестабильность.....	94
3.1.3. Диодный насос с улучшенной скоростью откачки по инертным газам.....	96
3.1.4. Триодный тип насоса.....	98
3.2. Описание конкретных моделей магниторазрядных насосов.....	99
3.3. Теоретический расчет скорости откачки.....	103
3.4. Стенд для измерения скорости откачки магниторазрядных насосов.....	110
3.5. Калибровка датчиков давления и квадрупольного масс-спектрометра.....	113
3.6. Влияние спектра остаточных газов на скорость откачки магниторазрядного насоса.....	115
3.7. Экспериментальные результаты измерения скорости откачки магниторазрядных насосов.....	116
3.8. Специализированный источник питания с контроллером.....	131
Глава 4. Насосы на основе нераспыляемых геттеров.....	134
4.1. Механизм активации геттера.....	135

4.2. Диффузия и предел растворимости	137
4.3. Роль температуры и времени для активации геттеров	141
4.4. Стенд для испытания насосов на базе нераспыляемых геттеров	146
4.5. Первые вакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров из отечественных материалов	148
4.6. Сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ»	154
4.6.1. Сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров	154
4.6.2. Комбинированные насосы.....	159
4.6.3. Нераспыляемые геттеры в узкоапертурных камерах	164
Глава 5. Вакуумная система инжекционной части ЦКП «СКИФ».....	174
5.1. Вакуумная система линейного ускорителя.....	174
5.2. Вакуумная система перепускных каналов	176
5.3. Вакуумная система бустерного синхротрона ЦКП «СКИФ»	180
5.3.1. Расчет профиля давления	186
Заключение	192
Благодарности.....	194
Приложение А1. Расчет проводимости в молекулярном режиме.....	196
Приложение А2. Расчет эффективной быстроты откачки магниторазрядного насоса.....	199
Список литературы	202

Введение

Актуальность темы диссертации

Исследование и методы получения вакуума неразрывно связаны с фундаментальными науками, такими как химия, биология, молекулярная физика, термодинамика и другими. Кроме того, вакуум является средой для осуществления научно-исследовательских работ, которые нельзя выполнить при атмосферном давлении, в таких областях, как электроника, термоядерный синтез, ускорительная техника. Во многих современных научных установках требуется получение высокого или даже сверхвысокого уровня вакуума. Поэтому при создании высоковакуумных и сверхвысоковакуумных систем не существует мелочей и необходимо задумываться не только о средствах получения и измерения вакуума. Важен выбор материалов, из которых будут создаваться вакуумные камеры или которые будут располагаться внутри вакуумируемых объемов. Такими материалами могут быть люминофоры, различные органические соединения и покрытия, керамики, ферриты и т.п. Немаловажным является так же технологическая и конструкторская проработка фланцевых соединений и подготовительных операций. Все это и многое другое требует от разработчика тщательного, вдумчивого подхода на всех этапах: начиная от расчетов и заканчивая запуском установки.

На сегодняшний день в вакуумном научном сообществе принята классификация степеней вакуума в зависимости от значения давления: низкий вакуум при диапазоне давления от 33 мбар до 1000 мбар; средний вакуум – от 10^3 мбар до 33 мбар; высокий вакуум – от 10^{-6} мбар до 10^{-3} мбар; очень высокий вакуум – от 10^{-9} мбар до 10^{-6} мбар; сверхвысокий вакуум – от 10^{-12} мбар до 10^{-9} мбар и экстремально высокий вакуум – меньше 10^{-12} мбар.

На данный момент хорошо изучены и широко используются во всем мире для получения вакуума такие материалы как нержавеющие стали, медь и медные сплавы, алюминий и его сплавы. Периодически возникает необходимость в

применении материалов, которые ранее не использовались в вакуумной технике: карбид бора для защиты персонала и оборудования от радиации вызванной быстрыми нейтронами [1], [2], [3]; карбид кремния для создания вакуумных камер; люминофоры для диагностики пучка частиц в ускорителе, а в последнее время появились органические стекла, по своим механическим свойствам не уступающие некоторым маркам стали. Эти и многие другие материалы требуют детального изучения вакуумных свойств перед применением: газовыделение со стенок, проницаемость для различных газов и многое другое.

Другим важным аспектом, встающим перед разработчиком вакуумной системы, является выбор разборных соединений. В последнее время для фундаментальных исследований создаются ускорительные комплексы с большой апертурой вакуумных камер (400 мм и более). Существует множество различных типов вакуумных соединений и уплотнений, позволяющих получить высокий и сверхвысокий вакуум. Каждый тип имеет свои достоинства и недостатки, к которым можно отнести опыт применения того или иного типа соединения на различных установках, а также толщину фланцев и необходимое для их стыковки место, стоимость фланцев или уплотнений. Чем тоньше фланец, тем меньше требуется пространства на стыковку элементов вакуумной камеры ускорителя и тем больше будет полезного пространства для размещения магнитных элементов, элементов диагностики или другого дополнительного оборудования. Одним из возможных решений являются сварные фланцы, но данный тип соединения ограничен количеством циклов “сварка/резка” (единицы раз), в то время как разъемные соединения можно использовать десятки и даже сотни раз при установке нового уплотнения. К тому же при каждой резке происходит уменьшение длины камеры, для компенсации которой необходимо применение дополнительных сильфонов, что в свою очередь приводит к удорожанию вакуумной системы. В качестве альтернативы могут быть выбраны фланцевые соединения типа ConFlat с плоским медным уплотнением, которые широко используются в ускорительной технике по всему миру. Однако соединения данного типа ограничиваются коммерческой продукцией с максимальным

размером DN400 [4]. При этом с увеличением проходного диаметра увеличивается и толщина фланца, что требует большего рабочего пространства для стыковки.

После сборки вакуумной системы, в ней нужно получить высокий вакуум. Для этого используются различные безмасляные откачные средства, такие как турбомолекулярные насосы с последовательно соединенными форвакуумными насосами, крионасосы, магниторазрядные насосы с газопоглощающими веществами – геттерами, либо без них. Без магниторазрядных насосов почти во всех ускорителях заряженных частиц невозможно достичь и поддерживать нужной степени вакуума, так как они могут работать без замены десятки лет в отличие от крионасосов, которым требуется периодическая регенерация. Бесспорным преимуществом магниторазрядных насосов над турбомолекулярными является то, что данные насосы – вакуумно-изолированные в отличие от турбомолекулярных, которым необходимы дополнительные средства откачки и при аварийном выключении электропитания возможно натекание газов вплоть до атмосферного давления даже при наличии аварийных клапанов.

В последнее время все большую популярность приобретают сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров совместно с магниторазрядными насосами из-за малых массогабаритных характеристик.

Актуальной задачей данной диссертации являются поиск новых материалов и изучение их вакуумных свойств для применения в высоком и сверхвысоком вакууме, разработка и исследование современных вакуумных насосов. Эти работы были выполнены в период с 2008 по 2026 гг.

Степень разработанности темы исследования

Разработка новых установок для термоядерного синтеза или ускорителей заряженных частиц требует применение новых материалов, конструктивных решений. В токамаке ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor), в котором задействованы более 33 стран, невозможно применять традиционные средства защиты от интенсивного потока нейтронов из-за массогабаритных ограничений, поэтому было принято решение о применении карбида бора,

вакуумные свойства которого в зависимости от длительности откачки при температуре 100 °С были изучены впервые. Полученные результаты явились ориентиром для коллег из Китая [5] и были приняты научным сообществом ИТЭР.

В связи с обострившейся геополитической ситуацией многое импортное вакуумное оборудование на данный момент недоступно для поставки в Россию, поэтому остро встал вопрос о создании отечественного современного вакуумного оборудования, без которого невозможно создать источник синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ». Разработанные магниторазрядные насосы применяются как средства получения вакуума в инжекционной части ЦКП «СКИФ», а комбинированные насосы и насосы на основе нераспыляемых геттеров используются – в резонаторах бустера и накопительного кольца, а также на самом накопителе СКИФ. Для измерения параметров пучка были применены усовершенствованные методы диагностики, которые потребовали использования, малоизученных с точки зрения вакуума материалов, таких, как диоксид кремния. В рамках этой работы его вакуумные свойства впервые были систематически изучены.

Поскольку адронные ускорители имеют значительно большие сечения вакуумных камер по сравнению с лептонными ускорителями, то для измерения параметров пучка потребовалось создание новых методов нанесения покрытий, например, люминофоров на подложки, поскольку традиционные методы нанесения не обеспечивали равномерность покрытий, а коммерчески доступные ограничиваются размерами 100 мм × 100 мм. Предложенный Институтом общей физики (г. Москва) метод электрофоретического осаждения люминофора Р43 помог в создании люминофорных датчиков размером 270 мм × 480 мм для Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия), что потребовало изучения вакуумных свойств этих люминофорных экранов. По этой же причине потребовалось создание новых разъемных вакуумных соединений с проходным диаметром большого размера (больше 400 мм). Предложенное фланцевое соединение было разработано и применено в вакуумных камерах Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия), а также в резонаторах коллайдера NICA (г. Дубна).

Целями диссертационной работы являются:

1. Исследование вакуумных свойств различных органических и неорганических материалов: люминофоров, сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата, керамик на базе карбидов в зависимости от различных условий подготовки и длительности откачки;
2. Разработка и испытание разъемных вакуумных соединений большого проходного сечения (свыше 400 мм);
3. Разработка и испытание магниторазрядного насоса с сильным магнитным полем до 0,3 Тл;
4. Разработка и испытание современных отечественных однопотенциальных неохлаждаемых магниторазрядных насосов диодного и триодного типов;
5. Разработка и испытание вакуумных насосов на базе нераспыляемого геттера;
6. Разработка, сборка и запуск вакуумной системы инжекционной части источника синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи:**

1. Были разработаны высоковакуумные стенды для изучения газовыделения с поверхности материалов, либо для измерения параметров вакуумных насосов;
2. После изучения влияния и диаметра анодных ячеек, величины магнитного поля была предложена конструкция магниторазрядного насоса с сильным магнитным полем до 0,3 Тл, измерены быстрота откачки насоса по азоту.
3. Были выполнены теоретические расчеты быстроты откачки магниторазрядных насосов;
4. Разработаны и изучены параметры диодных, Noble диодных и триодных магниторазрядных однопотенциальных насосов;
5. Разработаны и изучены параметры насосов на базе нераспыляемых геттеров и комбинированных насосов;

6. На основании достигнутых параметров вакуумных насосов спроектирована вакуумная система инжектора ЦКП «СКИФ».

7. Изготовлена, собрана и успешно запущена вакуумная система инжекционной части ЦКП «СКИФ».

Научная новизна:

1. Впервые измерен коэффициент термического газовыделения из карбида бора при комнатной температуре и нагреве до 100 °С при непрерывной откачке в течение двух с половиной лет. Данные результаты очень важны для систем, в которых необходимо размещать карбид бора для подавления нейтронного потока. Одним из примеров таких систем служит Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР (Кадараш, Франция), в котором на этапе концептуального проектирования предполагалось использовать железные конструкции без нейтронопоглощающих наполнителей, но нейтронные расчеты показали, что из-за ограничений по весу и размерам, данный вариант непригоден. Альтернативным вариантом является использование карбида бора, однако его вакуумные свойства не были известны. Для этой цели в ИЯФ СО РАН были проведены измерения коэффициента термического газовыделения из этого материала, изучен спектр остаточных газов.

2. Впервые измерен коэффициент термического газовыделения и получены спектры остаточных газов из карбида кремния до прогрева и после прогрева при 240 °С при непрерывной откачке в течение типичного времени запуска ускорительного комплекса. Карбид кремния, обладающий электропроводящими свойствами, может быть рассмотрен в качестве материала для вакуумных камер кикеров, в которых в обычном случае на керамические камеры необходимо наносить проводящий слой, для того чтобы «снимать» электрический заряд.

3. Впервые измерен коэффициент термического газовыделения сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата – перспективного материала для создания вакуумных камер, полученного объемной либо фронтальной

полимеризациями и обладающего механическими свойствами сравнимыми с некоторыми марками стали (Ст3).

4. Впервые измерены коэффициенты термического газовыделения: люминофора Р43, нанесенного ультразвуковым распылением и методом осаждения на подложки размерами больше, чем 100 мм × 100 мм для диагностики пучка тяжелых заряженных частиц (ионов и протонов/антипротонов) в ионных ускорителях, а также аэрогеля, изготовленного из аморфного диоксида кремния, применяемого в черенковских датчиках для измерения длины сгустка пучка электронов на линейном ускорителе ЦКП «СКИФ» (г. Новосибирск, Россия). Определена зависимость коэффициента термического газовыделения этих веществ от температуры прогрева, длительности обезгаживания и влияния напуска воздуха до атмосферного давления.

5. В настоящее время в ускорительной технике широко применяются фланцевые соединения типа Conflat, но данные соединения стандартизированы до проходного диаметра 350 мм. Для получения высокого и сверхвысокого вакуума в ускорительных комплексах с большим проходным сечением (в вакуумных камерах поворотных секций установки Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия) или в ВЧ станциях NICA (г. Дубна, Россия)) были разработаны и протестированы разъемные вакуумные соединения Ду 500 с упругими С-образными уплотнениями.

6. Создание магниторазрядных насосов с сильным магнитным полем (до 0,3 Тл) является перспективным решением для получения высокого вакуума, поскольку позволяют уменьшить габариты насоса за счет меньших размеров диаметра и длины анодных ячеек, а также их количества при сохранении быстроты откачки. В то же время при сохранении размеров электродного блока возможно увеличение быстроты откачки насоса за счет увеличения количества анодных ячеек. В работе представлены конструкции диодных магниторазрядных насосов при различных размерах анодных ячеек, их количества, а также зазора между анодом и катодами и величиной магнитного поля. Были выполнены расчеты и проведены измерения быстроты откачки насосов.

7. Создание магниторазрядных насосов триодного типа было обусловлено необходимостью увеличением быстроты откачки инертных газов в ускорителях заряженных частиц. В СССР, с этой целью, были созданы триодные насосы, но они обладали рядом недостатков. Например, насос НМТО-01-1 (ТРИОН-150) охлаждался водой или жидким азотом, что могло привести к печальным последствиям в случае нарушения герметичности трубок охлаждения. Насос МаРТ был двухпотенциальным, что требовало либо применения двух источников питания, либо источник питания, выдающим два различных напряжения. Впервые в России изготовлены малогабаритные однопотенциальные неохлаждаемые триодные насосы с быстротой откачки 20 л/с и 40 л/с и Noble диодные с быстротой откачки 20 л/с и измерены их основные параметры (быстрота откачки по азоту и аргону, а также зависимость тока от давления). Разработанные насосы запущены в серийное производство на заводе АО «Катод» (г. Новосибирск, Россия) для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

8. Изготовлены прототипы высоковакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров Ti-Zr-Al с быстротой откачки 300 л/с, 600 л/с, 800 л/с, 900 л/с и 1300 л/с по водороду. Изучены быстрота откачки насосов по водороду в зависимости от температуры активации. Измерена сорбционная емкость насосов по монооксиду углерода. Запущены в серийное производство на заводе АО «Катод» (г. Новосибирск, Россия) насосы с быстротой откачки 800 л/с и 1300 л/с по водороду для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

9. Впервые в России в целях импортозамещения предложена конструкция комбинированного вакуумного насоса с последовательно соединенными насосом на базе нераспыляемого геттера и магниторазрядного насоса из отечественных материалов для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ». Исследованы газопоглощающие и активационные свойства насосов. Насосы с быстротой откачки 800 л/с и 1300 л/с по водороду и 20 л/с по аргону запущены в серийное производство на заводе АО «Катод» для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

10. Измерены газопоглощающие и активационные свойства нераспыляемых геттеров на базе тантал-титан, нанесенного на внутреннюю поверхность вакуумных камер с возможностью применения в узкоапертурных вакуумных камерах, таких как у ондуляторов и вигглеров синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

Теоретическая и практическая значимость

Результатом диссертационной работы стало:

1. Возможность использования различных органических и неорганических материалов в вакуумных системах физических установок:

- а) карбида бора в ИТЭР в качестве защиты от быстрых нейтронов;
- б) люминофора Р43, нанесенного методом электрофоретического осаждения, в вакуумной системе Collector Ring (FAIR, Дармштадт) и в линейном ускорителе ЦКП «СКИФ» для диагностики пучка;
- в) аэрогеля в черенковских датчиках линейного ускорителя ЦКП «СКИФ» для измерения длины сгустка пучка.

2. Применение разъемных фланцевых соединений с упругими С-образными уплотнениями в ВЧ станциях NICA и вакуумных камерах поворотных секций и в некоторых прямолинейных камерах Collector Ring.

3. Расчеты и исследования магниторазрядных насосов и насосов на базе нераспыляемых геттеров легли в основу создания линейки серийных вакуумных насосов для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ» на заводе АО «Катод».

4. Получение требуемого уровня вакуума в инжекторе ЦКП «СКИФ», что способствовало достижению проектных параметров пучка на Линаке и бустере.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы являются экспериментальные методы исследования, включая методы измерения потока газов; методы теоретического и численного моделирования; методы сопоставления расчетов с экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Измеренное термическое газовыделение из вспененного диоксида кремния равно $3 \cdot 10^{-7}$ л·Торр/с/см² до прогрева и $3 \cdot 10^{-11}$ л·Торр/с/см² после прогрева при температуре 160 °С через 24 часа непрерывной откачки.

2. Сцинтиллятор Р43, нанесенный методом электрофоретического осаждения, после прогрева допускается использовать в больших вакуумных системах.

3. Выполненные исследования вакуумных свойств сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов, изготовленных объемной либо фронтальной полимеризацией позволяют утверждать, что данный материал может быть использован для изготовления вакуумных камер для получения вакуума до 10^{-7} Торр.

4. Измеренный коэффициент термического газовыделения из карбида бора равен $1,55 \cdot 10^{-12}$ л·Торр/с/см² при температуре 100 °С и на два порядка меньше при комнатной температуре после 2,5 лет непрерывной откачки.

5. Измеренный коэффициент термического газовыделения из карбида кремния равен 10^{-11} л·Торр/с/см² до прогрева и 10^{-12} л·Торр/с/см² после прогрева при 240 °С после 4 дней непрерывной откачки.

6. Разработанное и испытанное разъемное вакуумное соединение большого проходного сечения (до 2000 мм) успешно применено в больших вакуумных системах Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия) и резонаторах NICA (ОИЯИ, Дубна) для получения сверхвысокого вакуума.

7. Измеренные быстроты действия малогабаритных однопотенциальных неохлаждаемых триодных и Noble диодных насосов согласуются с расчётными, что позволило запустить данные насосы в серийное производство и использовать в вакуумной системе ЦКП «СКИФ».

8. Измеренные газопоглощающие характеристики и активационные параметры разработанной конструкции высоковакуумных насосов на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al позволяют гарантировать получение сверхвысокого вакуума в ускорительных установках ЦКП «СКИФ».

9. Разработанная конструкция комбинированного высоковакуумного насоса, состоящего из последовательно соединенных в одном корпусе насоса на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al и триодного магниторазрядного насоса, обеспечивает получение сверхвысокого вакуума в ускорительных установках ЦКП «СКИФ».

10. Результаты измерений газопоглощающих и активационных свойств нераспыляемых геттеров на базе сплава тантал-титан, нанесенных на внутреннюю поверхность вакуумных камер, показывают возможность их применения в узкоапертурных вакуумных камерах встроенных устройств для генерации синхротронного излучения (ондуляторов и вигглеров) ЦКП «СКИФ».

11. Разработанная вакуумная система инжекционной части синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ», включающей линейный ускоритель на энергию 200 МэВ, бустер и два канала перепуска позволяет получить требуемые параметры пучка.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, полученных при выполнении измерений. Результаты хорошо воспроизводимы, непротиворечивы между собой. Анализ результатов исследования показывает хорошее соответствие с теоретическими и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13 российских и 5 международных конференциях:

1. IV международной научно-технической конференции, г. Москва, Россия, 2009;
2. Международная конференция по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-18, Новосибирск, Россия, 2018;
3. 30th Symposium on Fusion Technology SOFT-2018, Giardini Naxos, Сицилия, Италия, 2018;

4. XLVI Международных Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2019;
5. International Vacuum Congress IVC'21, г. Мальмо, Швеция, 2019;
6. 28th IEEE Symposium on Fusion Engineering, Jacksonville, Флорида, США, 2019;
7. Международная конференция по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-20, Новосибирск, Россия, 2020;
8. XLVII Международных Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2020;
9. 31th Symposium on Fusion Technology SOFT-2020 (on-line);
10. XLVIII Международных Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2021;
11. International Particle Accelerator Conference IPAC-2021 (on-line);
12. Международная конференция по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-22, Новосибирск, Россия, 2022;
13. 29 Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», г. Судак, Россия, 2022;
14. 30 Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», г. Махачкала, Россия, 2023;
15. Russian Particle Accelerator Conference RuPAC'23, Novosibirsk, Russia, 2023;
16. 30-й Научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии», г. Санкт-Петербург, Россия, 2023;

17. Международная конференция по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-24, Новосибирск, Россия, 2024;

18. 32-й Научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии», г. Санкт-Петербург, Россия, 2025;

и опубликованы в виде 7 статей в сборниках трудов конференций и 10 тезисов докладов.

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования получены в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в 2008-2025 годах. Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 15 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК [1, 2, 24, 28, 44, 46, 47, 63, 81, 87, 89, 90, 93, 95, 97], 7 статей в сборниках трудов конференций и 10 тезисов докладов. **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:**

1. Status and description of the vacuum system of the technological storage ring complex / A.M. Semenov, V.V. Anashin, N. F. Goncharova [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2011. – Vol. 5, No. 6. – P. 1058–1062. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451011110188>. – Дата публикации: 12.01.2011.
2. Status and Description of the Vacuum System of the NSLS-II Booster / A.M. Semenov, V.V. Anashin, S.M. Gurov, and A. A. Krasnov. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2015. – Vol. 79, № 1. – P. 57-61. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873815010268>. – Дата обращения: 10.11.2015.
3. Semenov, A.M. NEG as the main pumpdown facility in a chamber of a helical undulator for coherent electron cooling / A.M. Semenov. – Текст : электронный // Applied Physics. – 2016. – № 5. – P. 65-69. – Дата публикации: 25.07.2016.

4. Krasnov, A.A. Investigation of properties of the non-evaporable titanium-tantalum getters / A.A. Krasnov, A.M. Semenov. – Текст : электронный // Applied Physics. – 2017. – № 4. – P. 94-101. – Дата публикации: 04.07.2017.
5. Dranichnikov, A.N. Research of NEG for application in injectors of hydrogen atoms for installations of thermonuclear synthesis / A.N. Dranichnikov, A.A. Krasnov, A.M. Semenov // Applied Physics. – 2017. – № 2 – P. 73-78. – Дата публикации: 16.02.2016.
6. Vacuum-tight connections for obtaining ultrahigh vacuum in vacuum systems of accelerators with wide-aperture chambers / V. V. Anashin, A. A. Krasnov, A. M. Semenov, S. R. Sharafееva. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2019. – Vol. 62, No. 3. – P. 436–439. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441219030011>. – Дата публикации: 01.11.2018.
7. Anashin, V.V. A study of the gettering characteristics of getter pumps for different gases / V. Anashin, A. Krasnov and A. Semenov. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, iss. 6. – P. 893–897. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441220050255>. – Дата публикации: 30.04.2020.
8. The thermal outgassing rate of materials used in high-vacuum systems / A.V. Burdakov, A.V. Varand, A.A. Krasnov, ... A.M. Semenov [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 65, iss. 3. – P. 519–523. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441222030137>. – Дата публикации: 20.01.2022.
9. Krasnov, A.A. The lumped uhv pumps on based non-evaporable getters / A. A. Krasnov, A. M. Semenov. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No. 5. – P. 568–572. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873822701726>. – Дата публикации: 25.01.2023.
10. Krasnov, A.A. Modern combined ultrahigh vacuum pump for the SRF "SKIF" / A. A. Krasnov, A. M. Semenov. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2024. – Vol. 67, Suppl. 1. – P. S148–S153. – URL: <https://doi.org/10.1134/S002044122470132X>. – Дата публикации: 25.04.2024.

11. Semenov, A.M. Investigation of the thermal outgassing from P43 phosphor and aerogel for use in the vacuum system of the SRF SKIF / A.M. Semenov, A.V. Smirnov. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2024. – Vol. 67, iss. 2. – P. 412–417. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441224700532>. – Дата публикации: 26.06.2023.
12. Krasnov, A.A. The review of modern domestic pumps for ultra-high vacuum in the beam accelerators and nuclear fusion devices / A. A. Krasnov, P. G. Nechaev, A. M. Semenov. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, № 9. – P. 1400-1407. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1062873825712590>. – Дата публикации: 07.10.2025.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science и приравненных к статьям из списка ВАК:

13. Properties of boron carbide ceramics made by various methods for use in ITER / A. Shoshin, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy, ... A. Semenov [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part B. – P. 2007-2010. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.088>. – Дата публикации: 14.03.2019.
14. Qualification of boron carbide ceramics for use in ITER ports / A. Shoshin, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy, ... A. Semenov [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. – Vol. 48, Issue 6. – P. 1474-1478. – URL: <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>. – Дата публикации: 09.09.2019.
15. P43 for manufacturing of large area scintillating screens / A. Semenov, V. Balakin, O. Meshkov, V. Ulianitsky, ... A. Semenov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol.17. – P08020 – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/08/P08020>. – Дата публикации: 18.08.2022.

Личный вклад автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Содержание диссертации и основные положения,

выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведённый в конце автореферата, содержит 15 работ. Авторский вклад соискателя заключается:

в статье 1 – в сборке, прогреве и получении вакуума в Большом накопительном кольце, в снятии и анализе спектра остаточных газов;

в статье 2 – в разработке, изготовлении, сборке и запуске вакуумной системы бустера источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II;

в статье 3 – в разработке концептуального дизайна и изготовлении вакуумной камеры, в выборе геттерного материала, в отладке режима напыления и в измерении химического состава и коэффициента прилипания геттера;

в статье 4 – в выборе геттерного материала, в поиске режима напыления, в создании стенда для проведения вакуумных измерений и в измерении химического состава, коэффициента прилипания геттера;

в статье 5 – в разработке конструкции геттерного насоса, в создании стенда для проведения вакуумных измерений, в выборе методики проведения вакуумных испытаний, в измерении вакуумных свойств насоса, в испытаниях геттерных насосов в инжекторе атомов водорода H⁺;

в статье 6 – в выполненном анализе существующих разборных вакуумных соединений, в выборе типов С-образных уплотнений с гальваническим покрытием, в создании стенда для проведения испытаний, в анализе полученных результатов и во внедрении данных уплотнений в создаваемых ускорителях тяжелых ионов NICA и Collector Ring;

в статье 7 – в создании стенда и методики для измерения газопоглощающих характеристик геттерных насосов, в калибровке датчиков давления, в измерении параметров геттерных насосов, в анализе полученных результатов на основании которых было принято решение о создании геттерных насосов с внутренним нагревателем для накопительного кольца ЦКП «СКИФ»;

в статье 8 – в создании стенда и методики измерения термического газовыделения из материалов, в измерении термического газовыделения из различных материалов в зависимости от длительности откачки и условий подготовки образцов;

в статье 9 – в создании стенда и методики для измерения газопоглощающих характеристик геттерных насосов, в калибровке датчиков давления, в измерении скорости откачки и сорбционной емкости прототипов геттерных насосов для ЦКП «СКИФ», в измерении скорости откачки в зависимости от температуры активации, в анализе полученных результатов, в сравнении отечественных геттерных насосов и зарубежных аналогов;

в статье 10 – в создании оптимальной конструкции комбинированного насоса, объединяющего в себе магниторазрядный насос и насос на базе нераспыляемого геттера, в измерении вакуумных свойств комбинированного насоса по водороду, монооксиду углерода, азоту, метану и аргону, в изучении зависимости равновесного давления от количества поглощенного аргона;

в статье 11 – в анализе спектров остаточных газов, в измерении термического газовыделения из люминофора Р43 и аэрогеля в зависимости от длительности откачки;

в статье 12 – в исследовании вакуумных свойств серийных геттерных насосов для ЦКП «СКИФ» фирмы ООО «Катод» по водороду, монооксиду углерода и дейтерию;

в статье 13 – в создании стенда для проведения вакуумных измерений, в измерении термического газовыделения для карбида бора разных производителей и в снятии спектра остаточных газов, в оценке газовой нагрузки из экваториального порт-плага;

в статье 14 – в предложенной финальной методике очистки керамики, в измерении термического газовыделения для керамических блоков из карбида бора производства ООО «Вириал» и в снятии спектра остаточных газов, в оценке газовой нагрузки из экваториального порта №11;

в статье 15 – в проверке структуры и химического состава чистого порошка Р43 и образцов сцинтилляционных экранов, приготовленных методами детонационного напыления и электрофореза, в измерении светового выхода из люминофора Р43 с применением электронно-лучевой сварки, в вакуумных испытаниях по измерению газовыделения из образцов сцинтилляционных экранов.

В представленных результатах диссертационной работы автор внёс определяющий вклад в постановку задач по созданию магниторазрядных насосов и вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров. Также в ходе работы автором были проведены многочисленные эксперименты и анализ полученных результатов по измерению быстроты действия всех вышеуказанных насосов и сорбционной емкости по различным газам для насосов из нераспыляемых геттеров, а также в изучении термического газовыделения из различных материалов. В постановке отдельных задач и обсуждениях результатов работ активное участие принимали В.В. Анашин, А.А. Краснов, являющиеся соавторами ряда совместных работ. Фамилии других соавторов совместных исследований указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Автор не претендует на описание всей вакуумной техники, а приводит только перспективные материалы и методы для применения в ИЯФ СО РАН.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 214 страницах и включает 91 рисунок, 23 таблицы, 2 приложения и список цитируемой литературы из 101 наименований.

Глава 1. Материалы, используемые в высоковакуумной технике

К числу основных требований относится высокая вакуумная плотность материалов даже при толщинах (десятки миллиметров) и как можно меньшее газовыделение со стенок камеры в диапазоне температур, начиная от комнатной и заканчивая 673 К. По этой же причине стараются меньше применять пористые материалы, за исключением газопоглощающих сорбентов, т.к. у данных материалов площадь реальной поверхности за счет пор в разы и даже на порядки больше их геометрических размеров.

Также серьезным требованием к материалам, применяемым в вакуумной технике, является низкое давление паров. Рекомендуются, чтобы давление паров используемых материалов было на два-три порядка ниже требуемого уровня вакуума при наибольшей рабочей температуре [6].

Выбор того или другого материала определяется технологическими процессами, целесообразностью и экономической составляющей. Например, в ускорителе, работающем в импульсном режиме (бустер синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ»), необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, одним из таких материалов может служить нержавеющая сталь аустенитного класса марки 316L. В этом случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения может меняться 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. С другой стороны, замена нержавеющей стали марки 316L на марку инконель 625 приведет к неоправданному удорожанию стоимости вакуумной системы в разы.

Любой используемый материал рассматривается с учетом получения необходимого уровня вакуума. Так, на любой металлической поверхности

содержатся десятки и даже сотни монослоев молекул H_2O , CO , CO_2 , углеводородов и прочее (в одном монослое - 10^{15} молекул/ см^2). На внутренней поверхности камеры содержится в $3 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^9$ раз больше молекул, чем в объеме при уровне вакуума, равного 10^{-9} Торр. Даже при освобождении одного монослоя молекул в цилиндрической вакуумной камере диаметром 32 мм и длиной 1000 мм приведет к росту давления до $3,1 \cdot 10^{-2}$ Торр.

1.1. Нержавеющая сталь

Нержавеющая сталь входит в тройку материалов чаще всего используемых в вакуумных камерах различных ускорителей заряженных частиц. Из нее изготавливают различные фланцы, элементы диагностики и вакуумные камеры. Примерами использования вакуумных систем являются ВЭПП-3/ВЭПП-4М, ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) [7], Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия) [8], ALBA (Барселона, Испания) [9] и многие другие.

Преимуществами данного материала являются относительная дешевизна, доступность механической обработки (фрезерная и токарная обработки, травление, вакуумный отжиг и др.), возможность изготовления каких угодно сложных форм вакуумных изделий, хорошая свариваемость. Преимущества являются и недостатками, а именно, изготовление сложных форм камер достигается большим количеством сварных швов, что в свою очередь может привести к возникновению нарушения негерметичности изделия; Кроме того, нержавеющая сталь плохо поддается полировке.

Термическая десорбция газов со стенок вакуумной камеры присутствует всегда, и коэффициент термического газовыделения для непрогретой «in-situ» камеры из нержавеющей стали равняется 10^{-11} л·Торр/с/см² через неделю непрерывной откачки; для прогретой – меньше, 10^{-12} л·Торр/с/см². Но в ускорителях заряженных частиц так называемая нетермическая десорбция, вызванная бомбардировкой заряженными частицами, оказывает более

существенное влияние, чем термическая десорбция. Заряженными частицами могут быть [10]:

- ионы после ионизации остаточного газа циркулирующим пучком;
- первичные частицы, «ушедшие» с устойчивой траектории и достигшие стенки вакуумной камеры;
- вторичные электроны, эмитируемые из вакуумных камер и ускоренные поперек камеры группированным пучком;
- фотоны, излучаемые релятивистскими заряженными частицами, при движении в поворотных магнитах.

Данная десорбция может быть значительно больше, чем термическая и определяется как:

$$q_j = \frac{\eta_j \Gamma + \delta_j I_e + \gamma_j I_i}{K}; \quad (1.1)$$

где индекс i обозначает компоненту остаточного газа; $K \approx 3,2 \cdot 10^{19}$ молекул/(л·Торр) – переводной коэффициент, равный количеству молекул в литровом объеме при давлении 1 Торр и комнатной температуре ~ 300 К; q_i - суммарный коэффициент газовыделения, л·Торр/с, Γ - поток фотонов, фотон/с; I_e - поток электронов, электрон/с; I_i - поток ионов, ион/с; η_i - коэффициент фотонно-стимулированной десорбции, молекул/фотон; δ_i - коэффициент электронно-стимулированной десорбции, молекул/электрон; γ_i - коэффициент ионно-стимулированной десорбции, молекул/ион.

Любые виды десорбции объединяет тот факт, что коэффициенты десорбции сильно зависят от предварительной подготовки поверхности. Как видно, например, из рисунка 1.1 коэффициент ионно-стимулированной десорбции для прогретой вакуумной камеры уменьшается более чем в 6 раз по сравнению с непрогретой. Кроме того, десорбции являются функцией от накопленной дозы облучения, т.е. убывают с накопленной дозой.

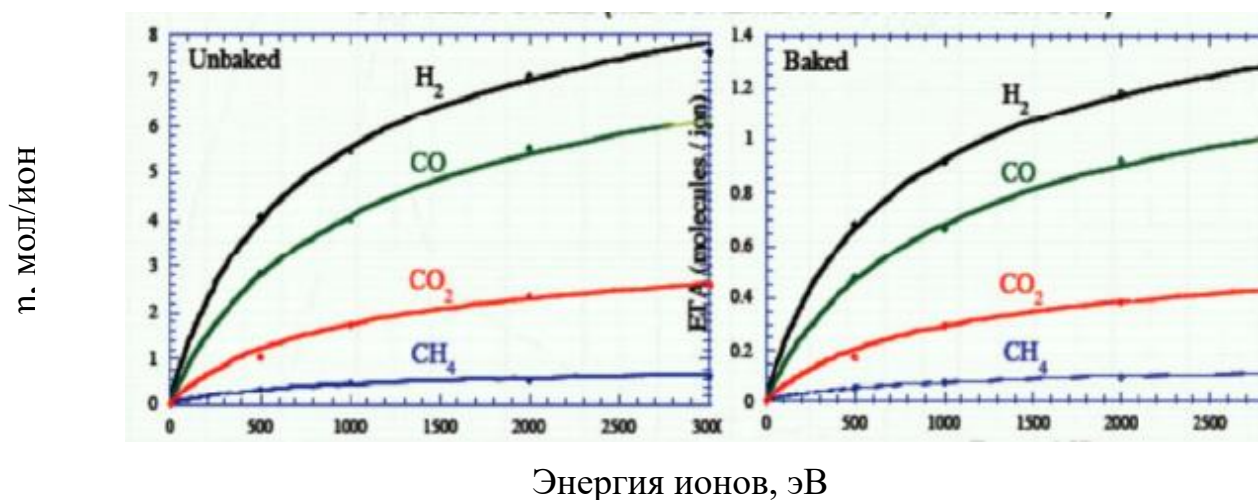


Рисунок 1.1. Ионно-стимулированная десорбция для нержавеющей стали в зависимости от энергии ионов [11]

Так коэффициент фотонно-стимулированной десорбции меняется в зависимости от дозы облучения от 10^{-2} до 10^{-6} молекул/фотон [12], [13], коэффициент электронно-стимулированной десорбции $\delta \sim 10 \cdot \eta$, т.е. от 10^{-1} до 10^{-5} молекул/электрон [14], коэффициент ионно-стимулированной десорбции - от 10^3 до 10^5 молекул/ион [15].

Согласно закону электромагнитной индукции, в проводнике, находящемся в переменном магнитном токе, возбуждается ЭДС индукции. При изменении ведущего магнитного поля, в камере индуцируются вихревые токи, величина которых зависит от скорости изменения ведущего магнитного поля, и удельной проводимости материала камеры. Вихревые токи в свою очередь возбуждают магнитные поля, которые стремятся противодействовать внешнему магнитному полю, что может влиять на динамику пучка заряженных частиц. Величина этих токов зависит от материала и толщины. Величина ЭДС индукции тем больше, чем больше магнитная проницаемость материала вакуумной камеры. Для нержавеющей стали аустенитного класса марки 316LN магнитная проницаемость равняется 1,01 и меньше, но в ходе технологической обработки (сварка, контакт с поверхностью обрабатывающих станков) магнитная проницаемость металла может возрасти. Для восстановления применяется высокотемпературный вакуумный отжиг. Кроме того, для получения сверхвысокого вакуума основным

компонентом остаточного газа является водород. При коэффициенте термического газовыделения с поверхности, равного 10^{-12} л·Торр/с/см², основным источником газовой нагрузки является водород, растворенный в объеме материала, достигающий поверхности путем диффузии. Для уменьшения его количества применяют высокотемпературный вакуумный отжиг, который осуществляется в высокотемпературных вакуумных печах.

Для получения сверхвысокого вакуума и обеспечения долговечности вакуумного оборудования в ИЯФ СО РАН используется следующая процедура очистки для изделий из нержавеющей стали:

1. Удаление мусора путем продувки воздухом под высоким давлением или промывки, протирания тампоном или промывки любым универсальным растворителем;

2. Промывка в ультразвуковой ванне с горячим щелочным обезжиривателем ($\sim 60^\circ\text{C}$) в течение $15 \div 20$ минут;

3. После извлечения из ванны немедленная промывка струей воды под высоким давлением;

4. Промывка в ультразвуковой ванне в чистой горячей деминерализованной воде ($\sim 60^\circ\text{C}$) в течение $15 \div 20$ минут;

4. Сушка чистым сухим горячим воздухом или в печи на воздухе при температуре $\sim 100 \div 150^\circ\text{C}$;

5. Остывание изделий в сухом, непыльном месте.

1.2. Медь и ее сплавы

Эти материалы обладают отличными вакуумными свойствами, такими как низкий коэффициент термического газовыделения (сравнимо с газовыделением из нержавеющей стали) и незначительная газопроницаемость, что в сочетании с великолепными технологическими характеристиками (паяемость, свариваемость и обрабатываемость материала), а также высокая теплопроводность и низкое

электрическое сопротивление сделали медь одним из основных материалов, используемых в вакуумной технике и технологии.

С другой стороны, применение меди накладывает свою особенность, которую необходимо знать и учитывать при конструировании вакуумных систем. Для получения вакуумноплотных сварных швов или для термической обработки (пайке, отжиге) в водородных печах может быть непригодна кислородосодержащая медь (содержание O_2 меньше 0,1%). Это связано с тем, что в процессе газодуговой сварки кислород, содержащийся в меди, начинает «выходить» из расплавленного металла, образуя поры и свищи и, тем самым, не позволяя получить вакуумноплотное соединение.

При пайке или отжиге в водородных печах водород сравнительно легко проникает в толщу кислородосодержащей меди и образует с ней пары воды. Объем этих паров суммарно превышает объем исходных газов, а скорость диффузии паров воды в металл мала. Таким образом, в меди возникают множество микроскопических областей огромного давления, что, в свою очередь, приводит к образованию микротрещин и, соответственно, к потере прочности и вакуумной плотности меди. Данное явление часто называют водородной болезнью меди [16]. Поэтому целесообразно использовать медь с низким содержанием кислорода, такие как медь вакуумной плавки МВ или бескислородная медь М0б. Но даже эти марки меди могут быть насыщены кислородом при неаккуратной обработке (ковке, отжиге, травлении и пр.). Время проникновения кислорода в медь тем меньше, чем выше температура среды. Так в [17] приводятся данные, что кислород проникает на глубину 0,5 мм при температуре 700 °С за 650 ч, а при 950 °С - за 3,9 ч.

Несмотря на это, медь была и остается одним из широко используемых в вакуумной технике материалов. Кроме того, высокая пластичность меди делает ее незаменимой для создания уплотнений для разъемных сверхвысоковакуумных фланцевых соединений, таких как фланцев типа Conflat или COF.

Что касается коэффициентов газовой выделенности, вызванных ионно-, электронно- или фотонно-стимулированными десорбциями, то они также зависят, как и для

нержавеющей стали, от качества поверхности и условий, при которых изделия находились до установки в вакуумный объем, и по своим значениям примерно равны соответствующим коэффициентам для нержавеющей стали [11], [18], [19].

Если «чистая» медь имеет широкое применение в вакууме, то ее сплавы, наоборот, имеют ограниченное применение. Так, бериллиевая бронза БрБ2 используется для изготовления в вакууме пружин и пружинных электрических контактов. Сплавы хром-медь и вольфрам-медь применяются в качестве надежных быстродействующих вакуумных выключателей, способных коммутировать большие токи в электрических сетях высокого напряжения от 6 до 35 кВ в вакуумных дугогасительных камерах [20].

В последнее время широкую популярность получили хромисто-циркониевая медь (CuCrZr) и дисперсно-упрочненная оксидом алюминия медь (например, Glidcop Al-15) для изготовления сосредоточенных приемников синхротронного излучения (crotch absorber) [21], [22], [23].

Процедура очистки изделий из меди:

1. Удаление мусора путем продувки воздухом под высоким давлением или промывки, протирания тампоном или промывки любым универсальным растворителем;
2. Промывка в ультразвуковой ванне с горячим щелочным обезжиривателем при $30 \div 35$ °С в течение $10 \div 30$ минут;
3. После извлечения из ванны немедленная промывка струей воды под высоким давлением;
4. Промывка в ультразвуковой ванне в чистой горячей деминерализованной воде $15 \div 25$ °С в течение $5 \div 30$ минут;
4. Сушка чистым сухим горячим воздухом или в печи на воздухе при температуре $\sim 100 \div 150$ °С;
5. Остывание изделий в сухом, непыльном месте;
6. Осветление:
 - а) Погружение в азотную кислоту при 20 °С;

б) После извлечения из ванны немедленная промывка струей воды под высоким давлением;

в) Сушка чистым сухим горячим воздухом;

7. Пассивация:

а) Погружение в хромовый ангидрид при 20 °С;

б) После извлечения из ванны промывка струей воды под высоким давлением;

8. Сушка чистым сухим горячим воздухом.

1.3. Алюминий и его сплавы

Алюминий обладает множеством достоинств, таких как, высокая электро- и теплопроводность; хорошая свариваемость как «чистого» металла, так и многих его сплавов; хорошая обрабатываемость на фрезерных и токарных станках; высокая химическая стойкость почти ко всем кислотам. К недостаткам можно отнести, что при температуре 150 ÷ 200 °С алюминий и его сплавы теряют свои прочностные свойства. Но несмотря на недостатки, достоинства все же перевешивают и послужили вескими доводами в использовании алюминия в вакуумной технике. А развитие технологии диффузионной сварки алюминия с медью или нержавеющей сталью и метод экструзии сделали во многих случаях алюминий вне всякой конкуренции при изготовлении вакуумных объемов. Так, алюминиевые камеры сложной формы использовались и используются во многих ускорителях заряженных частиц, например, в «Технологическом Накопительном Комплексе» (НИЦ «Курчатовский институт», Зеленоград, Россия) [24], SuperKEKB (КЕК, Цукуба, Япония) [25], ESRF-EBS (ESRF, Гренобль, Франция) [26] и источник 4+ поколения ЦКП «СКИФ» (ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия).

В последнее время началось активное развитие вакуумных изделий, полностью изготовленных из алюминия, например, фланцы для вакуумных камер SuperKEKB [25] или алюминиевые Conflat компоненты и вакуумные камеры [27].

Наилучшими вакуумноплотными свойствами обладают алюминиево-марганцевые (сплав АМц) и алюминиево-магниевые сплавы (АД31 или серии бxxx, например, 6060, 6063 и другие). Сплав АМц, хоть не особо прочен, но хорошо обрабатывается и сваривается, кроме того образует вакуумноплотные соединения с медью или хромоникелиевыми сплавами. Сплавы серии бxxx обладают несомненным достоинством - легко прессуются и их подвергают закалке прямо на прессе с достижением максимально прочного состояния. Магний и кремний являются главными легирующими элементами в алюминиевых сплавах серии бxxx. Магний и кремний входят в соединение силицид магния (Mg_2Si) в соотношении 1,73 к 1. Именно частицы силицида магния делают алюминиевые сплавы бxxx термически упрочняемыми. Уровень прочностных свойств этих алюминиевых сплавов зависит, в основном, от количества, величины и однородности распределения частиц Mg_2Si в алюминии. Это, в свою очередь, зависит от химического состава сплава и эффективности термического упрочнения профилей – закалки и старения.

Другими широко используемыми в вакуумной технике сплавами является дюралюминий, например, Д16. Эти сплавы прочны, но, к сожалению, плохо свариваются и не образуют вакуумноплотные соединения. Поэтому их часто используют в вакуумной технике для изготовления подставок или фланцев для транспортировки изделий.

С точки зрения коэффициентов термического и нетермического газовыделения, алюминий ничем не уступает меди или нержавеющей стали.

Выше были рассмотрены материалы, из которых в большинстве своем изготавливают вакуумные камеры, но существует большое множество материалов, без которых невозможно обойтись для получения высокого вакуума и у которых свое предназначение. Например, геттеры или газопоглотители используются в длинных узкоапертурных камерах для получения высокого вакуума, где нельзя применить стандартные откачные методы, карбид бора является хорошим материалом для подавления нейтронного потока, без

люминофоров, применяемых в качестве одного из методов диагностики пучка, нельзя представить себе ни один ускоритель.

Процедура очистки изделий из алюминия:

1. Удаление мусора путем продувки воздухом под высоким давлением или промывки, протирания тампоном или промывки любым универсальным растворителем;

2. Ультразвуковая мойка в растворителе (трихлорэтилене) при 20 °С в течение 5 минут;

3. Затем в щелочном растворе (pH = 9,7) при 30 ÷ 35 °С в течение 10 ÷ 30 минут;

4. После извлечения из ванны немедленная промывка в деминерализованной воде при температуре 15 ÷ 25 °С в течение от 5 ÷ 30 минут;

5. Сушка на воздухе при 80 °С до полного высыхания;

6. Травление:

а) Погружение в ванну с щелочным раствором (pH = 9,7) при 80 °С;

б) После извлечения немедленная промывка в горячей воде при 80 °С при высоком давлении;

в) Погружение в ванну с азотной кислотой;

г) Промывка холодной водой 15 ÷ 25 °С.

7. Сушка на воздухе при 80 °С до полного высыхания.

В вакуумной технике широко используются не только конструкционные материалы, но и материалы, обладающие другими свойствами.

1.4. Нераспыляемые геттеры

Геттеры или газопоглотители связывают газ за счет хемосорбции. Таким образом, они должны быть химически активны по отношению к остаточным газам, обычно встречающимся в вакууме, таким как H₂, CO, CO₂ и т. д., которые являются основными составляющими спектра остаточных газов.

Геттеры обычно подразделяются на два различных семейства: нераспыляемые геттеры (НГ) и распыляемые геттеры (РГ).

В качестве *распыляемых геттеров* наиболее широкое применение получили барий и титан. Барий обычно сублимируется из сплава $BaAl_4$ при нагревании при ~ 900 °С. Барий используется для откачки вакуумно-изолированных устройств, таких как электронные трубки, и сублимация выполняется непосредственно перед герметизацией.

Титан является наиболее широко используемым испарительным геттером для получения сверхвысокого вакуума. Геттерная пленка обычно получается сублимацией из нити накала (катодов), изготовленных из титановой проволоки, накрученной на подложку из молибдена, тантала или вольфрама. При нагреве подложки до 1500 °С давление паров титана составляет около 10^{-3} Торр. Титановые пленки обеспечивают вероятность прилипания $(1 \div 5) \cdot 10^{-2}$ для водорода и $0,4 \div 0,6$ для монооксида углерода при комнатной температуре. Охлаждение до температуры жидкого азота повышает эти значения до $0,1 \div 0,3$ для водорода и около $1,0$ для монооксида углерода.

При комнатной температуре все газы, за исключением водорода, который диффундирует вглубь геттера, остаются на поверхности, что приводит к прогрессивному снижению скорости откачки (блокировка поверхности). Напротив, водород диффундирует в объем геттера и его скорость откачки не зависит от количества поглощенного газа. С другой стороны, высокие (> 120 кДж/моль) энергии связывания предотвращают десорбцию газов, адсорбированных на поверхности титана при практически допустимых температурах. Водород представляет собой исключение, поскольку его более низкая энергия связывания (~ 80 кДж/моль) допускает десорбцию нагреванием.

Первоначальная скорость откачки пассивированной пленки титана может быть восстановлена дальнейшей сублимацией. Поэтому общая сорбционная емкость очень большая и зависит от доступного количества титана в катоде. Предельное давление геттерного насоса в принципе не ограничено; на практике

же может быть ограничено наличием инертных газов и метана, если адекватная откачка для этих газов не предусмотрена.

- Преимущества РГ из титана: большая скорость откачки, большая сорбционная емкость, неограниченное предельное давление, компактный, недорогой, легко эксплуатируется.

- Недостатки РГ из титана: избирательность при откачке газов, локализация откачки (не очень подходит для вакуумных систем с малой проводимостью, таких как ускорителей заряженных частиц).

Нераспыляемые геттеры изготавливаются из химически активных металлов, таких как титан, цирконий, ванадий и их сплавы, и обычно формируются в виде прессованных или спеченных порошков для сосредоточенных насосов. В качестве НГ чаще всего используются титан, цирконий и ванадий, т.е. металлов VI группы таблицы Менделеева, что обусловлено высокой предельной растворимостью кислорода в этих химических элементах. Это позволяет производить многократные циклы пассивации (вскрытие на атмосферу) / реактивация при температуре активации без заметного уменьшения скорости откачки. Поверхность геттерных порошков из-за их химической активности легко пассивируется некоторыми монослоями оксидов и карбидов в процессе производства. Это позволяет избежать дальнейшей реакции с атмосферными газами и защитить материал при работе на воздухе. После размещения в вакууме пассивирующий слой необходимо удалить, чтобы очистить геттерную поверхность для дальнейшего процесса хемосорбции. Это достигается термической обработкой, называемой «активацией», при которой происходит диффузия химически связанных атомов кислорода, углерода и азота с поверхности в объем газопоглотителя. Эффективность процесса диффузии сильно зависит от состава и микроструктуры геттера. В связи с этим температура и продолжительность активации могут существенно различаться от одного геттерного сплава к другому.

Нераспыляемые геттеры используются, в основном, в тех случаях, когда нежелательно распыление металлов в вакууме, либо отсутствует поверхность для нанесения металлической пленки.

Ключевой особенностью нераспыляемых геттеров является их большая скорость откачки на единицу массы геттера. Как прямое следствие этой особенности, насосы на базе нераспыляемых геттеров, как правило, имеют компактный корпус и могут быть установлены в небольших или ограниченных по площади системах. Насосы НГ также особенно эффективны при откачке водорода, основного остаточного газа в типичных системах сверхвысокого вакуума. Дополнительными особенностями являются малый вес, отсутствие вибрации (отсутствие движущихся частей), предельно низкое энергопотребление, отсутствие технического обслуживания и незначительное влияние магнитного поля (магнитная проницаемость наиболее часто используемых геттеров $<1,001$).

Существенным отличием распыляемых геттеров от нераспыляемых является то, что они распыляются непосредственно в рабочей вакуумной камере, в то время как нераспыляемые - либо заранее нанесены на внутреннюю поверхность камеры, либо располагаются в ней в виде ленты, дисков и т.д. И в том и другом случае требуется лишь активация нераспыляемых геттеров. Кроме того, предельная сорбционная емкость нераспыляемых геттеров зависит от массы геттера, а не от площади его поверхности [28].

Впервые насосы из нераспыляемых геттеров 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 геттера из Zr (84%)–Al (16%) 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 [29]. Активация St'101 осуществлялась пропусканием тока 95 А через полоску в течение 45 минут. Данная величина тока нагревала геттер до температуры 750⁰ С.

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 НГ, 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 180° С [30], [31]. Измерения, выполненные для Ti-Zr-V, показали, что после 52 пассиваций скорость откачки по водороду уменьшается на 50% [32].

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 [32], при этом поглощение водорода происходит в объем пленки геттера благодаря диффузии водорода, а СО и СО₂ образуют слой на поверхности геттера.

Коэффициенты фотонно-стимулированной десорбции для активированного геттера Ti-Zr-V имеют при дозе $\Gamma' = 10^{19}$ фотон/м² 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/м² коэффициенты фотонно-стимулированной десорбции 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 или другого материала [33].

Согласно [34] коэффициент вторичной электронной эмиссии достигается 1,1 уже при температуре активации 200 °С независимо от материала подложки, будь то медь или нержавеющая сталь аустенитного класса.

Нераспыляемые геттеры также существенно (на два-три порядка) уменьшают коэффициенты ионно-стимулированной десорбции в сравнении с нержавеющей сталью, и увеличивают быстроту откачки молекул, тем самым препятствуя, увеличению давления в ускорителях/накопителях многозарядных ионов [35].

Но как бы не был хорош Ti-Zr-V, но его температура активации накладывает некоторые ограничения при использовании в камерах из материалов с низкой температурой плавления, например, из алюминиевых сплавов. В лаборатории ASTeC (Англия) был предложен и исследован геттер с температурой активации

150 °С, состоящий из Ti-Zr-Hf-V, и по своим газопоглощающим характеристикам ничем не уступающий Ti-Zr-V [35].

Кроме этого, не распыляемые геттеры используются в коммерческих вакуумных насосах, обладающих большой сорбционной емкостью по различным газам (H₂, CO, CO₂ и др.). Геттеры в таких насосах получают либо спеканием при высоких температурах в атмосфере инертных газов, либо наносят на подложку (константан) с последующим горячим прессованием. Одной из фирм, занимающихся производством геттеров и сборкой вакуумных насосов, является фирма SAES Getters (Италия) [37].

Нераспыляемые геттеры настолько хорошо изучены и зарекомендовали себя, что современные ускорительные комплексы уже сложно представить без них. Где-то они нанесены по всей длине вакуумных камер, как в MAX-IV (MaxLab, Швеция) [38] или SIRIUS (Бразилия), где-то в качестве сосредоточенных насосов и/или в некоторых узкоапертурных камерах, как на PETRA-III (DESY, Германия) [39], [40] или ESRF (ESFR, Франция) [26].

Механизм активации и основные мотивы выбора геттерного материала, а также конструкции высоковакуумных геттерных насосов для ЦКП «СКИФ» описаны в Главе 5.

1.5. Керамические материалы на основе карбидов

1.5.1. Карбид бора

Одним из предназначений диагностических порт-плагов в ИТЭР является защита от нейтронов установленного внутри них оборудования, а также снижение радиационного фона в зоне элементов реактора, периодически требующих доступа для обслуживающего персонала. ИЯФ СО РАН является одним из разработчиков и изготовителей диагностических портов (экваториальный порт №11, верхних портов №2, 7 и 8).

На рисунках 1.2 представлена общая схема токамака ИТЭР. На рисунке 1.3 показана схема одного из экваториальных порт-плагов в ИТЭР, состоящей из самой системы диагностики плазмы, стальной защиты от нейтронов, подводов воды и защитных кассет с карбидом бора. Из-за ограничения скорости действия насосов и увеличения количества дополнительных материалов в вакуумной части порт-плагов, в ноябре 2020 года в ИТЭР было принято решение, что газовый поток из каждого порт-плага не должен превышать $3,76 \cdot 10^{-4}$ л·Торр /с [41].

Ослабление нейтронного потока от плазмы до около-портового пространства должно составлять семь порядков (100 мкЗв/ч через 12 дней после остановки ИТЭР), а до портовой ячейки с оборудованием - на девять порядков (10 мкЗв/ч через 1 день после остановки ИТЭР) от первоначального значения. На рисунке 1.4 представлены относительная эффективность ослабления потока нейтронов для различных материалов на единицу веса.

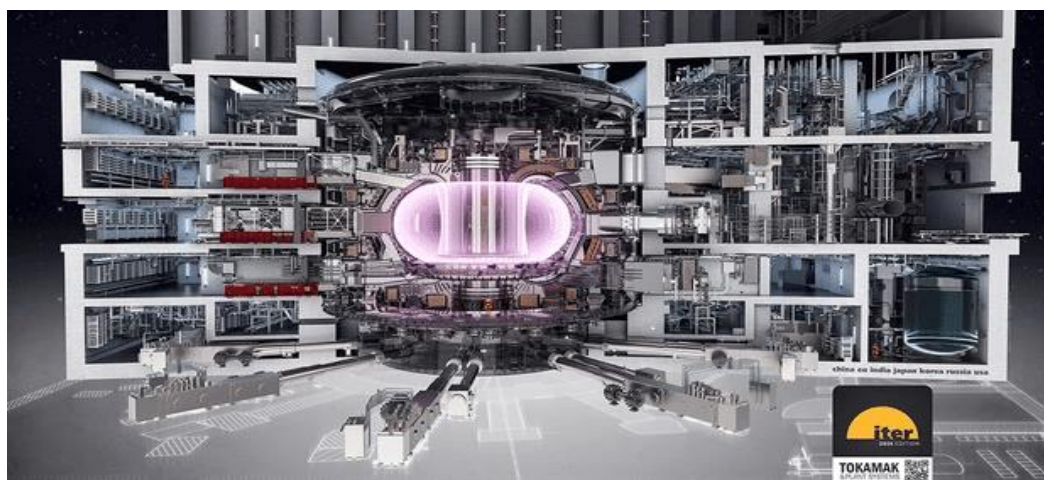


Рисунок 1.2. Общая схема токамака ИТЭР [42]

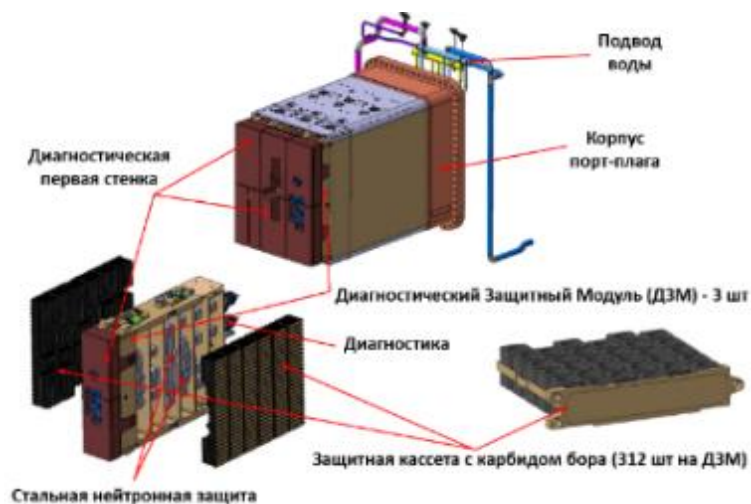


Рисунок 1.3. Схема одного из экваториальных порт-плагов в ИТЭР [2]

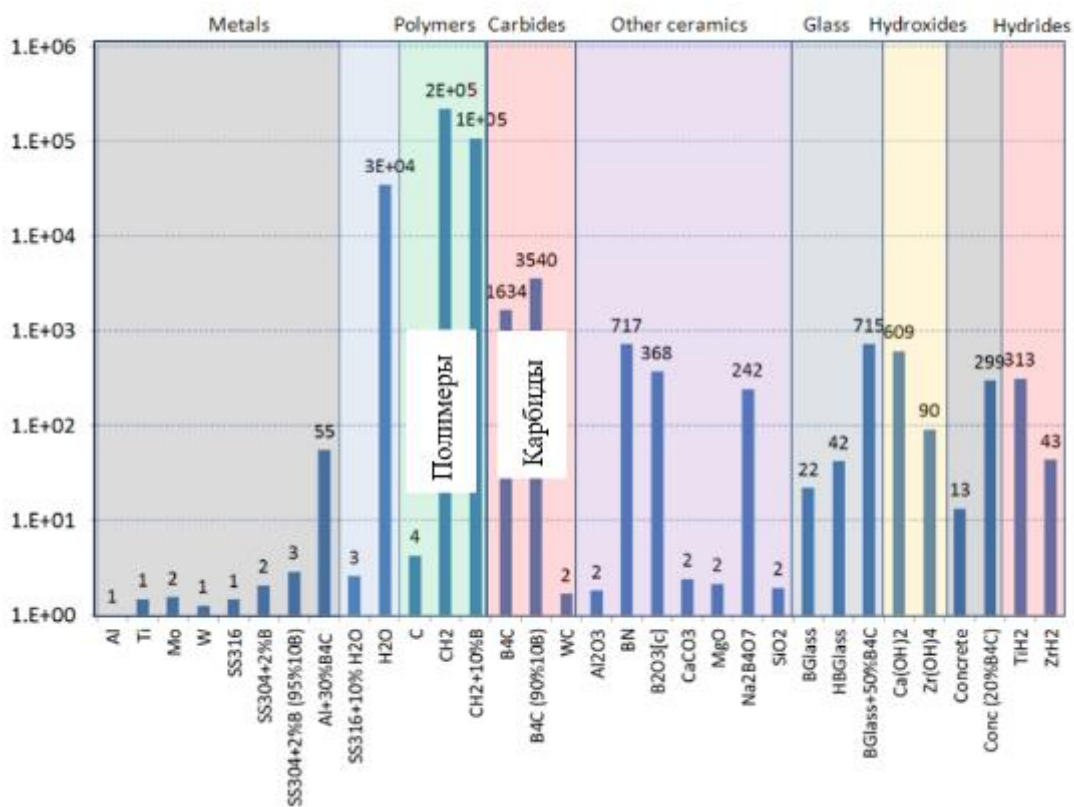


Рисунок 1.4. Относительная эффективность защиты от нейтронов на единицу веса для различных материалов [43]

Из рисунка 1.4 видно, что наибольшей величиной ослабления нейтронов обладают полимеры, но применение их для получения высокого вакуума крайне затруднительно из-за чрезмерного газовыделения из них.

Строгое ограничение на общий вес порта не позволяет заполнить весь порт металлом. Полости внутри порта вместе с прямыми вакуумными трубками диагностических систем, делают невозможным обеспечение требуемых параметров ослабления радиационной дозы для защиты диагностических детекторов и для безопасного нахождения обслуживающего персонала вблизи данного оборудования. Вариант с использованием воды в качестве замедлителя нейтронов был запрещен правилами французского ядерного регулирования. По этой причине было предложено использовать другие материалы, в первую очередь карбид бора, которые первоначально на этапе концептуального проектирования в диагностических портах были ограничены в применении.

Карбид бора - бинарное неорганическое химическое соединение бора с углеродом. Из-за небольшого атомного веса и высокого сечения поглощения тепловых нейтронов, карбид бора может служить эффективным средством для уменьшения потока как для быстрых, так и для тепловых нейтронов. Первоначально предлагалось использовать порошок карбида бора в закрытых объемах, но данный вариант категорически нежелателен с точки зрения вакуумной гигиены, поскольку даже незначительное нарушение вакуумной герметичности хотя бы одного такого объема будет являться «вечным» источником газовой нагрузки. В связи с этим возникла задача понять, пригодна ли керамика из карбида бора для использования в открытом состоянии в портах ИТЭР. Свойства керамики на основе карбида бора сильно зависят от технологии его изготовления.

Для возможного использования карбида бора в портах ИТЭР необходимо подтверждения его пригодности для использования в вакууме и под нейтронными нагрузками, т.е. керамика не должна содержать какие-либо элементы, которые могут быть «активированы» под действием нейтронов, и должна соответствовать требованиям ИТЭР, изложенным в ITER Vacuum Handbook [43].

В соответствии с требованиями ITER Vacuum Handbook термический коэффициент газовой выделенности должен быть меньше 10^{-10} л·мбар/с/см² для водорода и меньше 10^{-12} л·мбар/с/см² для каждого из остальных газов.

Кроме того, предъявляются требования к спектру остаточных газов:

- Сумма пиков (39+41+42+43+45+..., за исключением, 69, 77, 132, 129, 131, 84, 86, 83), деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0,1;
- Сумма пиков (69 и 77), деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0,01;
- Сумма пиков (35 и 37), деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0,01.

Измерения выполнялись на высоковакуумном стенде. Схема установки для измерения коэффициента термического газовыделения для карбида бора показана на рисунке 1.5.

Для того, чтобы исключить влияние газовыделения вакуумного объема, изготовленного из нержавеющей стали, газовая нагрузка из карбида бора должна быть на порядок больше. Термическое газовыделение из нержавеющей стали и карбида бора примерно одинаковы, поэтому для выполнения данного условия необходимо, чтобы площадь газовыделения карбида бора была на порядок больше, чем внутренняя поверхность вакуумного объема, в котором располагается спеченный карбид бора. ООО «Вириал» изготовил 638 образцов керамики размерами 55 мм x 55 мм x 5 мм с суммарной площадью - 4,56 м². Химический состав образцов: карбид бора – 99%, примесей примерно 1% (кислорода – 0,94%, алюминия – 0,04% и кремния – 0,02%).

До проведения испытаний образцы были промыты в этиловом спирте, затем в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне, после чего высушены на воздухе при температуре 120 ÷ 150 °С. Чтобы уменьшить содержание водорода в объеме карбида бора, образцы были прогреты при температуре 1000 °С в высокотемпературной вакуумной печи. Затем образцы размещались в высоковакуумном стенде и прогревались на месте при постоянной вакуумной откачки.

Стенд состоит из трех вакуумных объемов, изготовленных из бесшовных нержавеющей труб марки 304 L. На одном из них установлено вакуумное оборудование (насос, датчик давления, масс-спектрометр). Два других объема

идентичны. В одном (B₄C) располагаются образцы (638 шт) карбида бора, а второй (Reference) необходим, чтобы измерять поток газа из пустого объема в каждый момент времени, которые отделяются от основного объема цельнометаллическими угловыми клапанами VR2 и VR1, соответственно. Объемы «B₄C» и «Reference» одинаковые и подготовлены аналогичным образом.

Измерение давления в системе выполнялось ионизационным датчиком давления с горячим катодом IG (от $2 \cdot 10^{-12}$ мбар до 10^{-4} мбар). Измерение парциальных давлений газов (до 200 а.е.м.) проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Для предотвращения попадания атмосферы в масс-спектрометр RGA во время вскрытия стенда, последний отсекается от основного объема цельнометаллическим угловым клапаном VR3.

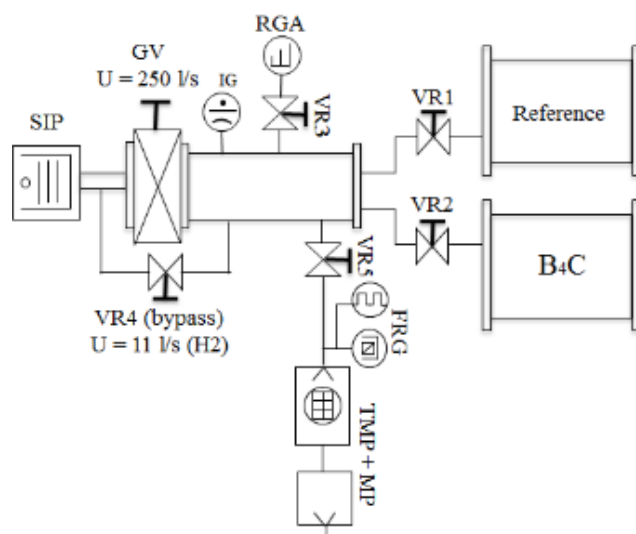


Рисунок 1.5. Стенд для измерения коэффициента термического газовыделения для карбида бора. VR1÷5 - цельнометаллические угловые клапаны; GV - прямопролетный затвор; SIP - комбинированный (магниторазрядный + сублимационный) вакуумный насос; IG - ионизационный датчик давления с горячим катодом типа Extractor; FRG - широкодиапазонный датчик давления от 10^{-9} мбар до 1000 мбар; TMP - турбомолекулярный насос; MP - безмасляный форвакуумный (мембранный) насос [44]

До проведения экспериментов была посчитана методом Монте-Карло в программе MolFlow молекулярная проводимость bypass VR4, равная 11 л/с по водороду, и измерены коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом и масс-спектрометра. После каждого вскрытия стенда на атмосферу проводилась повторная калибровка всех измерителей вакуума.

Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (TMP) и безмасляный мембранный насос (MP) через цельнометаллический угловой клапан VR5. Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления FRG фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani (от 10^{-4} мбар до 1000 мбар) и датчика давления с холодным катодом (от 10^{-9} мбар до 10^{-4} мбар), расположенным на откачной станции. Сверхвысокий вакуум в системе достигался при помощи комбинированного насоса (магниторазрядный насос и титановый сублимационный насос) с суммарной скоростью откачки до 1000 л/с по водороду.

Установка прогревалась резистивным методом, контроль за температурой выполнялся хромель/копель термопарами. Оба тестируемых объема (V_4C и Reference) постоянно оставались нагретыми до температуры 100 °С, кроме тех случаев, когда необходимо было измерить коэффициент термического газовыделения при комнатной температуре. Тогда нагрев выключался и происходило остывание стенда до комнатной температуры.

Методика измерения основана на измерении перепада давлений на элементе с известной проводимостью, в данном случае на bypass. Газовый поток может быть вычислен следующим образом [45]:

$$Q = U \cdot (P_{до} - P_{после}) \cdot K, \quad (1.1)$$

где U – известная молекулярная проводимость трубопровода bypass, равная 11 л/с для водорода и 3 л/с для азота при температуре 100 °С; $P_{до}$ – давление в измерительной системе до закрытия клапана (VR1 или VR2), Торр; $P_{после}$ – давление в измерительной системе после закрытия клапана (VR1 или VR2), Торр; K – коэффициент чувствительности для датчика давления, равный 2,3 для водорода.

Коэффициент термического газовыделения находится как:

$$q = \frac{U \cdot (P_{до} - P_{после}) \cdot K - Q_{reference}}{A_{B_4C}}, \quad (1.2)$$

где $Q_{reference}$ - газовый поток пустого объема из нержавеющей стали, л·Торр/с;
 A_{B_4C} - полная площадь образцов карбида бора, см².

Газовая нагрузка из карбида бора много больше, чем из пустого объема из нержавеющей стали, поэтому формулу (1.2) можно упростить до:

$$q = \frac{U \cdot (P_{до} - P_{после}) \cdot K}{A_{B_4C}}, \quad (1.3)$$

Для определения газового потока отдельных газов использовались парциальные давления, полученные при помощи масс-спектрометра.

Измерения и снятия спектров остаточных газов проводились автором как при температуре 100 °С через каждые 3 месяца, так и при комнатной температуре в течение 2,5 года. Полученные результаты представлены в таблице 1.1 [1], [2], [3]. Погрешность измерения определяется точностью измерения датчиками давления с горячим катодом, равной ±10%.

Спектр остаточных газов карбида бора при 100 °С представлен на рисунке 1.6. Как видно из рисунка 1.6, доминирующим газом является водород, монооксид углерода, угарный газ на два порядка меньше, остальных газов (вода, метан, двуокись углерода) еще меньше. Поэтому можно утверждать, что коэффициент термического газовыделения будет также меньше на два и более порядков, а значит полученные результаты полностью удовлетворяют требованиям ITER Vacuum Handbook.

В таблице 1.2 представлен расчет газовыделения материалов в одном порту ИТЭР через 24 часа и 12 месяцев непрерывной откачки при температуре 100 °С. Из таблицы 1.2. следует, что суммарный газовый поток в экваториальном порту через год непрерывной откачки при температуре нагрева 100 °С будет более, чем в 10 раз меньше, чем того требуется согласно [41].

Таблица 1.1. Коэффициент термического газовыделения для карбида бора при комнатной температуре и при нагреве до 100 °С

Время откачки	q [Торр·л/с/см ²] при 100 °С	q [Торр·л/с/см ²] при 20 °С
5 ч	$7,52 \cdot 10^{-12}$	-
24 ч	$7,26 \cdot 10^{-12}$	-
29 ч	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \cdot 10^{-12}$
8 месяцев	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
12 месяцев	$2,22 \cdot 10^{-12}$	$5,56 \cdot 10^{-14}$
20 месяцев	$2,09 \cdot 10^{-12}$	-
22 месяцев	$1,89 \cdot 10^{-12}$	-
25 месяцев	$1,66 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-14}$
30 месяцев	$1,55 \cdot 10^{-12}$	-

Таблица 1.2. Оценка газовой нагрузки в Экваториальном порт-плаге №11

Материал	Площадь, см ²	24 часа		12 месяцев	
		Коэф. термич. газовыдел., л·Торр/с/см ²	Поток газа, л·Торр/с	Коэф. термич. газовыдел., л·Торр/с/см ²	Поток газа, л·Торр/с
B ₄ C	4,07·10 ⁶	7,52·10 ⁻¹²	3,06·10 ⁻⁵	2,22·10 ⁻¹²	9,04·10 ⁻⁶
316LN-IG	3,7·10 ⁶	7,52·10 ⁻¹²	2,78·10 ⁻⁵	3·10 ⁻¹²	1,11·10 ⁻⁵
Всего	7,77·10 ⁶	-	5,84·10 ⁻⁵	-	2,01·10 ⁻⁵

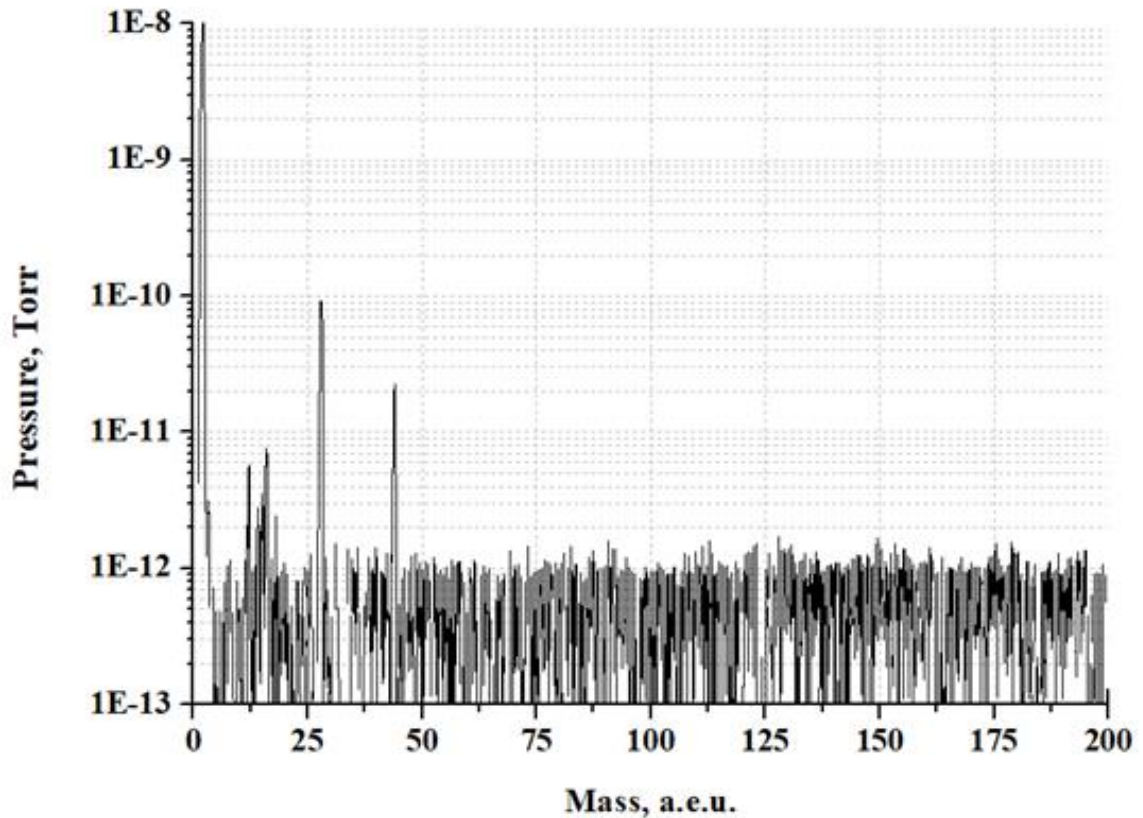


Рисунок 1.6. Спектр остаточных газов для карбида бора после прогрева при 240 °С, остывания до комнатной температуры и последующего нагрева до 100 °С через 24 часа непрерывной откачки [44]

1.5.2. Карбид кремния

Карбид кремния – бинарное неорганическое химическое соединение кремния с углеродом. Применение карбида кремния в науке и технике весьма обширно, начиная от абразива и полупроводников в микроэлектронике и заканчивая ядерной энергетикой. Поскольку карбид кремния является также электропроводящим материалом, то его можно рассматривать для применения в ускорителях заряженных частиц в качестве перспективного материала для вакуумных камер. Для принятия такого решения необходимо измерить коэффициент термического газовыделения из карбида кремния.

Методом реакционного спекания были изготовлены образцы карбида кремния плотностью порядка 3.05 г/см^3 . Габаритные размеры - 50 мм x 50 мм x 10 мм. Количество образцов - 21 шт. Суммарная площадь - 1470 см^2 . Химический состав карбида кремния: SiC – 99,2%, примеси (кислород) – 0,8%.

Образцы после изготовления были отожжены в высокотемпературной печи при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $3 \div 4$ часов на заводе производителя и упакованы в металлизированную вакуумную упаковку. После этого другая очистка образцов до размещения в вакуумном стенде не проводилась.

Схема установки для измерения коэффициента термического газовыделения показана на рисунке 1.7.

Стенд состоит из вакуумного объема, изготовленного из бесшовной нержавеющей трубы марки 304 L, который отделяется от средств откачки цельнометаллическим угловым клапаном VR1.

Измерение давления в системе выполнялось ионизационным датчиком давления с горячим катодом IG (от $2 \cdot 10^{-11}$ мбар до 10^{-4} мбар). Измерение парциальных давлений газов (до 100 а.е.м.) проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США).

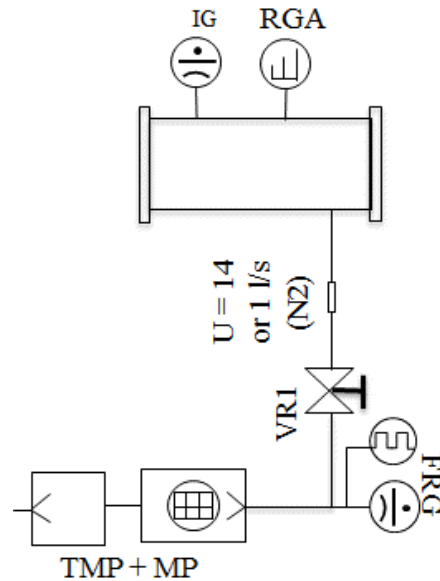


Рисунок 1.7. Схема стенда для измерения коэффициента термического газовыделения. VR1 - цельнометаллические угловые клапаны; IG - ионизационный датчик давления с горячим катодом типа Bayard-Albert; FRG - широкодиапазонный датчик давления от 10^{-10} мбар до 1000 мбар; TMP - турбомолекулярный насос; MP - безмасляный форвакуумный (мембранный) насос [46]

До проведения экспериментов по измерению коэффициента термического газовыделения была установлена диафрагма диаметром 4 мм с известной молекулярной проводимостью, равной 1 л/с по азоту, и измерены коэффициенты чувствительности датчика давления с горячим катодом и масс-спектрометра. После каждого вскрытия на атмосферу проводилась повторная калибровка всех измерителей вакуума. Поскольку даже после прогрева уровень вакуума в системе оставался достаточно низким для того, чтобы снять спектры в режиме вторичного электронного умножителя, то в этом случае диафрагма убиралась, и эффективная молекулярная проводимость откачной системы за счет цельнометаллического углового клапана и гибкого трубопровода равнялась 14 л/с по азоту.

Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (TMP) и безмасляный мембранный насос (MP) через цельнометаллический угловой клапан VR1.

Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления FRG фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani (от 10^{-4} мбар до 1000 мбар) и датчика давления с горячим катодом (от 10^{-10} мбар до 10^{-4} мбар) и расположенным на откачной станции.

Установка прогревалась резистивным методом, контроль за температурой выполнялся термопарами (хромель/копель).

Методика измерения основан на измерении перепада давлений на элементе с известной проводимостью в данном случае на bypass. Газовый поток может быть вычислен, как и в случае для карбида бора:

$$Q = U \cdot (P_c - P_n) \cdot K, \quad (1.4)$$

где U – известная молекулярная проводимость диафрагмы, равная 1 л/с для азоту; P_c – давление в измерительной системе, Торр; P_n – давление на откачной станции, Торр; K – коэффициент чувствительности для датчика давления, равный 1,0 для азота.

Коэффициент термического газовыделения находится как:

$$q = \frac{U \cdot (P_c - P_n) \cdot K}{A}, \quad (1.5)$$

где; A - полная площадь образцов карбида кремния, см².

Термическое газовыделение карбида кремния измерялось при непрерывной откачке до прогрева, после прогрева при температуре 240 °С в течение суток и после выдержки на атмосфере в течение 3 часов с последующей непрерывной откачкой. Результаты коэффициента термического газовыделения от времени приведены на рисунке 1.8. Спектры остаточных газов, выделяемых из карбида кремния до и после прогрева, и после напуска атмосферы, показаны на рисунке 1.9.

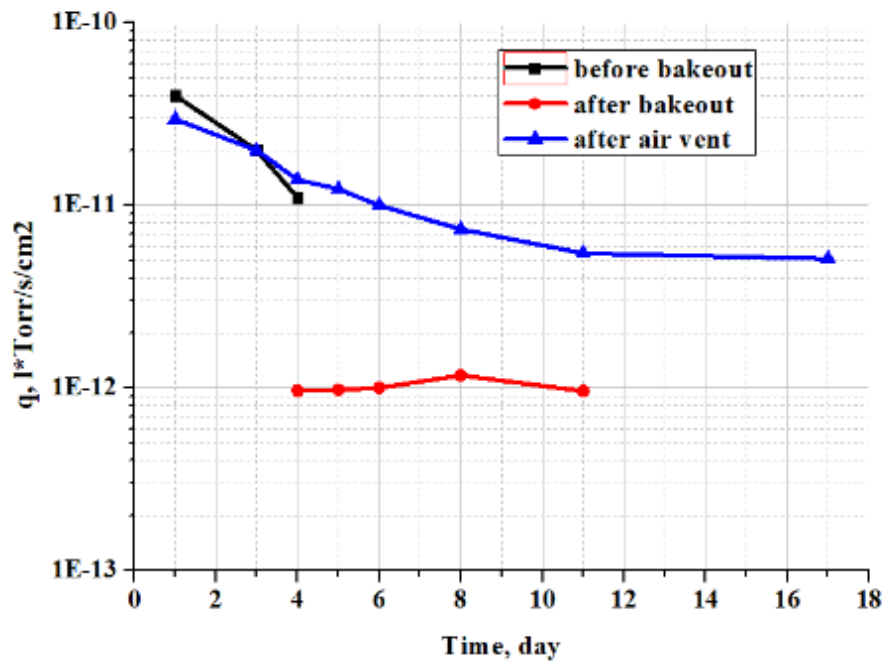


Рисунок 1.8. Результаты термического газовыделения из карбида кремния от времени непрерывной откачки при различных условиях обработки образцов

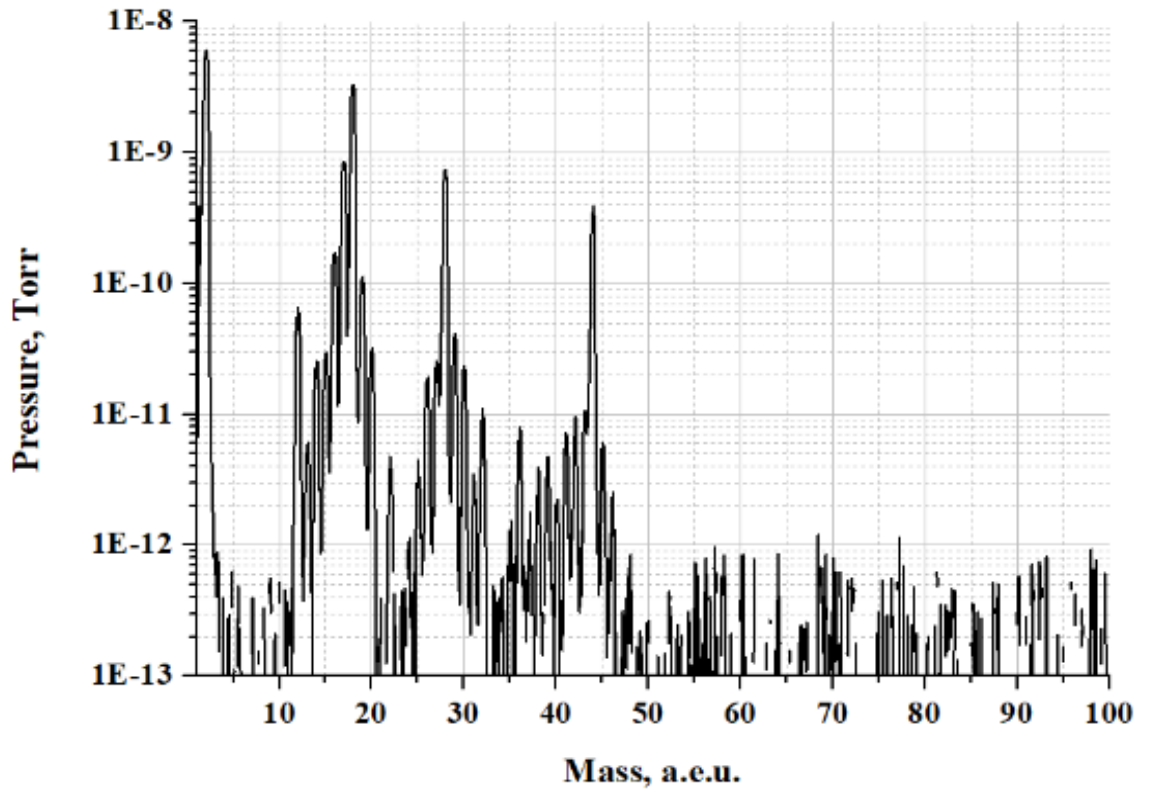


Рисунок 1.9.а) Спектр остаточных газов из карбида кремния до прогрева и после 5 дней непрерывной откачки

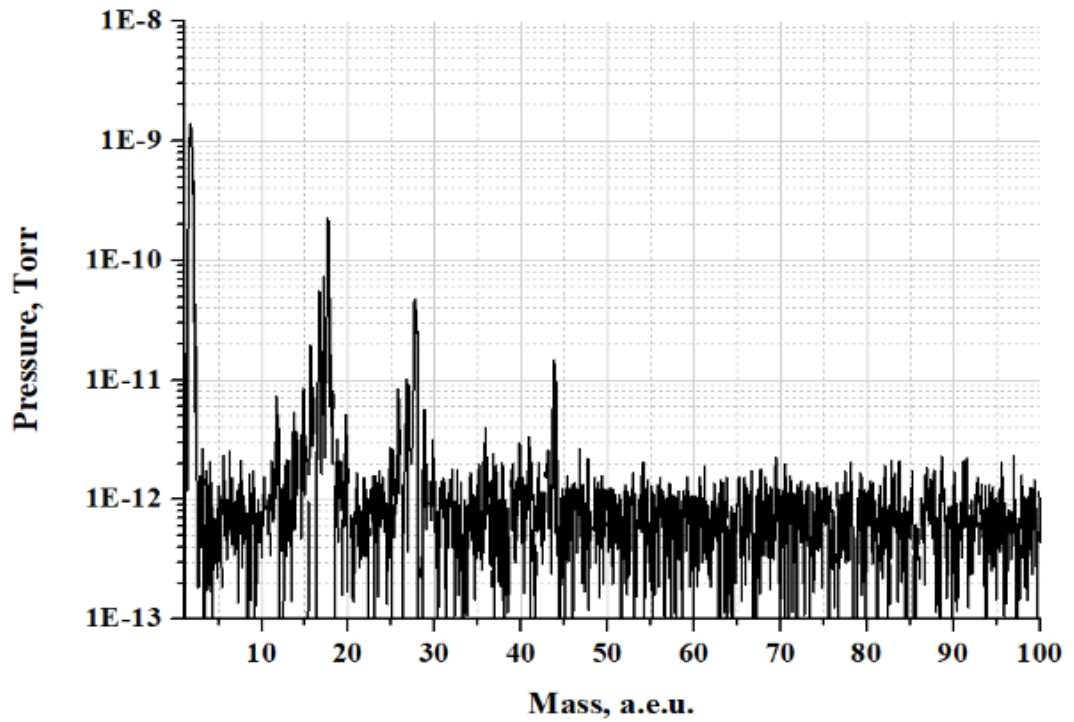


Рисунок 1.9.б) Спектр остаточных газов из карбида кремния после прогрева и после 11 дней непрерывной откачки

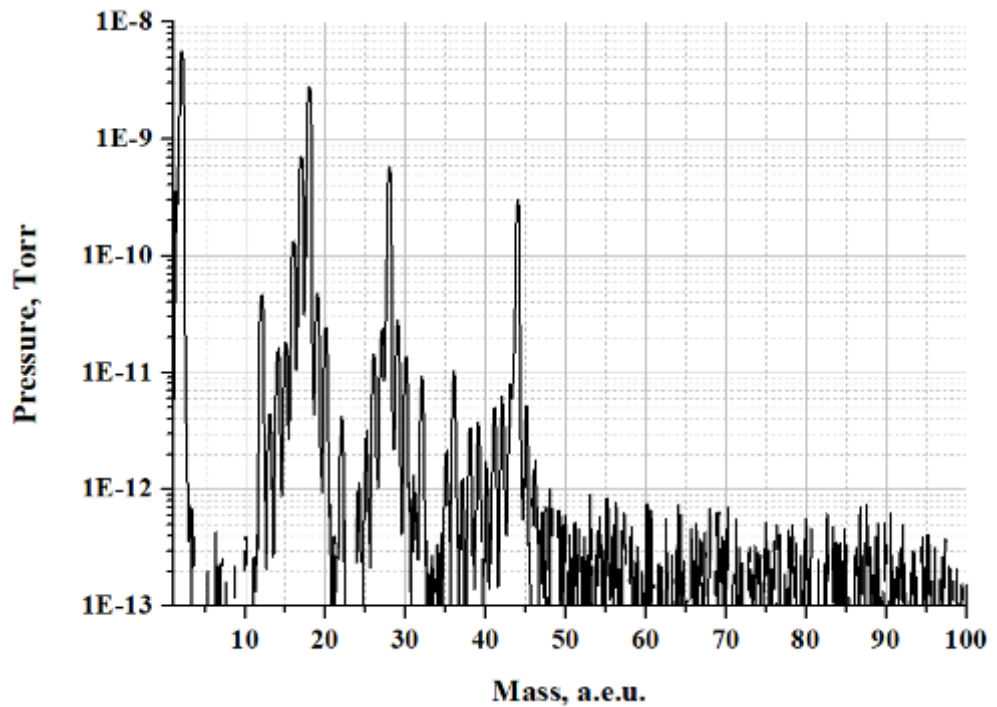


Рисунок 1.9.в) Спектр остаточных газов из карбида кремния после напуска атмосферы и после 4 дней непрерывной откачки

1.6. Сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат

Полиметилметакрилат (ПММА) или органическое стекло относится к классу термопластичных пластмасс, которые при нагревании размягчаются, переходят в вязкотекучее состояние, а при последующем охлаждении затвердевают.

Наиболее важными преимуществами над другими конструкционными материалами (металлами, керамическими соединениями) являются их небольшая плотность, эластичность, высокая механическая прочность, хорошие диэлектрические свойства и высокая химическая стойкость. Однако с точки зрения вакуумной техники данный материал обладает рядом недостатков - низкая термостойкость, высокий коэффициент температурного расширения (как правило на порядок больше, чем у металлов), а из-за того, что в пластмассы добавляют наполнители, отвердители и другие специальные органические добавки, то у них и более высокий коэффициент термического газовыделения в сравнении с металлами.

И все же, благодаря своим хорошим конструкционным свойствам, полиметилметакрилаты нашли свою нишу в вакуумной технике в качестве оптических окон.

В Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН) был изготовлен сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА). В отличие от общепринятых способов изготовления ПММА (литье под давлением, прессование и экструзия [48]) в экспериментах использовался метилметакрилат, который подвергался очистке методом пленочного испарения под пониженным давлением с использованием ротационного испарителя. Инициирование процесса полимеризации осуществлялся потоком ускоренных электронов с использованием импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6. Принцип работы и параметры ускорителя ИЛУ-6 подробно описаны в [49], [50]. Были изготовлены образцы двух типов:

Образцы СВМ-ПММА №1 были получены методом объемной полимеризации в массе при температуре 60 °С в течение 5 суток. Молекулярная масса $M_w \sim 8 \cdot 10^6$ г/моль. Степень полидисперсности примерно равна $3 \div 3,5$.

Образцы СВМ-ПММА №2 были получены методом фронтальной полимеризации при температуре 60 °С в течение 5 суток. $M_w \sim 10^7$ г/моль. Степень полидисперсности имеет такие же значения, что и образец №1. Для сравнения у обычного полиметилметакрилата молярная масса равна 10^6 г/моль.

Молекулярно-массовые характеристики получены методом гелепроникающей хроматографии с использованием хроматографа Knauer (Germany) с рефрактометрическим детектором. Калибровка осуществляла с использованием стандарта Polymethylmethacrylate (PMMA) Calibration Kits (Agilent, USA).

Образцы подвергались механической обработке и полировке. После чего производился отжиг образцов при 110 °С в течение 1 суток на воздухе.

Для изучения коэффициента термического газовыделения были взяты следующие материалы: СВМ-ПММА образец №1 (отожженный и неотжженный), СВМ-ПММА образец №2 и обычный ПММА марки Ст-1. В качестве эталона принят коэффициент термического газовыделения из нержавеющей стали. Перед испытаниями вакуумный объем был тщательно вымыт по следующей процедуре:

- Обезжиривание проводилось тщательной протиркой салфетками из отбеленной бязи, смоченными бензином;
- Для удаления механических и химических загрязнений применялась ультразвуковая мойка в щелочном растворе «Алмесо 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.

Далее измерялся коэффициент термического газовыделения пустого вакуумного объема после 24 часов непрерывной откачки при комнатной температуре. Измерения газовыделения проводились на стенде, применяемом для изучения вакуумных свойств карбида кремния. Для каждого из типов полиметилметакрилата, размещенного в вакуумном объеме, проводились измерения газовыделения последовательно и независимо друг от друга. Полученные результаты представлены в таблице 1.3.

Как видно из таблицы 1.3 СВМ-ПММА (образец №1), подвергнутый очистке в ультразвуковой ванне с трихлорэтиленом, обладает наибольшим коэффициентом газовыделения. Кроме того, трихлорэтилен приводит к растворению полиметилметакрилата. С точки зрения вакуумной техники наиболее перспективным материалом является СВМ-ПММА, полученный методом фронтальной полимеризации. Поэтому было важно изучить, как изменится коэффициент газовыделения из данного материала после прогрева под вакуумом при температуре образца 110 °С в течение 72 часов с последующим остыванием до комнатной температуры, а также после воздействия атмосферного давления в течение 2 ÷ 3 часов. В таблице 1.4 представлены результаты измерения коэффициента термического газовыделения из СВМ-ПММА, полученного методом фронтальной полимеризации.

Наименьшим коэффициентом термического газовыделения обладает СВМ-ПММА после прогрева под вакуумом. Но даже после воздействия атмосферным давлением коэффициент газовыделения достигает без прогрева менее, чем за неделю, почти тех же значений, что и после прогрева.

Для выбора того или иного материала с целью применения его в ускорительной технике необходимо изучение спектра остаточных газов. На рисунке 1.10 представлен спектр остаточных газов СВМ-ПММА после прогрева.

Наличие большого количества углеводородов, а также кислорода не отменяет того факта, что данный СВМ-ПММА может использоваться в вакуумной технике в качестве оптических окон или в качестве изоляционного материала, правда в

системах низкого или среднего вакуума и при наличии вакуумных насосов с быстротой откачки сотни или даже тысячи литров в секунду.

Таблица 1.3. Коэффициент термического газовыделения для полиметилметакрилатов, полученных методом объемной полимеризации и марки Ст-1 при комнатной температуре

Время	q, л·мбар/(с·см ²)				
	Нержав. сталь 316L	ПММА марки Ст-1	СВМ-ПММА (трихлорэтилен) Образец №1	СВМ-ПММА (неотожж) Образец №1	СВМ-ПММА (отожж) Образец №1
1 день	2,3E-10	3,0E-6	6,0E-6	2,5E-6	1,8E-6
2 дня	-	2,0E-6	3,5E-6	1,5E-6	1,0E-6

Следующим шагом было создание надежного фланцевого соединения из этой пластмассы. С этой целью были изготовлены два фланца: один из нержавеющей стали аустенитной марки 304L, другой - из СВМ-ПММА, полученного методом фронтальной полимеризации. В качестве уплотнителя был выбран индий, фланцевое соединение выполнено согласно СТП.001-72 [51]. На рисунке 1.11. показана 3D модель фланцевого соединения с индиевым уплотнителем, а также фотография экспериментального стенда с установленным на нем фланцевым соединением.

Проверка вакуумной герметичности фланцевого соединения осуществлялась методом напуска пробного газа (гелия). Уровень гелия контролировался при помощи гелиевого течеискателя ASM310 фирмы Pfeiffer Vacuum (Германия).

Таблица 1.4. Коэффициент термического газовыделения для полиметилметакрилатов, полученных методом фронтальной полимеризации при комнатной температуре (образец №2, отожженный)

Время	q , л·мбар / (с·см ²)
Откачка	
1 день	7,8E-7
2 дня	4,4E-7
3 дня	3,3E-7
4 дня	2,7E-7
7 дней	2,0E-7
8 дней	1,6E-7
11 дней	1,2E-7
После прогрева до температуры 110°C в течение 72 ч с последующим остыванием до комнатной температуры	
1 день	1,6E-8
2 дня	1,46E-8
3 дня	1,34e-8
После воздействия атмосферного давления в течение 2–3 ч	
1 день	1,17E-7
4 дня	2,75E-8

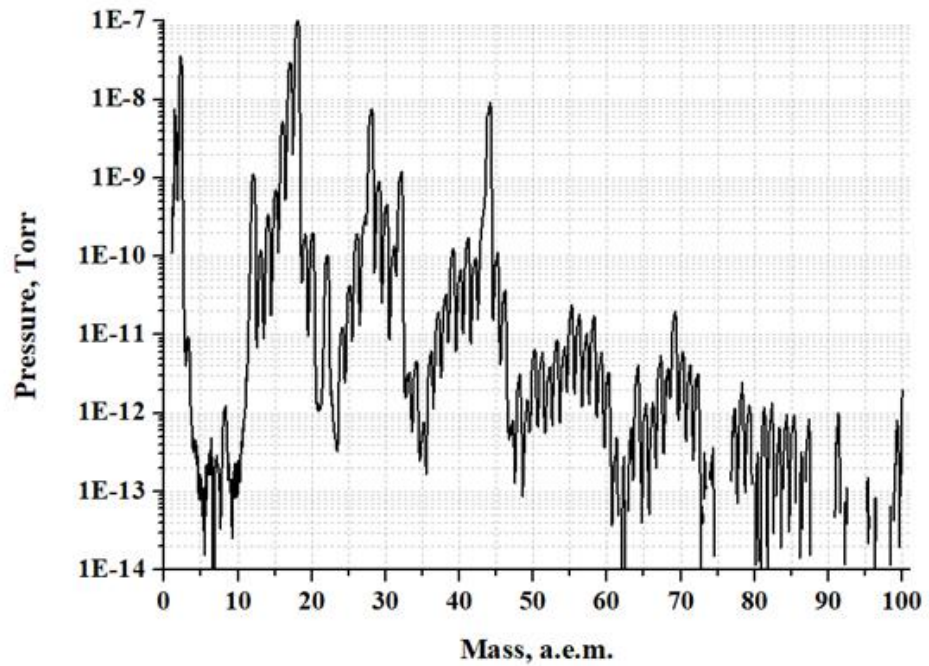


Рисунок 1.10. Спектр остаточных газов СВМ-ПММА, полученный методом фронтальной полимеризации, через 3 дня после прогрева при 110 °С и последующего остывания до RT

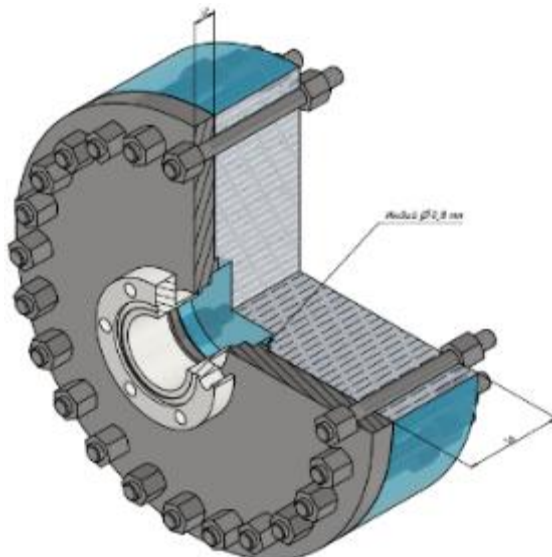


Рисунок 1.11. а). 3D модель фланцевого соединения из нержавеющей стали и СВМ-ПММА с индиевым уплотнителем



Рисунок 1.11 б). Фотография экспериментального стенда с размещенным на нем фланцевым соединением

1.7. Сцинтилляторы

Для получения двумерного поперечного профиля пучка используются сцинтилляционные экраны. Измерения профиля важны для управления пространственным распределением пучка частиц, а также согласования различных участков ускорителя. Сцинтилляционные материалы должны соответствовать нескольким требованиям [52], таким как динамический диапазон и линейность между потоками падающих частиц и световым потоком; радиационная стойкость для предотвращения повреждений; доступность различных размеров при умеренных затратах.

Как видно из графика (рисунок 1.12) и таблицы 1.5, иллюстрирующих зависимость светового выхода люминофора от падающего потока частиц, для

наиболее распространенных сцинтилляционных материалов, наилучшим вариантом с точки зрения динамического диапазона и линейности между потоками падающих частиц и световым потоком являются иодид цезия, легированный таллием. Но, несмотря на ряд преимуществ, данный материал достаточно дорог, и в случае ионных ускорителей, таких как Collector Ring (FAIR, Дармштадт, Германия) с рабочей апертурой порядка 480 мм x 260 мм [53], изготовление сцинтилляционного экрана таких размеров с однородным покрытием иодида цезия, легированного таллием, экономически затратно, поскольку не каждый производитель готов гарантировать качество покрытия. Поэтому для визуализации пучка был предложен люминофор P43 (оксисульфид гадолиния, легированный тербием или $Gd_2O_2S:Td$), хоть он и уступает в эффективности в сравнении с иодидом цезия, но зато более дешев и проще в изготовлении и нанесении.

Оксисульфид гадолиния, легированный тербием, известен как высококачественный порошковый люминофор с энергетической эффективностью эмиссии в видимой области спектра до 0,2. Кроме того, он имеет высокую плотность 7,34 г/см³ и не слишком большое время затухания порядка 0,6 мс [54]. Эти свойства делают формирование сцинтилляторов из этого порошкового люминофора привлекательным. Как показывают исследования, качество сцинтилляционного экрана сильно зависит от условий нанесения люминофора: температуры, давления, типа активатора, термообработки и многое другое. Как было найдено в работе [55], световой выход P43 уменьшается на 10 ÷ 15 % от первоначального значения после воздействия дозы радиации 140 Гр, но все равно превышает многие другие сцинтилляторы.

В Институте общей физики Российской академии наук (ИОФ РАН) был изготовлен образец сцинтилляционного экрана размерами 270 мм x 480 мм. Экраны изготавливались нанесением люминофора P43 на металлическую подложку (сталь 12X18H9T) методом электрофоретического осаждения. Этот метод дает повышенную термическую стойкость экранов, повышенную плотность упаковки зерен люминофора и лучшую их адгезию к подложке.

Для нанесения люминофора на подложку использовалась его мелкая фракция (0,5 – 3 мкм). Такая фракция отбиралась в особо чистом изопропиловом спирте в центробежном поле на центрифуге после предварительного озвучивания суспензии ультразвуковым генератором. Гранулометрический состав мелкой фракции рабочей суспензии люминофора Р43 определялся методом седиментационного анализа на торсионных весах марки «Waga torsyjna-wt».

Для обеспечения высокого положительного заряда на частицах люминофора и надежного сухого прилипания люминофора к подложке в изопропиловую суспензию вводилась особо чистая смесь азотнокислых солей алюминия $Al(NO_3)_3$ и лантана $LaNO_3$. Заключительным этапом подготовки рабочей суспензии люминофора являлась ее подзарядка в течение 30 мин и при токе 18 мА в установке для осаждения.

Ввиду больших размеров люминесцентных экранов (площадь порядка 700 см²) люминофор осаждался на подложку в специально разработанной и изготовленной электрофоретической ванне прямоугольной формы, изготовленной из винипласта. Пластина из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т являлась анодом, катодом служила сама металлическая подложка. Для ее изоляции с обратной стороны устанавливалась экранирующая пластина из оргстекла.

Таблица 1.5. Основные параметры сцинтилляционных материалов

Материал	Мах длины волны, нм	Плотность, г/см ³	Выход фотонов, фот/кэВ	Время засветки, нс	Радиационная стойкость, Гр*
YAG:Ce	550	4.55	35	70	-
LuAG:Ce	500-545	6.73	20	60	10 ⁴ -10 ⁵
YAP:Ce	370	5.37	25	25	-
LYSO:Ce	420	7.1	32	41	10 ⁴
GSO:Ce	440	6.71	8-10	30-60	10 ⁶ [56]

Продолжение таблицы 1.5

Материал	Мах длины волны, нм	Плотность, г/см ³	Выход фотонов, фот/кэВ	Время засветки, нс	Радиационная стойкость, Гр*
CsI:Tl	565	4.51	54	1000	4*10 ³ **
BGO	480	7.13	8-10	300	10
NaI:Tl	410	3.67	70	230	10
CsI:Na	420	4.51	66	630	-
CsI	315	4.51	4	16	10 ⁴
CdWO ₄	470	7.9	25	20000	10 ⁴
P43	513	7.34	10	4000	7*** [55]
BC400	400	1.03	10	2-4	10 ⁶ **** [56]
EJ200	420	1.023	10	2-3	10 ⁶ **** [56]
EJ260	490	1.023	9	9.2	10 ⁶ **** [56]

* - доза, полученная сцинтиллятором, при которой его оптические свойства не изменяются;

** - световой поток по сравнению с исходным падает на 35%;

*** - при дозе 7 Грей световой поток с P43 падает на 1%;

**** - значительная деградация свойств проявляется при дозе облучения порядка 10⁷ Грэй. (20% потери светового потока при 10⁷ Грея, 40% - 3·10⁷, 80% - 10⁸).

Электропитание электрофоретической ванны осуществлялось от стабилизированного источника постоянного тока. Качественные слои люминофора получались при напряженности поля ~ 95 В/см и плотностях тока в диапазоне от 1,2 до 1,5 мА/см². Суспензия люминофора требовала дополнительной специальной зарядки током перед осаждением на подложку. Режим осаждения для достижения оптимальной толщины слоя (1,2 – 1,4 мг/см²)

[46], [47]. Затем экранная пластина высушивалась, и люминофор закреплялся 10% силикатом калия.

Контроль качества покрытия осуществлялся путем измерения нагрузки люминофорного покрытия (аналитические весы), которая составила величину 1,2 – 1,4 мг/см², а также на установке с ультрафиолетовым возбуждением с помощью ртутной лампы.

Образец был помещен в измерительный объем стенда, применяемый для исследования карбида кремния. Никакая дополнительная процедура очистки к образцу с люминофором не применялась, но измерение коэффициента термического газовыделения выполнялось до и после каждого прогрева при 140 °С в течение 24 часов, а также после воздействия атмосферного давления. Результаты представлены в таблице 1.6.

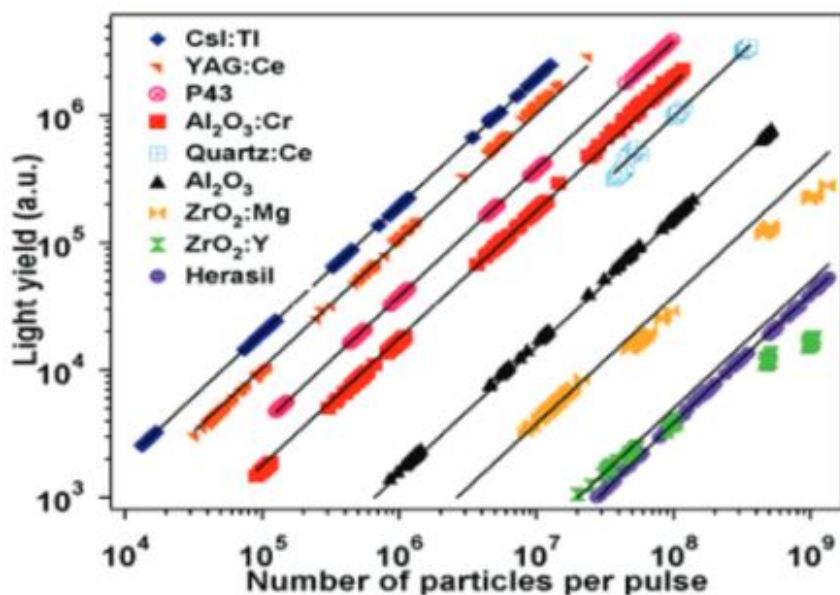


Рисунок 1.12. Зависимость светового выхода от падающего числа частиц для различных сцинтилляционных материалов [55]

Как видно из таблицы 1.6, каждый последующий прогрев уменьшает коэффициент газовыделения даже после напуска атмосферного давления, при этом после напуска атмосферного давления коэффициент термодесорбции меньше на порядок в сравнении с первоначальными измерениями. Объяснение

этому кроется в том, что до того, как начались вакуумные испытания, образец находился без вакуумной «гигиены» под атмосферным давлением около года. В нашем же случае образец находился не более 24 часов под атмосферой до последующей откачки.

Поскольку в состав люминофора Р43 входит сера, наличие которой в вакуумной камере недопустимо ни при каких условиях, то было важно изучить спектр остаточных газов до и после прогрева. На рисунке 1.13. показаны спектры остаточного газа сцинтиллятора марки Р43 до и после прогрева при 140 °С в течение 24 часов, с последующим остыванием до комнатной температуры. Как видно из спектров, пик 32 а.е.м. в значительном количестве присутствует до прогрева, после прогрева данной массы почти нет.

Если предположить, что это сера, то маловероятно ее восстановление в чистом виде из люминофора Р43. Если же это разложение:

- из SO_2 , но в таком случае должна доминировать 64 а.е.м., а ее нет совсем;
- из H_2S – должна доминировать 34 а.е.м., но она намного меньше 32 а.е.м.

Если же это кислород, то в чистом виде его не бывает, если нет виртуальных течей. Косвенным подтверждением может служить то, что кислород дает пики 16, 34 и 33 а.е.м. К сожалению, вычленить составляющую от кислорода в 16 а.е.м. почти невозможно, т.к. пик 16 а.е.м. включает и метан, и атомарный кислород из угарного газа и из углекислого газа и т.д., которые всегда в том или другом количестве присутствуют в спектре остаточных газов. Пик 33 а.е.м. очень мал по сравнению с пиком 32 а.е.м., а вот 34 а.е.м. должно быть порядка 0,5 % от пика 32 а.е.м., что соответствует нашему спектру.

Еще одним способом изучения спектра остаточного газа было наблюдение за величиной 32 а.е.м. в зависимости от температуры нагрева люминофора. Для этой цели был создан внутренний нагреватель из проволоки циркония диаметром 0,43 мм и длиной 2 м (электрическое сопротивление составляло 6,7 Ом при 20 °С), намотанной на керамическую трубку диаметром 4 мм для избежания провисания нагревателя. Данный нагреватель располагался на расстоянии 10 ÷ 15 мм от обратной стороны люминофора. Контроль за температурой осуществлялся при

помощи термопары хромель-копель, закрепленной на люминофоре. Максимальная температура нагрева люминофора, равная 170 °С, была достигнута при токе 4,0 А и мощности 240 Вт.

Было обнаружено, что при увеличении мощности нагрева, а, следовательно, и увеличении температуры на люминофоре пик 32 а.е.м. также увеличивается, но при длительной выдержке при данной температуре происходит заметное уменьшение величины пика 32 а.е.м. Таким образом, можно утверждать, что основной вклад в пик 32 а.е.м. определяется наличием кислорода, а не серы. Изготовление люминофоров Р43 методом электрофоретического осаждения возможно для применения в высоком вакууме.

Таблица 1.6. Измеренный коэффициент термического газовыделения для сцинтиллятора Р43

Время	q , л*мбар/(с*см ²)
Откачка №1	
24 ч	4,7E-8
48 ч	1,33E-8
72 ч	9,3E-9
23 дня	7,4E-10
После прогрева №1	
72 ч	1,0E-10
Напуск атмосферы. Откачка №2	
24 ч	1,1E-8
72 ч	2,6E-9

Продолжение таблицы 1.6

Время	q , л*мбар/(с*см ²)
После прогрева №2	
3 дня	1,35E-11
4 дня	2,1E-12
5 дней	1,8E-12
Напуск атмосферы. Откачка №3	
24 ч	2,4E-10
48 ч	4,8E-10
72 ч	2,5E-10
7 дней	1,6E-11

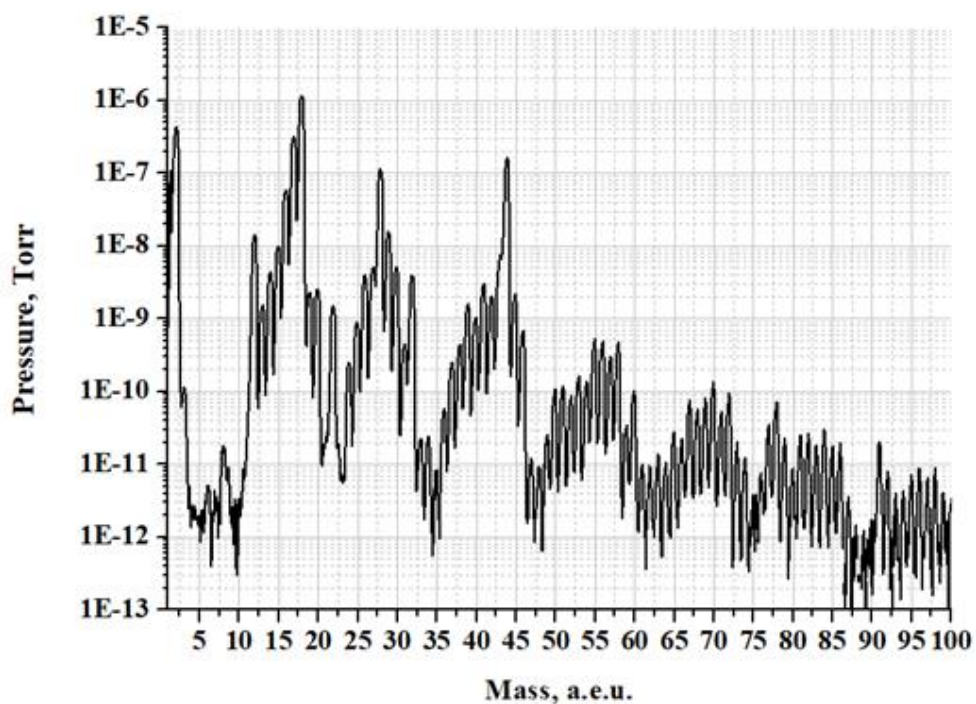


Рисунок 1.13.а) Спектр остаточных газов сцинтиллятора Р43 до прогрева через 24 часа непрерывной откачки [46]

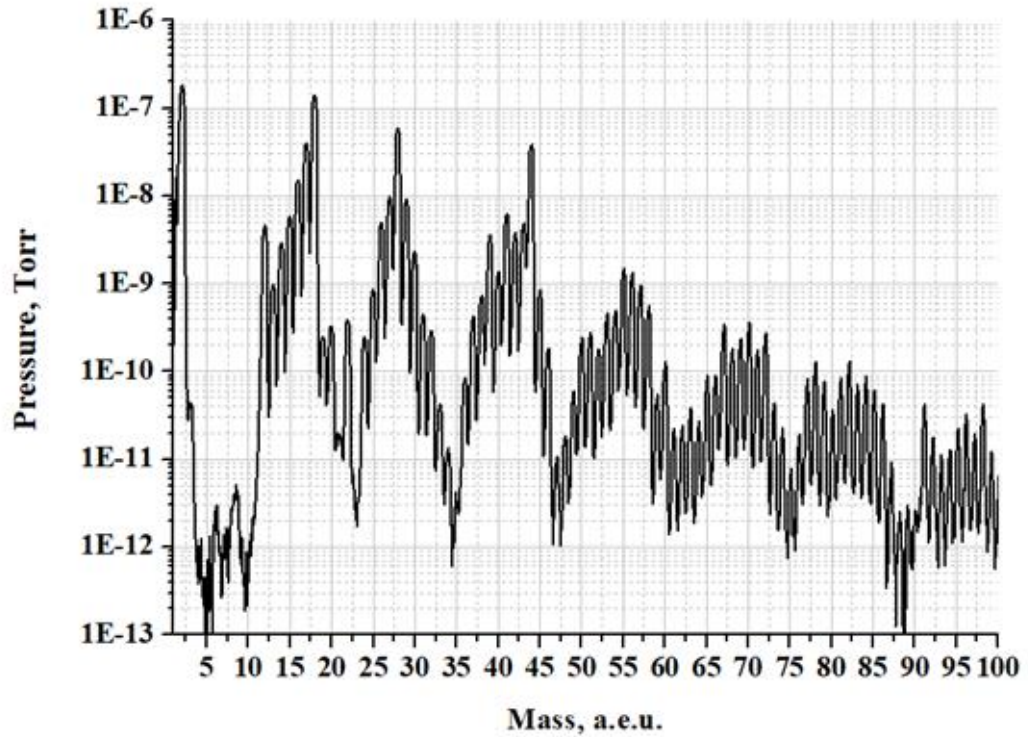


Рисунок 1.13.б) Спектр остаточных газов сцинтиллятора Р43 до прогрева через 23 дня после старта откачки

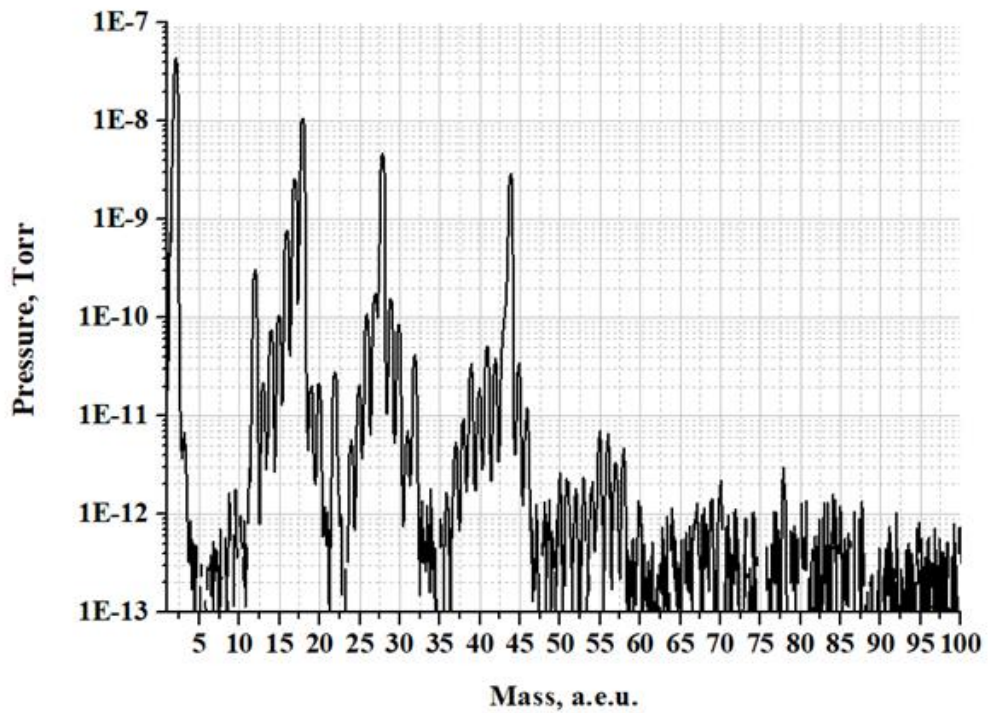


Рисунок 1.13.в) Спектр остаточных газов сцинтиллятора Р43 после прогрева через 5 дней после остывания до RT [46]

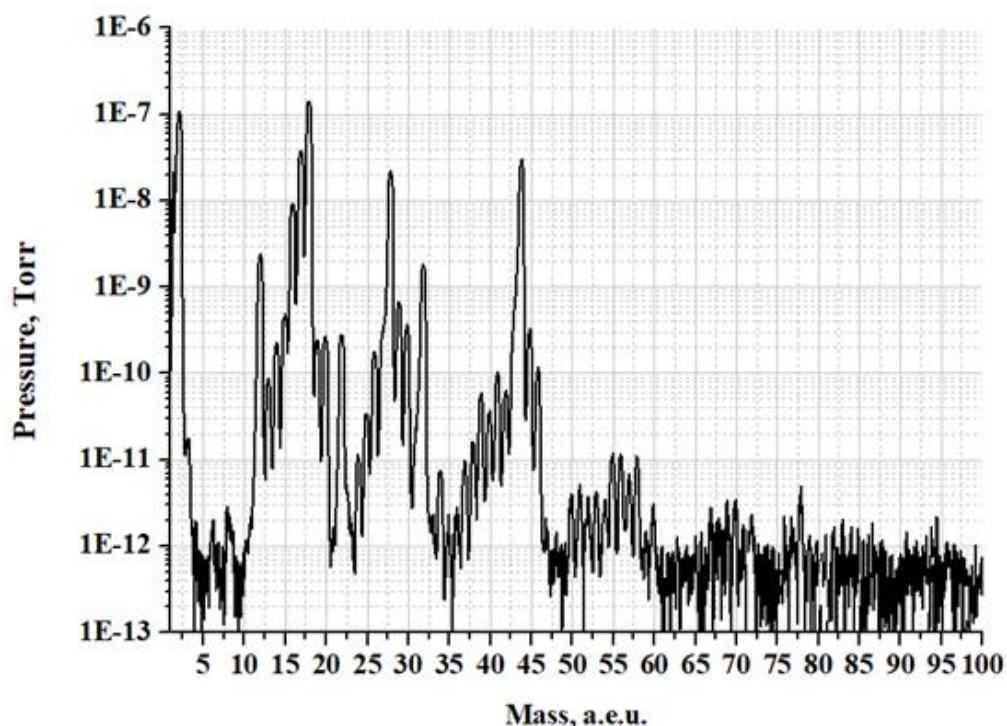


Рисунок 1.13.г) Спектр остаточных газов сцинтиллятора Р43 после напуска атмосферы, непрерывная откачка в течение 5 дней

1.8 Аэрогель

Различные методы диагностики используются для исследования характеристик электронного пучка. Одними из важных параметров измерения являются длина сгустка и продольное фазовое пространство с временным разрешением 2 пс и 0,2 пс, соответственно, ограниченные стрик-камерой, являющейся основным инструментом для измерения.

Большая часть света, создаваемого электронным пучком, попадающей или проникающей в разные радиаторы, должна быть передана по оптической линии передачи на фотокатод стрик-камеры с минимальным разбросом по времени и минимальными потерями света. В качестве радиаторов черенковского света применяют кварц и различные аэрогели. Одним из таких аэрогелей, получившим широкое применение в диагностике пучка, является вспененный диоксид кремния, состоящий из совокупности частиц и пор. Размеры пор настолько малы,

что рассеивают очень мало света, поэтому аэрогели очень прозрачны в видимом диапазоне длин волн. Низкий коэффициент преломления аэрогеля, $n < 1,05$, улучшает временное разрешение диагностики [57].

Поскольку аэрогель имеет низкую плотность, но высокую пористость ($90 \div 99,9\%$), то его площадь внутренней поверхности достигает $100 - 2000 \text{ м}^2/\text{г}$. Поэтому важно определить коэффициент термического газовыделения и спектр остаточных газов для этого материала в зависимости от длительности откачки и предварительных условий подготовки образцов.

В Институте катализа СО РАН были изготовлены образцы аэрогеля с коэффициентом преломления $n = 1,03 \div 1,05$) и геометрической площадью порядка 86 см^2 .

Стенд для измерения газовыделения из аэрогеля применялся аналогичный для измерения карбида кремния. На рисунках 1.14 и 1.15 представлены результаты термического газовыделения и спектр остаточных газов, соответственно [46].

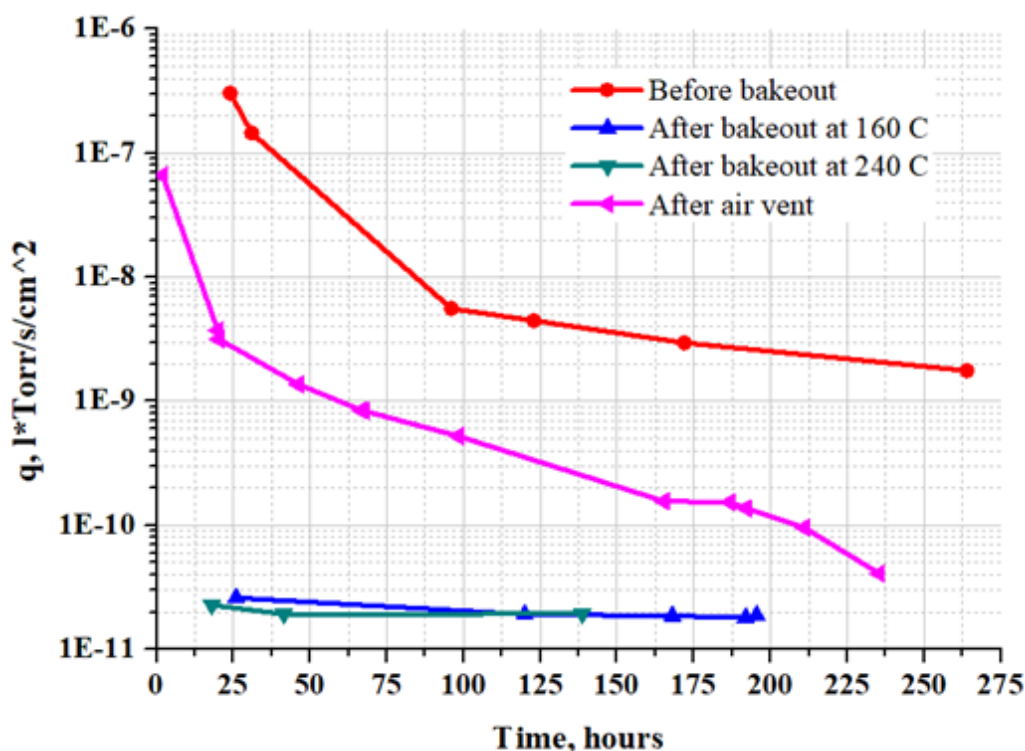
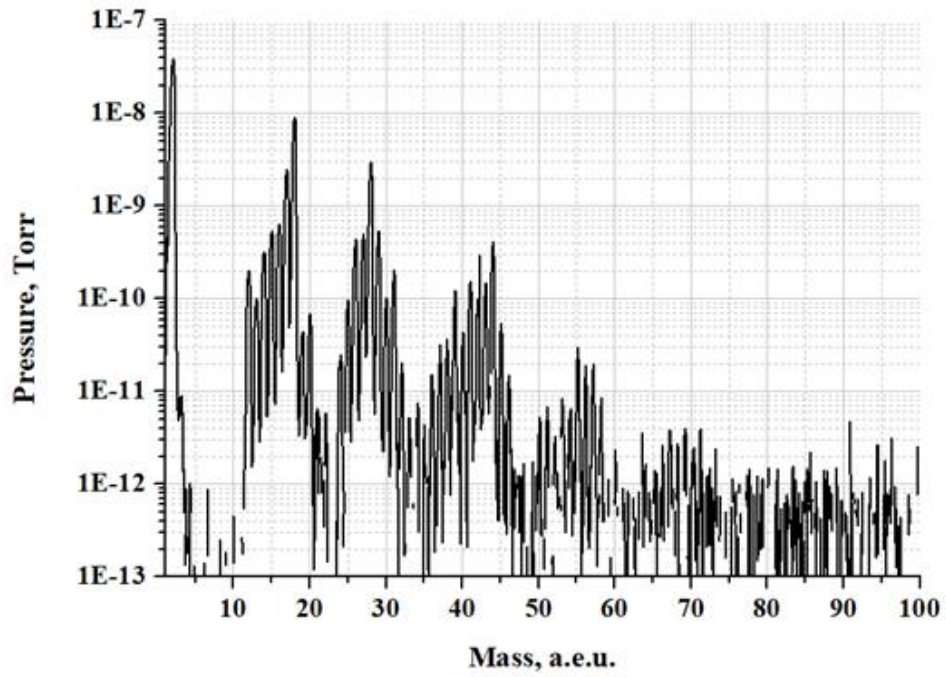
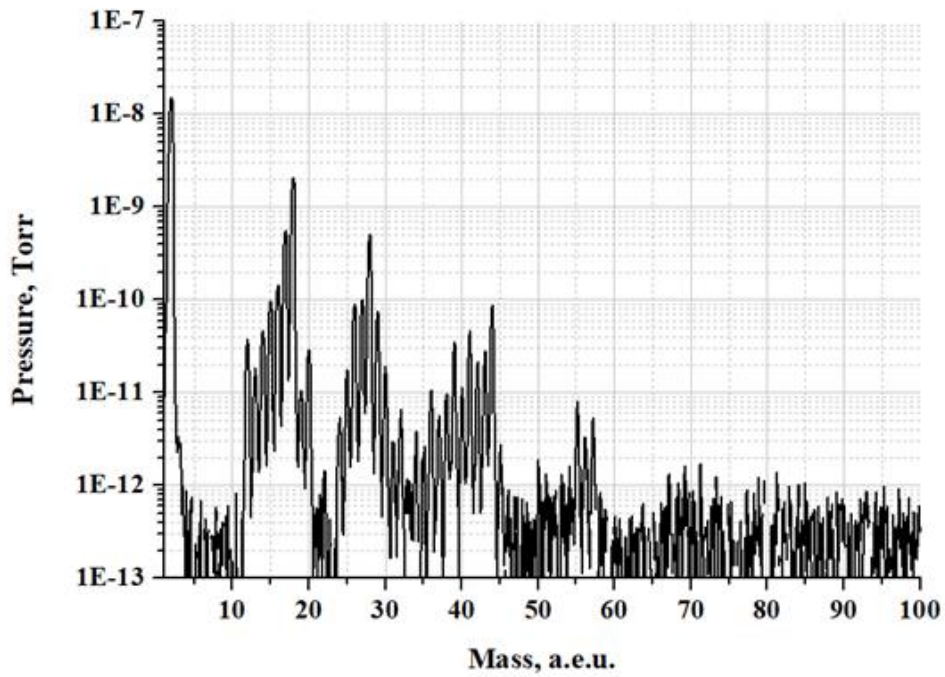


Рисунок 1.14. Термическое газовыделение из вспененного диоксида кремния (аэрогеля) в зависимости от длительности откачки и предварительных условий подготовки образцов [46]



a)



б)

Рисунок 1.15. Спектр остаточных газов из аэрогеля (а) до прогрева и (б) после прогрева при 160 °С в течение 24 часов [46]

Глава 2. Вакуумные соединения для получения высокого и сверхвысокого вакуума

Вакуумные соединения относятся к числу одних из наиболее важных узлов любой вакуумной системы, поскольку одной из причин нарушения герметичности является течь в вакуумном соединении. При выборе вакуумного соединения необходимо обращать внимание на натекание, газовыделение с поверхностей уплотнения и присоединительных фланцев, термическую и химическую стойкости, механическую прочность, простоту проверки на герметичность.

В настоящее время в мире есть множество различных типов вакуумных соединений и уплотнений, позволяющих получить высокий и сверхвысокий вакуум. Но каждый тип имеет свои достоинства и недостатки, к которым можно отнести стоимость фланцев или уплотнения, опыт применения того или иного типа соединения на различных установках, а также толщину фланцев и необходимое для их стыковки место. В технике ускорителей есть общее правило: чем тоньше фланец и чем меньше требуется пространства на стыковку вакуумных объемов, тем больше будет полезного пространства для установки магнитов, элементов диагностики или другого дополнительного оборудования. Поскольку для получения высокого и, особенно, сверхвысокого вакуума чаще всего требуется прогрев при температуре до 400-450 °С, поэтому вакуумное соединение (уплотнение, присоединительные фланцы) должно быть металлическими, без применения органических соединений.

2.1. Сварное вакуумное соединение

Сварные соединения более 40 лет успешно используются на многих ускорительных комплексах ИЯФ СО РАН, например, ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/ВЭПП-4. Сварные вакуумные соединения относятся к неразборным соединениям, которые завариваются “вручную” или автоматически, но данный

тип соединения ограничен количеством циклов “сварка/резка” (единицы раз) без уменьшения линейного размера камеры, в то время как разъемные соединения можно использовать десятки и даже сотни раз, ставя новое уплотнение (рисунок 2.1). К тому же, при каждой резке происходит уменьшение длины камеры, для компенсации которой необходимо применение дополнительных сильфонов, что, в свою очередь, приводит к удорожанию вакуумной системы.

Соединения, свариваемые «вручную», требуют существенно меньшее пространство для стыковки, поскольку для автоматической сварки необходимо место для размещения вспомогательного оборудования. Для получения вакуумноплотного сварного шва требуется выполнение некоторых условий:

- так как обычно сварка фланцев выполняется дуговой сваркой в защищенных газах (аргона для сварки нержавеющей стали аустенитного класса или гелия для сварки меди), необходимо грамотное конструирование сварных фланцев во избежание образования виртуальных негерметичностей.

- поскольку сварные фланцы в местах приварки имеют небольшую толщину (в зависимости от проходного диаметра от 1 мм до 6 мм), то необходимо тщательно выбирать материал, из которого изготавливается сварной фланец, т.е. при разработке фланцев следует непременно учитывать направление проката металла, так как неплотности материала, а, следовательно, и вероятность появления течи вдоль направления проката значительно выше, чем поперек (рисунок 2.2).

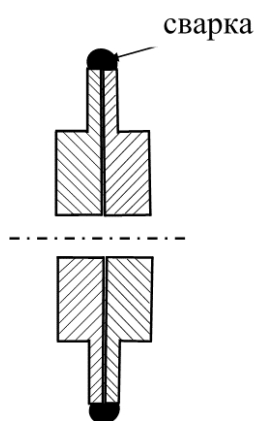


Рисунок 2.1. Неразборное вакуумное соединение [58]

Сварные соединения рассматривались как один из вариантов фланцевого соединения для вакуумных камер Ду 500 Collector Ring в ускорительном комплексе FAIR (Дармштадт, Германия). Так как в современной вакуумной технике не допускается наличие цветов побежалости из-за высокой вероятности образования течи, то необходимо обеспечить во время сварки напуск аргона внутрь камеры для избегания попадания кислорода, который и является основной причиной образования окислов.

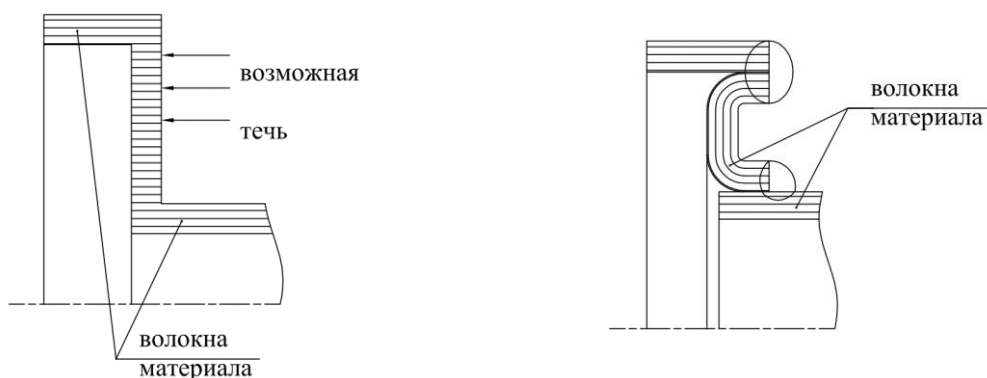


Рисунок 2.2. Виртуальные пазухи, течь по волокнам, образованным при прокате металла (а) и без течи по волокнам (б) [58]

Для проверки отсутствия остаточного количества аргона внутри камеры после откачки (наличие аргона уменьшает время жизни пучка в циклическом ускорителе в десятки или даже сотни раз), были изготовлены две вакуумные камеры внутренним диаметром 150 мм и длиной 1500 мм. Одна из камер была разрезана на 5 частей (суммарная длина всех швов равнялась 750 мм), а потом сварена аргонно-дуговой сваркой в защитном газе с полным проваром каждого шва (количество кислорода меньше 40 ppm). После чего обе камеры были установлены на вакуумный стенд (см. рисунок 2.3) и были проведены измерения спектра остаточных газов и коэффициент термического газовыделения.

Стенд состоит из вакуумного объема, изготовленного из бесшовной нержавеющей трубы марки 304 L, который отделяется от средств откачки цельнометаллическим угловым клапаном. Измерение давления в системе выполнялось ионизационным датчиком давления с холодным катодом IG

(диапазон давления от $5 \cdot 10^{-11}$ мбар до 10^{-2} мбар). Измерение парциальных давлений газов (до 100 а.е.м.) проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США).

Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (ТМР) и безмасляный мембранный насос (МР) через цельнометаллический угловой клапан. Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления FRG фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani (от 10^{-4} мбар до 1000 мбар) и датчика давления с холодным катодом (от 10^{-10} мбар до 10^{-2} мбар) и расположенным на откачной станции.

Установка прогревалась резистивным методом, контроль за температурой выполнялся хромель/копель термодарами.

Методика измерения основана на измерении перепада давлений на элементе с известной проводимостью, равной 10 л/с по азоту. Газовый поток может быть вычислен, как и в случае для карбида бора:

$$Q = U \cdot (P_{до} - P_{после}) \cdot K, \quad (2.1)$$

где U – известная молекулярная проводимость диафрагмы, равная 10 л/с для азоту; $P_{до}$ – давление в измерительной системе до закрытия углового клапана перед откачной станцией, Торр; $P_{после}$ – давление в измерительной системе после закрытия углового клапана перед откачной станцией, Торр; K – коэффициент чувствительности для датчика давления, равный 1,0 для азота.

Коэффициент термического газовыделения находится как:

$$q = \frac{U \cdot (P_{до} - P_{после}) \cdot K}{A}, \quad (2.2)$$

где A – полная площадь вакуумной камеры, см².



Рисунок 2.3. Фотография вакуумного стенда для испытания сварочных соединений

Как видно из рисунка 2.4, наличие сварочных швов в вакуумном объеме никак не сказывается на спектрах остаточных газов, что говорит об отсутствии каких-либо «пазух». Небольшое различие в коэффициентах газовыделения (рисунок 2.5) для цельной камеры и камеры со сварочными швами можно объяснить тем, что во время аргонно-дуговой сварки вакуумная камера испытывала локальный нагрев, тем самым происходило термическое обезгаживание. Коэффициент термического газовыделения меньше $5 \cdot 10^{-10}$ л·Торр/с/см² у обеих непрогретых камер уже через 24 часа непрерывной откачки, что свидетельствует о хорошем качестве поверхности камер.

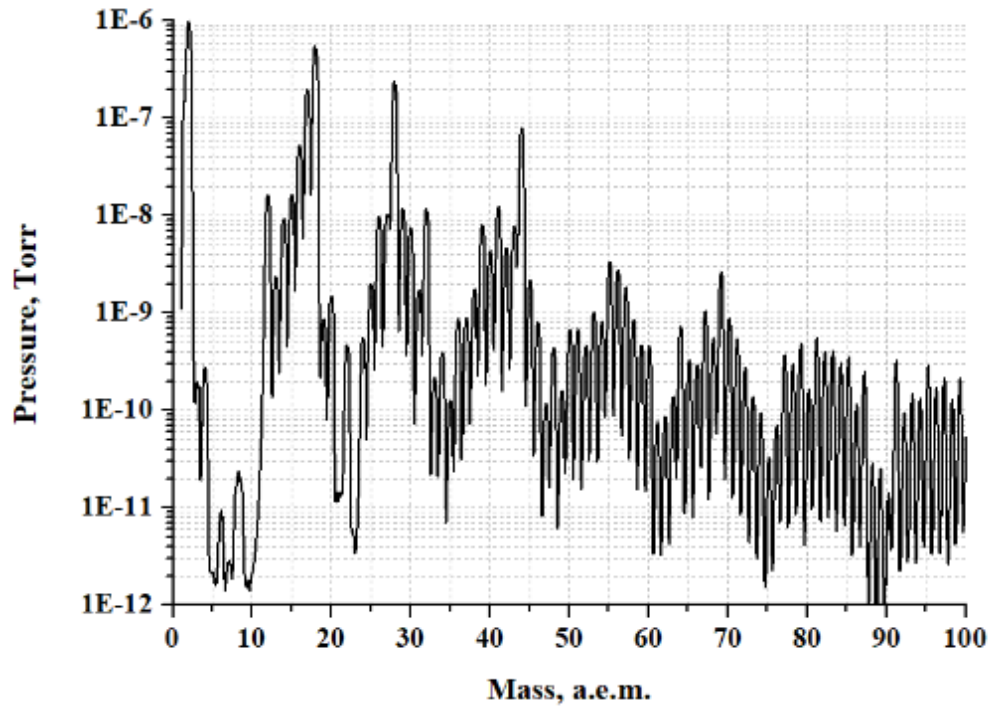


Рисунок 2.4а. Спектр остаточных газов обеих камер и испытательного стенда через 24 часа непрерывной откачки

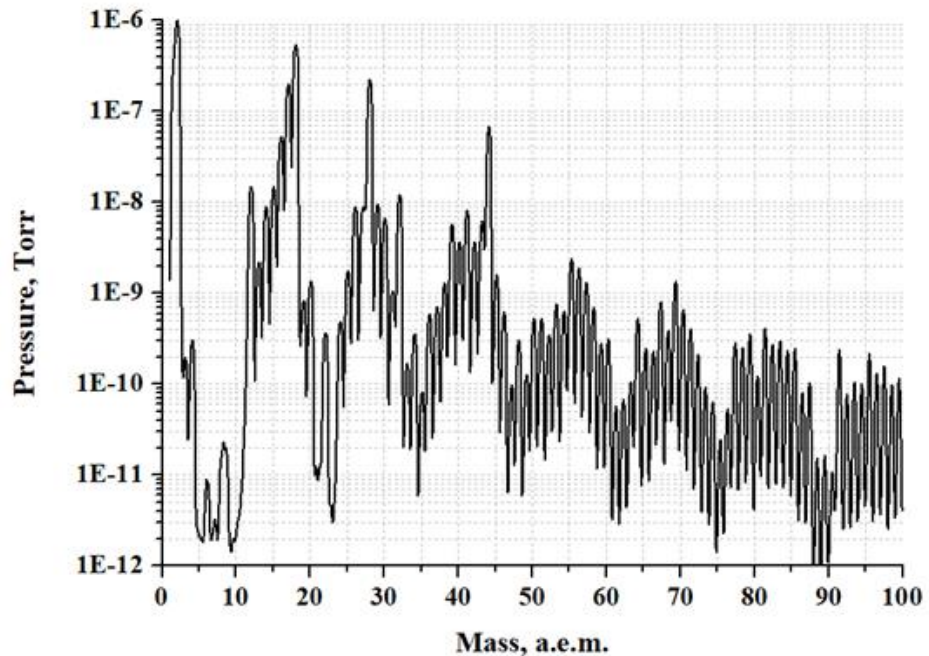


Рисунок 2.4б. Спектр остаточных газов без камеры со сварными поперечными швами через 24 часа непрерывной откачки

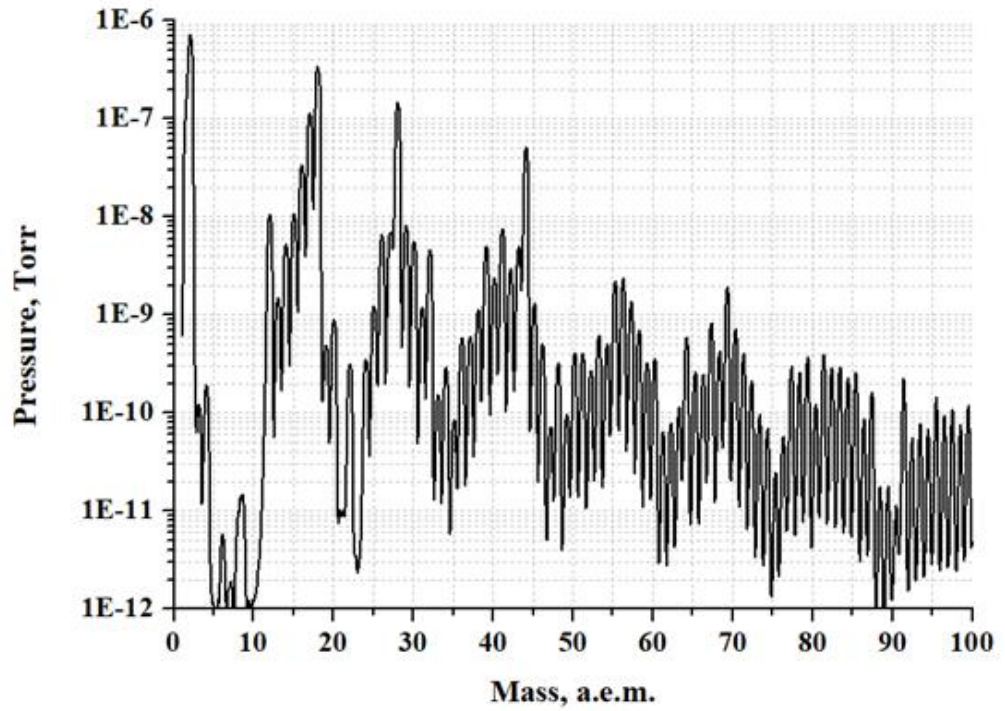


Рисунок 2.4в. Спектр остаточных газов испытательного стенда через 24 часа непрерывной откачки

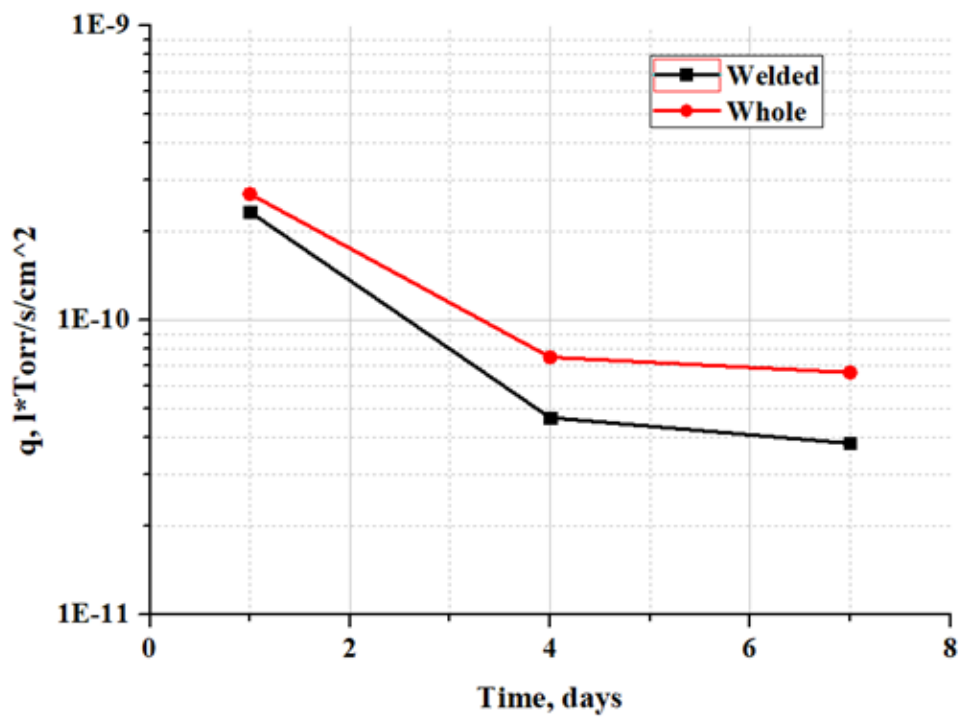


Рисунок 2.5. Коэффициент термического газовыделения для обеих непрогретых вакуумных камер от длительности откачки

2.2 Разъемные соединения с металлическими уплотнениями

Разъемные вакуумные соединения с металлическими уплотнениями разрабатывались с целью выдерживать многократные и длительные прогревы при температурах $300 \div 600$ °С. В конструкциях прогреваемых разборных соединений вакуумное уплотнение достигается за счет пластических деформаций уплотнения. При пластической деформации материал заполняет все микронеровности, имеющиеся на уплотняющей поверхности фланцев. Из-за того, что у металлов текучесть значительно меньше, чем у резин, возникает необходимость выполнять уплотняющие поверхности фланцев с высокой степенью чистоты.

Кроме того, для соединений с металлическими уплотнениями требуется значительно большее усилие стягивания, чем для соединений с резиновыми уплотнениями или фторопластовыми уплотнениями.

К тому же, через соединения с металлическими уплотнениями практически исключается проникновение газов через материал уплотнителя, а поток газовыделения меньше в 1000 раз, чем у лучших сортов резины, и не превышает величины 10^{-12} л·Торр/с.

Одним из распространенных разборных вакуумных соединений в СССР и России является канавочно-клиновое соединение (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6. Канавочно-клиновое вакуумное соединение (слева - в разобранном, справа - в собранном виде) [59]

Пластическая деформация уплотнения происходит одновременно в двух местах. Углы профиля канавки и клина составляют 90° и 60° , соответственно. Данные углы являются оптимальными, с тем чтобы герметизация металлического уплотнения происходило между кромкой канавки и конической поверхностью клина. Благодаря этому удается значительно уменьшить площадь уплотнения, подвергающемуся деформации, а значит уменьшается и усилие, необходимое для надежной герметизации. Однако при этом предъявляются жесткие требования к качеству обработки поверхности клина и канавки. Их шероховатость не должна превышать $0,32 \div 0,16$ мкм (среднеарифметическое отклонение профиля). В качестве материала для уплотнения используются медное плоское кольцо толщиной 0,5 мм или алюминиевое плоское кольцо толщиной 0,3 мм. Усилия, необходимые для деформации уплотнения из алюминия - 200 кН/м, из меди - 400 кН/м. Стандартизованными размерами для данного типа соединения являются проходные диаметры от 10 мм до 400 мм.

Основными недостатками данного соединения являются большое усилие затяжки и разные фланцы (на одном клин, на другом - канавка), что сильно ограничивает возможные варианты применения. Плюс ко всему возможно наличие виртуального нарушения герметичности.

Данные недостатки оказались настолько существенными в эксплуатации, что послужили причиной поиска новых высоко- и сверхвысоковакуумных прогрессивных соединений.

Наибольшее распространение в вакуумной технике получили фланцы типа Conflat (рисунок 2.7). При вакуумной герметизации конические кромки зуба обоих фланцев проникают в плоское медное кольцо навстречу друг к другу. Происходит деформация медного уплотнения к внутренним цилиндрическим поверхностям фланцев. Поскольку дальнейшая деформация уплотнения из зоны герметизации жестко ограничено, то возникают высокие давления между уплотняющими поверхностями, вследствие чего происходит заполнение всех микронеровностей и надежная вакуумная герметизация соединения. Толщина медного уплотнения чаще всего $2,0 \div 2,2$ мм, реже 3 мм.

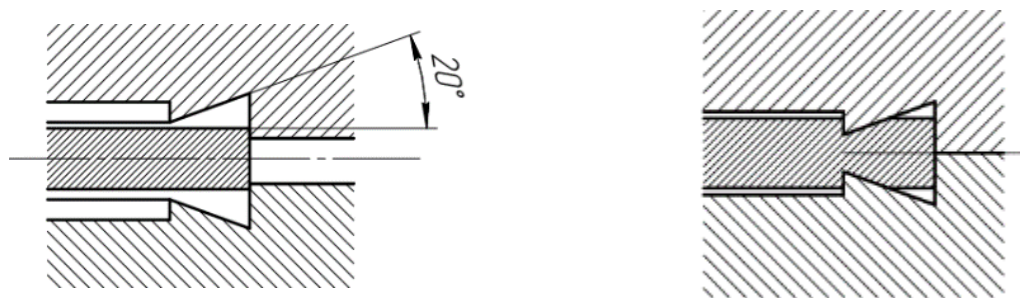


Рисунок 2.7. Вакуумное соединение типа Conflat (слева - в разобранном, справа - в собранном виде) [59]

Преимуществами данного типа соединения является то, что уплотняющий «зуб» фланца находится чуть ниже остальной части фланца, тем самым снижается вероятность его повреждения. Для обеспечения герметизации необходимо относительно малое усилие (около 150 кН/м). Важным достоинством фланцев типа Conflat является то, что оба фланца, участвующие в вакуумном соединении, имеют одинаковую геометрию, что в свою очередь способствует безболезненной замене одних вакуумных элементов на другие.

К недостаткам можно отнести то, что данные фланцы стандартизованы от проходного диаметра Ду 16 до проходного диаметра Ду 350 ÷ 400. При этом с увеличением проходного диаметра увеличивается и толщина фланца, что требует большего рабочего пространства для стыковки вакуумных объемов. В ИЯФ СО РАН был создан прототип вакуумной камеры для резонатора NICA с фланцами DN500 типа Conflat. Толщина таких фланцев была равна 35 мм. Данная камера была собрана, откачена и испытана. Чтобы стандартизировать данный размер фланца, необходимо провести десятки (даже сотни) вакуумных испытаний. Кроме того, нужно помнить, что даже незначительное отклонение (0.2–0.3 мм) фланца (после сварки) от перпендикулярной плоскости к вакуумной камере может привести к невозможности создания вакуумноплотного соединения.

Еще одним соединением, широко используемым в вакуумной технике, являются СОФ фланцы, уплотнителем в которых является медное кольцо, сваренное из проволоки толщиной 2 мм. Из-за необходимости центрировать уплотнения фланцы имеют различную конструкцию (см. рисунок 2.8).

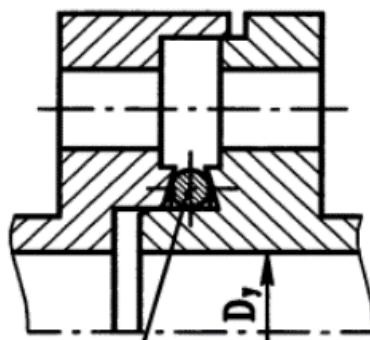


Рисунок 2.8. Вакуумное соединение типа COF в разобранном виде [59]

Зато усилие, необходимое для герметизации, меньше в два раза по сравнению с канавочно-клиновым соединением и равняется 200 кН/м. Другим небольшим преимуществом данного типа соединения над фланцами типа Conflat является стандартизация до проходного диаметра 630 мм, правда фланцы данного соединения имеют большую толщину, чем фланцы типа Conflat.

Еще одной разновидностью вакуумных соединений являются соединения с плоскими фланцами и фасонным уплотнением, т.е. уплотнением со сложным профилем (рисунок 2.9). В качестве уплотнения может быть использован медная «тарелка» с выступами по всему периметру с обеих сторон. Данное соединение широко используется в вакуумных изоляционных или волноводных прямопролетных клапанах производства ИЯФ СО РАН.

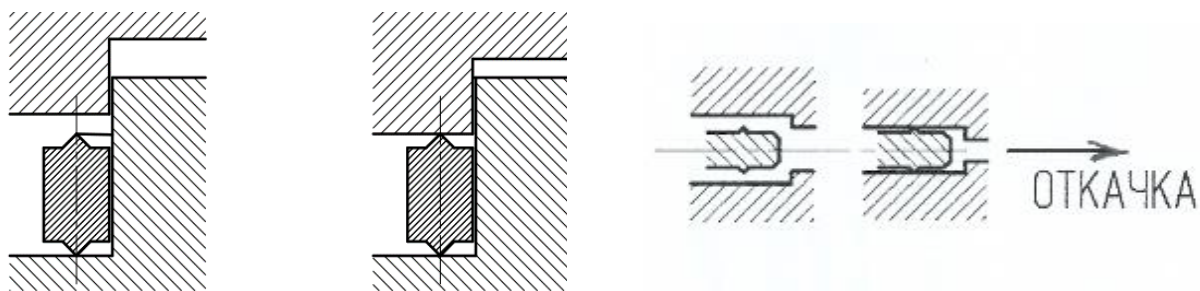


Рисунок 2.9. Вакуумное соединение с фасонными уплотнениями в разобранном и собранном виде [60]

Недостатком данного соединения является то, что при герметизации с двух сторон появляется вероятность, что одна или обе стороны не будут герметично

изолированы по вакууму, и тогда существует возможность натекания атмосферы в вакуумный объем, если с одна из сторон контактирует с атмосферой. Чтобы этого избежать, необходимо предусмотреть измеритель вакуума, которым может служить либо датчик давления, либо магниторазрядный насос с малой быстротой откачки ($3 \div 5$ л/с по воздуху), и механическую вакуумную откачку. При этом данный недостаток является одновременно и достоинством соединения, даже при существенном нарушении ($0,1$ л·Торр/с) вакуумной герметичности в клапане в закрытом состоянии, при работающей механической откачки насосы, находящиеся в вакуумной стороне, не почувствуют вскрытия на атмосферу. Другим недостатком является изготовление до проходного диаметра Ду 200.

В конце XX - начале XXI веков появились упругие С-образные уплотнения с нанесенным мягким гальваническим покрытием. Одним из производителей данных уплотнений является фирма HTMS (Бельгия) [61]. Проходной диаметр от 6 мм до 7600 мм.

Принцип герметизации таких уплотнений основан на пластической деформации С-кольца, у которого пластичность больше, чем у материала фланца. Уплотнение происходит между уплотняющей поверхностью фланца и упругим С-кольцом. Во время сжатия результирующее удельное давление заставляет С-кольцо сжиматься и заполнять дефекты фланца, обеспечивая при этом положительный контакт с уплотнительными поверхностями фланца. Деформируется верхняя и нижняя кромки уплотнения, при этом зазор между фланцами не должен быть меньше какой-то величины (для каждого поперечного сечения зазор свой). Для избегания деформации уплотнения больше данной величины, на одном из фланцев устанавливают ограничители (см. рисунок 2.10а), в случае применения их с фланцами ISO типа, либо уплотнение деформируется до полного смыкания фланцев (см. рисунок 2.10б), в случае специальных фланцев. Кроме того, уплотнения с мягким гальваническим покрытием обладают очень важным свойством выдерживать небольшие деформации, связанные с изменениями температуры или давления за счет упругости уплотнения, после сборки фланца. Данное свойство является достаточно полезным, так как хорошо

известно, что любое здание подвержено сезонным “просадкам/подъемам” фундамента, что влечет за собой и “просадку/подъем” фрагментов установки, вследствие чего возможен излом вакуумного соединения с последующим нарушением герметичности.

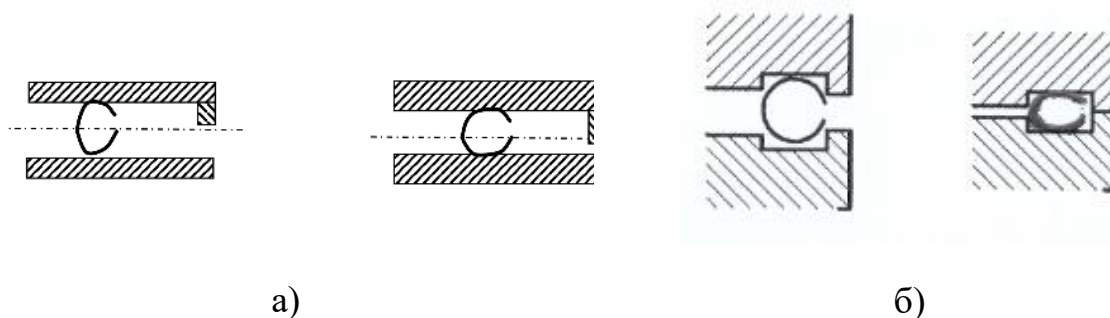


Рисунок 2.10. Фланцевые соединения с С-образными уплотнениями

Институт ядерной физики СО РАН принимает участие в создании почти всех элементов Collector Ring (FAIR, Германия). Было принято решение применять данные уплотнения при размерах вакуумных камер больше 350 мм (для сечений меньше 350 мм - фланцы типа Conflat). Предварительно, был проведен ряд экспериментов для изучения поведения фланцев ISO-K с использованием С-образных уплотнений при различных нагрузках и для этого были протестированы четыре типа упругих С-образных уплотнений. В таблице 2.1 приведены основные параметры испытанных С-образных уплотнений различных типов для размера фланцев DN500.

Схема стенда для изучения С-образных уплотнений показана на рисунке 2.11. Вакуумная система обеспечивает вакуум 10^{-6} Торр и лучше. Откачка осуществляется с помощью турбомолекулярного *TMP* и безмасляного форвакуумного *MP* насосов и углового клапана *VR3*. Измерение давления проводится с помощью широкодиапазонного датчика давления *FRG* (датчик давления с холодным катодом + форвакуумный датчик давления Pirani). Контроль за герметичностью во время испытаний выполняется течеискателем *LD* (предел чувствительности натекания по гелию $<5 \cdot 10^{-12}$ л · Торр/с). Угловые клапаны *VR1*

и VR_2 необходимы для предотвращения напуска атмосферы во время остановки вакуумного оборудования.

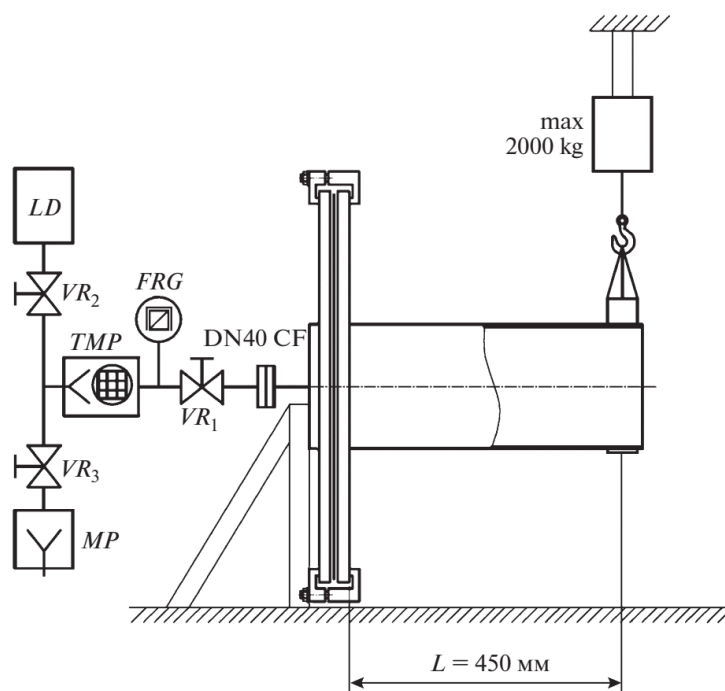


Рисунок 2.11. Стенд для изучения свойств С-образных уплотнений [62], [63]

Испытываемый образец (фланцевое соединение) состоит из фланца-заглушки ISO-K DN500, через который осуществляется откачка соединения; подставки, на которой жестко закрепляется фланец-заглушка; ответного фланца ISO-K DN500 с “плечом”, к которому прикладывается усилие, равное 10 кН·м, и силовой тяги грузоподъемного механизма, способного обеспечить данное усилие. До проведения испытаний осуществляется вакуумно-плотная сборка фланцев. Для того, чтобы не допустить чрезмерной деформации уплотнения, на одном из фланцев устанавливаются на одинаковом расстоянии друг от друга ограничители. Вакуумно-плотное соединение обеспечивается двойными зажимами, причем для разных типов уплотнений применяется разное количество данных зажимов. Перед установкой зажимы обрабатываются, например, дисульфидом молибдена для уменьшения силы трения. После создания вакуумно-плотного соединения проводится проверка на герметичность в течение 2–3 мин при помощи чехла из полиэтилена, наполненного газообразным гелием. Данный метод позволяет более

качественно осуществлять проверку на герметичность по сравнению с обдувкой снаружи потоком гелия. Далее проверка на герметичность осуществляется под прикладываемой нагрузкой через каждые 1.5 кН·м до максимальной величины, равной 10 кН·м. Затем нагрузка плавно уменьшается до нуля и выполняется окончательная проверка на герметичность. Одно из покрытых серебром и с “мягкой” пружиной уплотнений дополнительно подвергается только прогреву при температуре, равной 350°C, в течение 4 ч. После охлаждения до комнатной температуры выполняется окончательная проверка на герметичность при помощи чехла из полиэтилена, наполненного газообразным гелием.

Результаты испытаний для каждого типа уплотнения проиллюстрированы в таблице 2.2. Все испытания проводятся при достижении уровня фона (при открытом клапане на тестируемый объект) в пределах от 10^{-10} до $4 \cdot 10^{-10}$ л·Торр/с. При этом уровень флуктуаций измерений во время испытаний не превышает $(1-2) \cdot 10^{-11}$ л·Торр/с. Как видно, уплотнение типа JSE не обеспечивает необходимую вакуумную герметичность соединения, хотя к нему прикладывается усилие, большее 45 Н·м (до 60 Н·м), и используется большее количество зажимов [62], [63].

Для уплотнений остальных типов не зарегистрировано натекания выше 10^{-10} л·Торр/с при количествах зажимов: для SE – не менее 24 шт, для CSE – не менее 48 шт. Под необходимым усилием понимается максимальное усилие, при котором зазор между фланцем и ограничителями на ответном фланце был равен или меньше 0.05 мм, хотя герметичность достигается и при меньших усилиях. При этом одно и то же уплотнение возможно применять несколько раз; при меньших усилиях возможно увеличение количества циклов (сборка/разборка фланцев). Это свойство особенно актуально для уплотнения типа SE, которое обеспечивает герметичность и выдерживает нагрузки при усилении 20 Н·м (при каждом последующем использовании необходимо увеличивать усилие при затягивании). Тем самым достигается использование одного и того же уплотнения не менее пяти раз. Все виды С-образных уплотнений при комнатной температуре хорошо себя ведут при поперечной нагрузке до 10 кН·м, кроме уплотнений типа JSE.

Таблица 2.1. Основные параметры испытанных С-образных уплотнений

Тип	CE-052800-6.35H-2/0-4-SN50	CSE-052800-6.35H-2/2-1-S50	JCE-052800-6.20M-2/2-1-A300	CSE-052800-6.35M-2/2-1-S50
Диаметр уплотнения, мм	528	528	528	528
Поперечный размер уплотнения, мм	6.35	6.35	6.2	6.35
Толщина стенки уплотнения, мм	0.64	0.64	0.51	0.64
Материал C-ring	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718
Материал пружины	-	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718
Покрытие	Олово	Серебро	Алюминиевый сплав	Серебро
Толщина покрытия, м	30÷50	30÷50	300	30÷50
Нагрузка, Н/мм	160	770	230	325
Обработка	отжиг + осаждение	деформационное упрочнение	деформационное упрочнение	деформационное упрочнение

Нарушение же герметичности для фланцевого соединения DN250 типа ConFlat наблюдается уже при нагрузке 8 кН·м. Полученные результаты

подтверждают, что фланцы ISO-K с металлическими С-образными уплотнениями могут быть успешно применены в широкоапертурных вакуумных системах. На основании полученных результатов принято решение о создании дипольных вакуумных камер со специальными фланцами типа CR-K в Collector Ring (FAIR, Германия), показанный на рисунке 2.10 б) [64] и резонатора для NICA (Дубна, Россия) [65].

Например, резонатор для NICA (диаметром 500 мм и длиной 1000 мм) изготавливается из нержавеющей стали 316 L. Коэффициент термического газовыделения нержавеющей стали, прогретой при 300°C в течение 24 ч, равняется 10^{-12} л·Торр/с/см². Суммарный поток десорбированного газа равен $1.5 \cdot 10^{-8}$ л·Торр/с. Тогда при использовании комбинированных насосов (титановый сублимационный насос и магниторазрядный насос) с быстротой откачки 1000 л/с по водороду, можно получить уровень вакуума $3 \cdot 10^{-11}$ Торр.

Как видно из результатов эксперимента, достоинством С-образных уплотнений с покрытием из олова является значительное количество применений каждого уплотнения (до 5 раз), меньшее количество используемых двойных зажимов и меньшее максимальное усилие, необходимое для герметизации стыка.

Таблица 2.2. Результаты испытания С-образных уплотнений [62], [63]

Тип	CE-052800-6.35H-2/0-4-SN50	CSE-052800-6.35H-2/2-1-S50	CSE-052800-6.35M-2/2-1-S50	JCE-052800-6.20M-2/2-1-A300
Кол-во зажимов	24	48	48	До 48
Усилие, Н·м	35 ¹⁾	45 ¹⁾	45 ¹⁾	>45
Мах. нагрузка, кН·м	10	10	10	10
Кол-во циклов затягиваний	2 ÷ 5 ²⁾	1 ÷ 2 ³⁾	Только 1	0

Продолжение таблицы 2.2

Тип	CE-052800-6.35H-2/0-4-SN50	CSE-052800-6.35H-2/2-1-S50	CSE-052800-6.35M-2/2-1-S50	JCE-052800-6.20M-2/2-1-A300
Кол-во тестируемых уплотнений	3	2	2	2
Натекание, л·мбар/с	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	$> 10^{-9}$
Кол-во неудавшихся уплотнений	0	0	1	2

1) Максимальное усилие дается такое, чтобы зазор между фланцем и ограничителями на ответном фланце равнялся меньше 0,05 мм, хотя герметичность достигалась при меньших усилиях.

2) Если зазор между ограничителями и фланцем меньше 0,05 мм, то количество циклов затягиваний равно двум, иначе возможно до пяти раз.

3) Если зазор между ограничителями и фланцем меньше 0,05 мм, то количество циклов затягиваний равно одному, иначе возможно до двух раз

Недостатком является ограниченная температура прогрева, которая не должна превышать 200°C. Применение уплотнений типа CSE, покрытых серебром, возможно в прогреваемых вакуумных системах (максимальная температура прогрева 430°C), но данное уплотнение может использоваться только один раз, независимо от того, осуществляется прогрев или нет. Хорошей альтернативой уплотнениям типа CSE являются уплотнения типа CE с покрытиями, способными выдерживать нагрев до 450°C, например, серебром.

У всех вышеперечисленных фланцевых соединений есть существенный недостаток – зазор между уплотнением и внутренней поверхностью фланца, что

приводит к появлению импеданса связи. Поскольку пучок заряженных частиц, движущийся внутри вакуумной камеры, возбуждает в стенках данной камеры токи, и создаваемые этими токами поля, в свою очередь, действуют на частицы пучка. Данное взаимодействие приводит к изменению формы сгустков, сдвигам бетатронных колебаний, потерям энергии пучка и появлению различных неустойчивостей. В настоящее время обязательным условием проектирования вакуумной камеры ускорителей является минимизация импедансов связи. Данная проблема актуальна для ускорителей частиц, таких как Super B-фабрики со светимостью более $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и длиной сгустка менее 5 мм или в ускорителях с поперечным эмиттансом менее 100 пм·рад, таких как синхротрон 4+ поколения ЦКП «СКИФ». В этих ускорителях важно избегать нестабильности пучка, поскольку они легко удлиняют пучок и увеличивают эмиттанс пучка. И, хотя данный импеданс фланцев достаточно мал по сравнению с электромагнитными кикерами или высшими модами ускоряющих ВЧ-резонаторов, но суммарный импеданс всех фланцев (в некоторых ускорителях заряженных частиц число фланцев доходит до 1000 шт.) может оказаться значительным.

Кроме того, импеданс фланца может привести к нагреву из-за возбужденных мод высших порядков (HOMs), что, в свою очередь, может послужить причиной возникновения дополнительной десорбция газа и, как следствие, к увеличению эмиттанса пучка и уменьшению времени жизни пучка.

Фланец типа Мацумото – Оцука (МО-тип) является перспективным решением этой проблемы. Данный тип фланца является модифицированной версией фланца, который использовался в ускорителях S-диапазона в DESY (Гамбург, Германия).

Во фланцах МО-типа металлическое уплотнение точно соответствует апертуре камеры пучка. Уплотнение имеет роль ВЧ моста в зазоре между фланцами и вакуумным уплотнением. Кроме того, металлическое уплотнение также имеет небольшую поперечную «ступеньку» на внутренней поверхности, что снижает импеданс до очень малого значения. Кроме того, фланец может быть

применен в вакуумных камерах со сложной апертурой, такой, как вакуумные камеры с анти-камерами [66].

Данные фланцы, изготовленные как из меди и нержавеющей стали, так и из алюминиевого сплава были успешно протестированы. Материал уплотнений - либо медь, либо алюминий [67].

Принцип герметизации показан на рисунке 2.12.

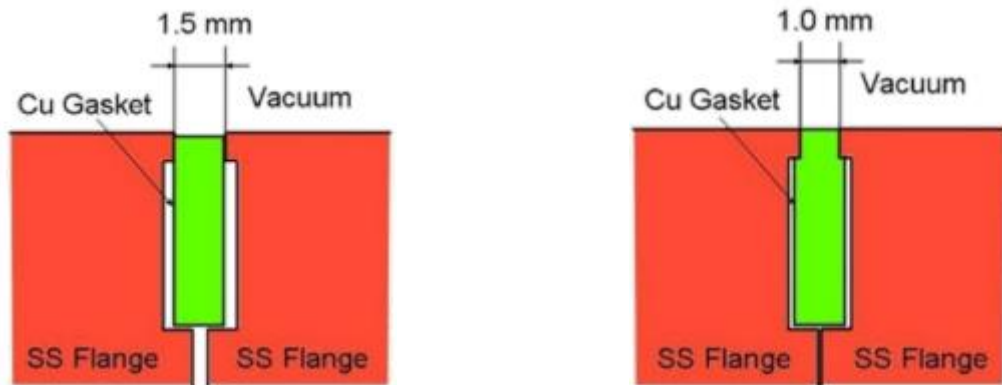


Рисунок 2.12. Фланцевые соединения МО-типа [67]

Глава 3. Вакуумные насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума

Первоначально для получения высокого вакуума применялись диффузионные насосы (ртутные или паромасляные) с высокоэффективными охлажденными до температуры жидкого азота ловушками. Существенным недостатком данного типа насоса является то, что при прорыве атмосферы происходит «выброс» масла в вакуумную камеру ускорителя, что, в свою очередь, ведет к полному разбору вакуумной системы с последующей очисткой от органических соединений, т.к. ускоренный пучок разлагает пары масла и «свободный» углерод осаждается на керамических изделиях (изоляторах, датчиках положения пучка и др.).

Бурному развитию вакуумной техники поспособствовало решение проблем управляемого термоядерного синтеза, где необходимо было обеспечить быстроту откачки порядка $10^5 \div 10^6$ л/с. С этой целью были созданы сорбционные насосы, принцип действия в которых основан на поглощении активных газов (водород, азот, монооксид углерода и т.д.) специальными геттерами за счет хемосорбции. Наибольшее распространение в качестве геттера получил титан. Главными недостатками такого типа насосов является то, что, как было сказано выше, они откачивают только активные газы, но не способны поглощать метан и благородные газы, т.е. присутствующий в атмосфере аргон. Для этого необходимо использовать дополнительные насосы, такие как турбомолекулярные или магниторазрядные. Кроме того, в насосах применяются высокотемпературные элементы - сублиматоры титана, срок службы которых довольно ограничен (сотни часов).

В магниторазрядных (или ионно-геттерных) насосах также происходит интенсивное распыление титана, из которого изготовлены катоды, но магниторазрядные насосы существенно отличаются от сорбционных тем, что, во-первых, распыление в них происходит за счет бомбардировки холодных катодов

ионами остаточного газа с энергией в несколько кэВ ($3 \div 7$ кэВ), во-вторых, источником электронов, необходимых для ионизации остаточного газа, является ячейки Пеннинга.

Так как ток разряда, а, следовательно, и скорость распыления катодов прямо пропорционально давлению, то, таким образом, достигается более экономичное расходование катодов.

Другое преимущество ионно-геттерных насосов состоит в том, что они «вакуумно-изолированы», т.е. при внезапном отключении электропитания не происходит напуска атмосферы в вакуумную систему.

Модификации первоначальной конструкции магниторазрядных насосов с целью увеличения эффективно откачки инертных газов затронули электродную систему. Так появились «Noble» диодный и триодные магниторазрядные насосы.

Отсутствие в спектрах остаточных газов каких-либо загрязнений, вызванных работой насоса, нечувствительностью к отключению электропитания, произвольная ориентация и простота эксплуатации делают магниторазрядные насосы весьма привлекательными при создании вакуумных систем в ускорительных комплексах.

3.1. Принцип действия магниторазрядного насоса

3.1.1. Диодный тип насоса

Общий вид магниторазрядного насоса диодного типа показан на рисунке 3.1. Ячейки Пеннинга состоят из двух электродов, анода и двух катодов, а также магнита и металлокерамического ввода. Анод обычно имеет форму полых цилиндров и изготавливается из нержавеющей стали. Катоды располагаются по обеим сторонам анода и изготавливаются из титана, служащего для поглощения газов (геттер). Металлокерамический ввод необходим для подачи анодного напряжения в диапазоне $+3 \div +7$ кВ. Магнитное поле, создаваемое ферритами

марки 2БА, ориентировано вдоль анода и в коммерчески производимых магниторазрядных насосах составляет примерно 1500 Гс.

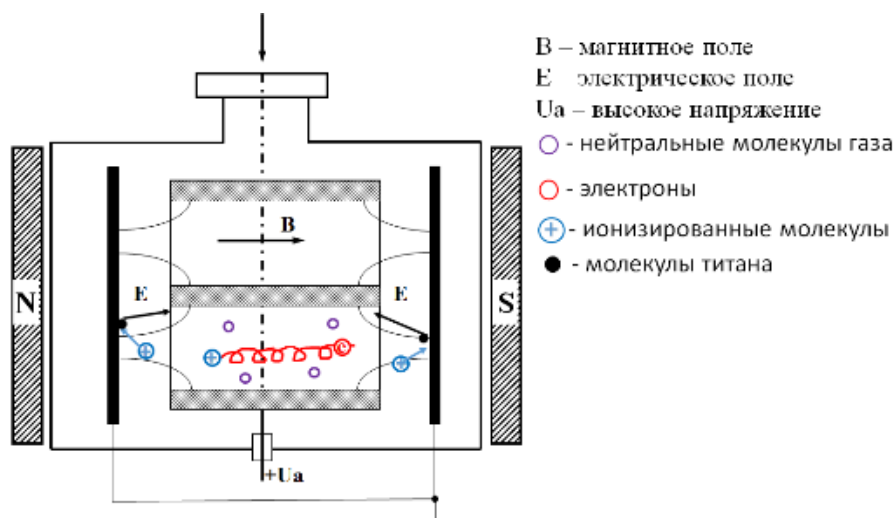


Рисунок 3.1. Общий вид магниторазрядного насоса диодного типа

Электроны, рожденные из катода под действием высокого электрического поля (действия радиальной и продольной составляющих электрического поля E_r и E_z) и при наличии магнитного поля, движутся по сложной траектории (циклоиде) колеблются между катодами до тех пор, пока не испытывают соударения с молекулами остаточного газа. Образовавшийся ион направляется на катод, а электрон переходит на более близкую к аноду орбиту, расположенную в области более сильного электрического поля. В конечном итоге электроны приближаются к аноду и попадают на него, образуя анодный ток. Разряд самостоятельно поддерживается за счет электронов вторичной ионно-электронной эмиссии. Время жизни электронов обратно пропорционально давлению и равняется 1 мсек при давлении 10^{-6} Торр и 1000 сек при давлении 10^{-12} Торр.

Наиболее тщательное и подробное изучение теории разряда Пеннинга было осуществлено группой в МГУ под руководством профессоров Э.М. Рейхруделя и Г.В. Смирницкой [68], [69].

В зависимости от значений параметров (магнитного поля (B), давления (p), анодного напряжения (U_a), длины (l_a) и диаметра (d_a) ячейки, рода газа) разряд может быть двух типов, отличающихся радиальным распределением потенциала [69].

При 1-ом типе (малые B, p, U_a, l_a, d_a) скорость ухода положительных ионов на катод при развитии разряда во много раз превышает скорость ухода электронов на анод, и в разряде преобладает отрицательный объемный заряд с равномерно распределенной плотностью, поэтому влиянием положительного заряда на распределение потенциала можно пренебречь. На рисунке 3.2. данный режим находится от B_3 до $B_{пер}$, где B_3 - величина магнитного поля, при которой происходит зажигание разряда в конкретной геометрии электродной системы магниторазрядного насоса, $B_{пер}$ - величина магнитного поля, при которой происходит переход с одного режима на другой.

При 2-ом типе (большие B, p, U_a, l_a, d_a) скорость ухода положительных ионов на катод при развитии разряда сравнима со скоростью ухода электронов на анод. В этом режиме положительный пространственный заряд компенсирует действие отрицательного пространственного заряда в той области, где имеет место ионизация газа. На рисунке 3.2. данный режим находится от $B_{пер}$ до B .

Причем, как видно из рисунка 3.2, величина $B_{пер}$ различна для разных анодных напряжений и приближается к B_3 по мере уменьшения U_a .

Между 1-м и 2-м режимами имеется переходная область с неравномерным распределением отрицательного пространственного заряда, следствием чего является возникновение неустойчивостей и колебаний

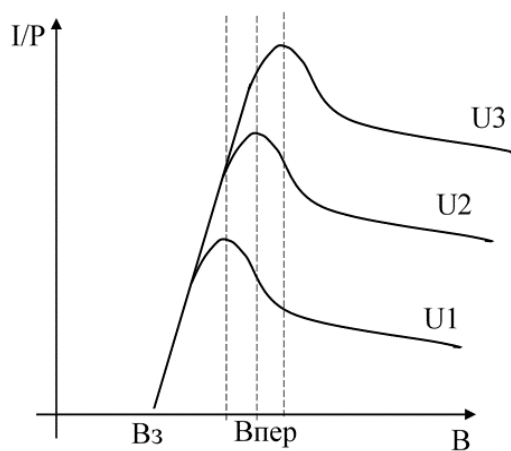


Рисунок 3.2. Зависимость разрядного тока от магнитного поля для различных значений анодного напряжения ($U_1 < U_2 < U_3$) [69]

Механизм откачки газов в магниторазрядных насосах основан на двух основных принципах [70]:

- химическое связывание газов распыленным титаном;
- абсорбция газов в результате прямого молекулярного контакта с поверхностью электродов.

В зависимости от рода газа преобладает тот или другой механизм. Химическим способом откачиваются активные газы, такие как азот, кислород и т. п. Положительные ионы этих газов, попадая на катоды, вырывают атомы титана. Нейтральные атомы титана нечувствительны к электрическому и магнитному полям. В основном они осаждаются на поверхности анода, так как именно анод составляет большую часть поверхности, видимой с катода. Кроме ионов, в разряде присутствуют активные нейтральные частицы газа – диссоциированные молекулы (атомы) и метастабильные атомы и молекулы. Ионы и активные частицы гораздо легче вступают в химические реакции, чем стабильные молекулы, из которых состоит газ в отсутствие разряда. В результате образуются твердые устойчивые соединения с низким давлением паров. Молекулы этих соединений могут возникать и на катодах, например, в момент попадания туда иона. Однако поверхность катодов непрерывно распыляется, поэтому химически связанный газ в конце концов оседает на аноде, оставаясь лишь на тех участках катода, которые не подвергаются ионной бомбардировке.

Сложные газы, например, пары воды, угарный и углекислый газы, метан и сложные углеводороды диссоциируют в разряде. Например, при соударении с электроном сложная углеводородная молекула распадается на несколько более простых молекул (атомов), которые, в свою очередь, ионизируются и откачиваются. Другие процессы, которые здесь происходят, включают диссоциацию на положительные и отрицательные ионы (последние идут прямо на анод), разрушение сложных ионов при ударе о поверхность катода и распыление титана и его соединений. Наблюдается также отложение свободного углерода из сложных молекул на внутренних поверхностях насоса.

Легкие газы, такие как водород, гелий не дают заметного распыления титана. Для них более существенным является второй механизм откачки, из-за малых молекулярных размеров, ионы легких газов могут внедряться в тело катода и диффундировать вглубь него. Заметная откачка водорода продолжается в течение некоторого времени после выключения разряда, т. е. нейтральные атомы водорода адсорбируются чистой поверхностью катода.

Титан и водород хорошо взаимодействуют друг с другом, образуя гидрид титана. Считается, что один атом титана способен связать до двух атомов водорода, т.е. теоретическая формула равняется TiH_2 , но наибольшее измеренное экспериментально содержание водорода в пленке титана соответствует составу $TiH_{1,76}$. По этой причине гидрид титана рассматривается не как химическое соединение, а как твердый раствор водорода в титане [71]. Раствор Ti-H имеет больший объем, чем сам титан, что приводит к образованию внутренних напряжений и трещин в местах максимальной концентрации водорода. В обычных условиях быстрота откачки для водорода в $2,5 \div 3$ раза больше, чем для воздуха. Однако при поглощении значительного количества водорода поверхность катода увеличивается, из-за растрескивания и быстрота откачки водорода возрастает примерно вдвое.

Диффузия гелия затруднена его большими атомными размерами. Первоначально быстрота откачки гелия высока, однако пропорционально уменьшению давления она снижается до величины, составляющей около 10% быстроты откачки воздуха. Обратное выделение водорода или гелия наблюдается при бомбардировке ионами более тяжелых газов или прогреве до температуры свыше $200\text{ }^{\circ}C$. При комнатной же температуре обратное выделение легких газов незначительно даже при давлениях порядка 10^{-10} Торр.

3.1.2. Эффект увеличения быстроты откачки. Аргонная нестабильность

Увеличение стабильной быстроты откачки насоса для активных газов (азота, водорода и т.д.) по сравнению с «нормальной» на $50 \div 100\%$ возможно путем

очистки бомбардировкой ионами аргона. Данный эффект полезен для работы насоса на стенде, где нет требований к спектру остаточных газов, но в ускорителях заряженных частиц (частицы движутся с релятивистскими скоростями), время жизни пучка обратно пропорционально квадрату заряда ядра атома. Поэтому наличие атомов аргона в спектре остаточных газов может привести к уменьшению времени жизни в десятки и даже сотни раз.

Быстрота откачки аргона, криптона и ксенона магниторазрядным насосом также первоначально высока. Как известно, в атмосфере воздуха содержится около 1% аргона, в то время как криптон и ксенон используются для напыления геттерных пленок внутри вакуумных камер, а также для замены вакуумных камер с данным покрытием для предотвращения пассивации других камер с геттерным покрытием. Как и гелий, эти газы откачиваются благодаря абсорбции ионов катодом. Когда катод насыщается, быстрота откачки падает до малой величины, составляющей примерно 1% быстроты откачки воздуха [72]. Длительная, стабильная откачка тяжелых инертных газов происходит в основном на катодах, но порядка 20% аргона приходится на анод [70]. При этом могут происходить периодические глубокие изменения давления (рисунок 3.3).

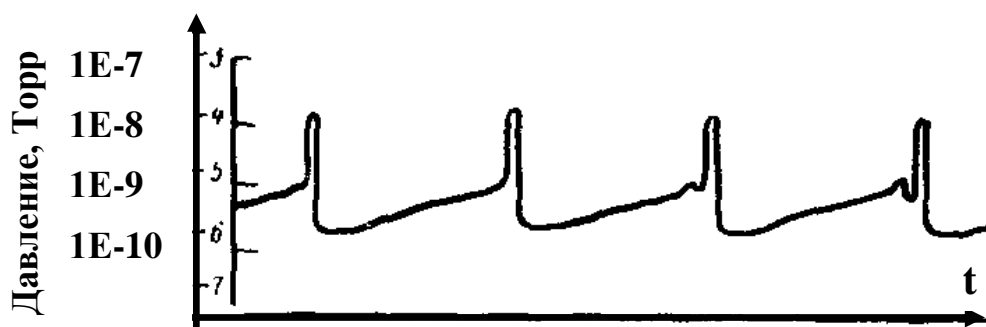


Рисунок 3.3. Пример зависимости давления от времени при аргонной нестабильности [70]

Причину данного явления можно объяснить следующим образом:

Ионы аргона (криптона, ксенона), бомбардирующие поверхности катода, нейтрализуются и отскакивают, сохраняя часть своей энергии. Затем они могут

достигать, не подвергаясь влиянию магнитных или электрических полей, анода, стенок насоса или других частей катода [72].

Высокий коэффициент ионной бомбардировки в центре стандартной ячейки Пеннинга приводит к постепенной эрозии материала катода.

Ранее откаченные молекулы аргона резко и внезапно высвобождаются после того, как насос удалил относительно большое количество аргона, давление в системе увеличивается, затем происходит откачка высвободившегося аргона. Этот цикл повторяется многократно.

3.1.3. Диодный насос с улучшенной быстротой откачки по инертным газам

Как было отмечено выше, установившийся процесс откачки инертных газов происходит в таких областях катодов, где внедрение ионов доминирует над обратным (вторичным) распылением. Ясно, что расширение этих областей должно привести к увеличению скорости откачки аргона и других тяжелых инертных газов. Первым признаком возросшей скорости откачки по аргону является устранение аргонной нестабильности.

Одно из решений данной проблемы состоит в том, чтобы увеличить количество ионов газа, которые «отскакивают» как нейтральные и погружаются в анод или корпус насоса, где они навсегда «замуровываются» распыленным поверх геттером. Вероятность отражения зависит от соотношения масс ионов и материала катода, а также от угла падения падающих ионов на поверхность катода.

Когда ион бомбардирует поверхность титанового катода и теряет большую часть кинетической энергии, то ион поглощается в решеточной структуре объемного материала. Проникающая сила отраженных нейтральных молекул может быть увеличена, если, например, один из титановых катодов заменить танталовым катодом (рисунок 3.4а). Тантал также является химически активным материалом, но с очень большой атомной массой ($Ta = 181$ а.е.м., $Ti = 48$ а.е.м.). Количество упругих столкновений увеличивается, когда ион попадает на танталовую поверхность. Нейтрализованный и отраженный ион теперь сохраняет

большую часть своей первоначальной кинетической энергии и может быть зарыт глубоко в стенку анода или насоса. Для этого типа насоса, коммерчески называемого «Noble diode pump» или «дифференциальный ионный (DI) насос», наблюдаются более высокие скорости откачки благородных газов, порядка $10 \div 30\%$ от скорости откачки воздуха в стабильных условиях [70], [73].

Однако при одинаковой конфигурации ячеек Пеннинга общий коэффициент распыления титана и тантала уменьшается, что, в свою очередь, приводит к снижению общей скорости откачки магниторазрядного насоса (обычно на 15% по азоту) по сравнению со стандартным диодом.

Другим подходом к увеличению количества отраженных ионов является конструкция электродного блока с «щелевыми катодами». В стандартном диодном насосе ионы бомбардируют катод приблизительно перпендикулярно поверхности.

С щелевым катодом (рисунок 3.4б) можно получить более благоприятные углы падения, то есть вероятность отражения и коэффициент распыления катодного материала будут намного выше при скользящем падении, чем при нормальных углах падения. Скорость откачки аргона может достигать 5–10 % от скорости откачки воздуха, является достаточно стабильной и приводит к более высокой производительности насоса для активных газов.



Рисунок 3.4. Магниторазрядный насос «Noble» диодного типа: а) - Ti и Ta катоды; б) - «щелевые» катоды [72]

3.1.4. Триодный тип насоса

Общий вид магниторазрядного насоса триодного типа показан на рисунке 3.5.

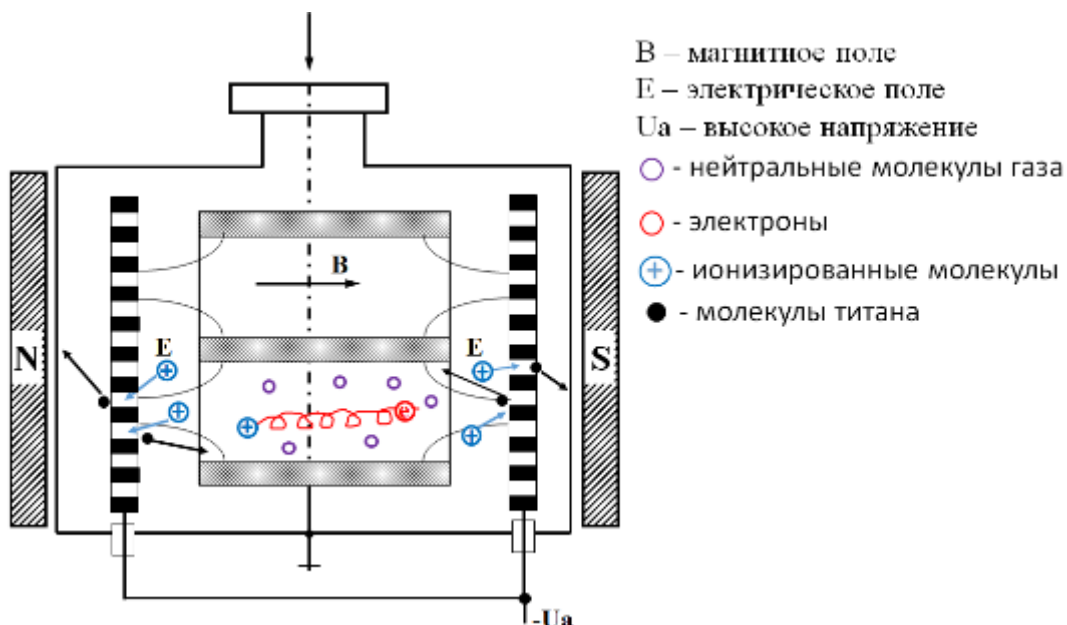


Рисунок 3.5. Общий вид магниторазрядного насоса триодного типа [74]

Он состоит также из анода, катода в виде сеточной или звездочной структуры с меньшим, чем у анода, размером ячеек и третьего электрода, которым обычно является корпус самого насоса. Анод и корпус насоса находятся под нулевым потенциалом. На катод подается отрицательное напряжение от -3 до -7 кВ. Катод изготавливается из титана, а насос и анод - из нержавеющей стали.

С точки зрения механизма откачки отличие триодного насоса от диодного заключается в том, что значительная часть положительных ионов попадает на катод под скользящими углами, что увеличивает распыление титана. Основная масса титана осаждается на стенках насоса и покрывает атомы инертных газов, попадающие на его поверхность. У современных триодных насосов быстрота действия по азоту составляет $40 \div 50\%$ от быстроты действия по азоту. Еще одним преимуществом триодного насоса над диодным является тот факт, что газ, поглощенный титаном, напыленным на стенку насоса, не десорбируется за счет разряда Пеннинга поскольку ограничен пространством «анод-катод».

3.2. Описание конкретных моделей магниторазрядных насосов

В данной работе исследовались магниторазрядные насосы разных производителей (ИЯФ СО РАН, АО «Катод» и ООО «Призма»).

Магниторазрядные насосы (VINP #1 ÷ VINP #6) производства ИЯФ СО РАН (рисунок 3.6) относятся к диодному типу. Диаметр анодной ячейки составляет 12 мм, либо 7,6 мм. Длина ячейки - либо 14 мм, либо 10 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 4 мм или 6 мм, а количество таких ячеек - 36 шт (для диаметра 12 мм) или 95 шт (для диаметра 7,6 мм). Полный размер анодного блока: ширина - 120 мм, длина - 54 мм. Величина магнитной индукции - или 0,12 Тл, либо 0,28 Тл. Катодом являются титановые пластины толщиной 1 мм каждая. Титан марки VT1-0 или VT1-00 [75].



Рисунок 3.6. Диодный магниторазрядный насос с сильным магнитным полем производства ИЯФ СО РАН [75]

Завод АО «Катод» предоставил насосы немного иной конструкции. Диодный тип имеет диаметр анодной ячейки 16 мм. Длина ячейки - 20 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 5 мм, а количество таких ячеек - 32 шт. Полный размер анодного блока: ширина - 120 мм, длина - 60 мм. Величина магнитной

индукции - 0,12 Тл. Катодом являются титановые пластины толщиной 2 мм. Недостатком ячеек с диаметром, равным 16 мм, является то, что максимум быстроты откачки приходится в области давления около 10^{-6} Торр, в то время как для получения сверхвысокого вакуума предпочтительно иметь максимум при более низком вакууме.

Другой тип насоса АО «Катод» - это магниторазрядный насос триодного типа так называемого «StarCell» (НМТ-К-0,04 и НМТ-К-0,02), а также диодный насос НМД-К-0,02 и Noble диодный – НМД-К-0,02-Ti50+Ta50. Изображения триодных насосов показаны на рисунках 3.7, 3.8. Диаметр анодной ячейки 20 мм. Длина ячейки - 25 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 5 мм, а количество таких ячеек - 33 шт для НМТ-К-0,04 и 23 шт для НМТ-К-0,02. Полный размер анодного блока: ширина - 120 мм для НМТ-К-0,04 или 80 мм для НМТ-К-0,02, длина в обоих случаях - 80 мм. Величина магнитной индукции - 0,12 Тл. Каждый катод состоит из сваренных между собой титановых пластин толщиной 1,5 мм с выдавленными двенадцатью «ребрами» под углом 30° относительно друг друга (см. рисунок 3.9) [74].

Габариты диодных насосов идентичны триодному, отличие только в катодах. Если в диодном насосе оба катода изготовлены в виде пластин из титана, то в Noble диодном насосе – один катод из титана, другой из тантала.

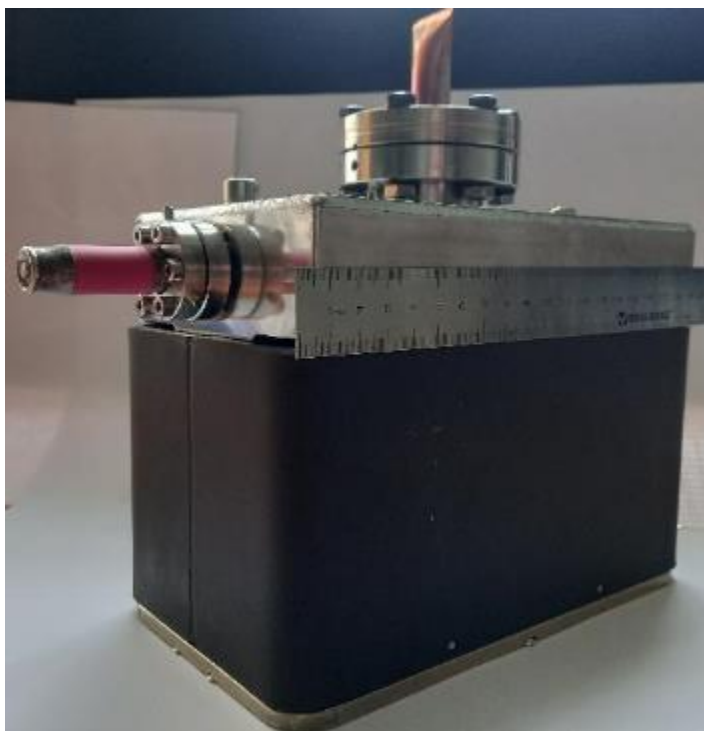


Рисунок 3.7. Изображение триодного насоса НМТ-К-0,04, АО «Катод»



Рисунок 3.8. Изображение триодного насоса НМТ-К-0,02, АО «Катод»



Рисунок 3.9. Электродный блок с катодами в виде «StarCell» [74]

Триодный насос производства ООО «Призма» НМТР-20 (рисунок 3.10) имеет диаметр и длину анодной ячейки аналогичные триодному насосу фирмы АО «Катод». Но зазор между анодом и катодом составляет 4 мм, а количество ячеек - 23 шт. Полный размер анодного блока: ширина - 90 мм, длина - 100 мм, величина магнитной индукции - 0,12 Тл. Каждый катод представляет из себя сваренные между собой титановые пластины толщиной 1,0 мм в виде «жалюзи» под углом 10° к торцу катода. Более подробно основные параметры всех магниторазрядных насосов представлены в таблице 3.1.

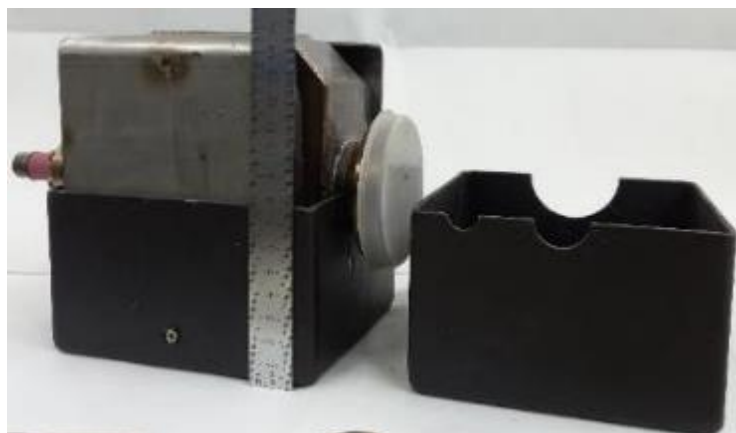


Рисунок 3.10. Изображение триодного насоса НМТР-20, ООО «Призма»

3.3 Теоретический расчет быстроты откачки

Поскольку быстрота действия магниторазрядных насосов прямо пропорциональна току разряда $S \sim I$, то при выборе тех или иных параметров насосов (длина и диаметр анодной ячейки, зазора между анодом и катодом и т.д.) и представляется довольно трудоемким и дорогостоящим непосредственное измерение быстроты откачки насосов, то целесообразно провести предварительные теоретические расчеты быстроты откачки для каждого типа насоса. Многие работы, посвященные теории разряда Пеннинга при выводе аналитических формул зависимости быстроты откачки от параметров разряда, исходят из постоянства величины отрицательного объемного заряда при изменении давления, а, следовательно, и интенсивности разряда, что не подтверждается экспериментом, особенно в области сверхвысокого вакуума (при давлениях $10^{-10} \div 10^{-8}$ Торр).

В работах Малева М.Д. и Трахтенберга Э.М. [76] предложены эмпирические формулы для расчета быстроты действия насоса и минимального рабочего давления. Однако, в этих эмпирических формулах также не учитывается влияние объемного заряда на величину разрядного тока по мере изменения давления, а, следовательно, на быстроту действия (особенно в области сверхвысокого вакуума). При этом сами авторы дают точность расчетов для быстроты откачки $\pm 20\%$, а для минимального давления - полпорядка величины. Таким образом, с хорошей достоверностью применить предложенную методику расчета не представляется возможным.

Несмотря на многочисленные попытки и наших, и зарубежных теоретиков и специалистов создать строгую законченную теорию разряда с осциллирующими электронами (разряда Пеннинга), отражающую действительную картину явлений в разряде, такой общей теории разряда, с помощью которой можно было бы рассчитывать зависимости разрядного тока от физических параметров в широком диапазоне давлений, к сожалению, не существует.

Это объясняется сложностью процессов, происходящих в разряде, существованием различных форм разряда, сильно отличающихся друг от друга величиной и распределением отрицательного объемного заряда, изменением средней энергии ионов и их распределением по поверхности катода, изменением вторично-эмиссионных процессов по мере изменения давления остаточных газов.

Таблица 3.1. Основные параметры магниторазрядных насосов

Название насоса	Диаметр ячейки (d), мм	Длина ячейки (h), мм	Зазор между анодом и катодом (b), мм	Габариты анодного блока (a/l), мм	Кол-во ячеек	Магнитное поле (B), Тл	Напряжение (Ua), кВ	Тип насоса
BINP #1	12	14	4	120/54	36	0,12	4,0	Диод
BINP #2	12	14	4	120/54	36	0,28	4,0	Диод
Катод	16	20	5	120/60	32	0,12	4,0	Диод
BINP #3	7,6	14	4	120/54	95	0,12	4,0	Диод
BINP #4	7,6	14	4	120/54	95	0,28	4,0	Диод
BINP #5	7,6	10	6	120/54	95	0,12	4,0	Диод

Продолжение таблицы 3.1

Название насоса	Диаметр ячейки (d), мм	Длина ячейки (h), мм	Зазор между анодом и катодом (b), мм	Габариты анодного блока (a/l), мм	Кол-во ячеек	Магнитное поле (B), Тл	Напряжение (Ua), кВ	Тип насоса
ВІNP #6	7,6	10	6	120/54	95	0,28	4,0	Диод
ВІNP #7	7,6	10	4	120/54	95	0,12	4,0	Диод
ВІNP #8	7,6	10	4	120/54	95	0,28	4,0	Диод
НМТ- К-0,04	20	25	5	185/80	33	0,12	4,0	StarCell
НМТ- К-0,02	20	25	5	129/80	23	0,12	4,0	StarCell
НМД- К-0,02	20	25	5	129/80	23	0,12	4,0	Диод
НМД- К- 0,02- Ti50+ Ta50	20	25	5	129/80	23	0,12	4,0	Noble Диод
НМТР -20	20	25	4	90/110	23	0,12	4,0	Триод

Тем не менее, для расчетов быстроты откачки одной ячейки использовались формулы, применяемые не только отечественными специалистами [77], но и зарубежными [78]. В таблице 3.1 приведены основные параметры тестируемых магниторазрядных насосов.

Теоретические значения быстроты откачки найдены следующим образом при:

$$\text{а) } B_z \leq B \leq 2B_z$$

$$S = 1,56 \cdot 10^9 \cdot \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot P}{1 + 4 \cdot 10^6 \cdot P} \right) \cdot P^{0,2} \cdot h \cdot d^2 \cdot B_z \cdot (B - B_z), \quad (3.1)$$

где S – быстрота действия одной ячейки по азоту, л/с; P – давление, Торр; h – высота анодной ячейки, м; d – диаметр анодной ячейки, м; B – магнитное поле, Тл; B_z – пороговая величина магнитного поля, соответствующая «зажиганию» газового разряда, Тл: $B_z = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{d}$.

$$\text{б) } 2B_z \leq B \leq B_{\max}$$

$$S = 3,9 \cdot 10^{10} \cdot \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot P}{1 + 4 \cdot 10^6 \cdot P} \right) \cdot P^{0,2} \cdot h \cdot d^2 \cdot B^2, \quad (3.2)$$

где B_{\max} – максимальное магнитное поле, при котором достигается максимальная быстрота откачки ячейки, Тл, и может быть найдена как:

$$B_{\max} = \frac{15,26 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{U_a}}{d \cdot P^{0,05}}, \quad U_a - \text{высокое напряжение, подаваемое на ячейку Пеннинга, В.}$$

В.

$$\text{в) } B \geq B_{\max}$$

$$S = 9,1 \cdot 10^{-2} \cdot \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot P}{1 + 4 \cdot 10^6 \cdot P} \right) \cdot P^{0,1} \cdot h \cdot U_a \cdot \left(1 - \frac{1,05 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{(B - B_{\max}) \cdot d \cdot P}}{U_a} \right), \quad (3.3)$$

Полная быстрота откачки всего насоса может быть найдена как:

$$S_n = S \cdot N, \quad (3.4)$$

где S_n – полная быстрота откачки насоса, л/с, N – число ячеек.

Как видно из рисунка 3.11, чем меньше диаметр анодной ячейки, тем больше должна быть максимальная величина магнитного поля. Для ячеек диаметром больше 12 мм достаточно иметь магнитное поле в центре ячейки равное 0,12 Тл, а для ячеек диаметром 8 мм уже требуется 0,3 Тл при давлении 10^{-7} Торр, которое соответствует требуемой максимальной быстроты откачки по азоту.

На рисунке 3.12 представлен расчет быстроты откачки одной ячейки от давления. В действительности, уже при давлении около 10^{-6} Торр происходит частичный разогрев насоса, вследствие чего существенно снижается быстрота откачки насоса, а при давлении выше 10^{-5} Торр может уменьшиться до нуля.

Для работы магниторазрядных насосов при давлениях запуска, т.е. $10^{-6} \div 10^{-5}$ Торр, характерна неустойчивость, связанная с сильным влиянием нагрева катода разрядным током на быстроту откачки насоса. Причина этого процесса определяется цепочкой взаимосвязанных факторов: нагрев катода и стимулированное газовыделение с его поверхности, что в свою очередь приводит к росту давления. Рост давления влечет за собой рост разрядного тока и повышение температуры. Цикл повторяется до тех пор, пока нагрев насоса не приведет к предельному току разряда насоса и паданию напряжения до нуля.

Зависимость быстроты откачки одной ячейки от диаметра данной ячейки показана на рисунке 3.13. Легко можно заметить, что чем больше диаметр анодной ячейки, тем больше скорость откачки. Но нужно помнить, что в насосе располагается не одна ячейка, а десятки и даже сотни. Рассмотрим случай магниторазрядных насосов производства ИЯФ СО РАН. При диаметре ячеек, равном 12 мм, можно разместить не более 36 шт таких ячеек, тогда суммарная быстрота действия насоса (в упрощенном виде) будет порядка 36 л/с (рисунок 3.12), в то время как ячеек диаметром 7,6 мм может быть расположено до 95 шт, а значит быстрота откачки такого насоса будет около 50 л/с, что повышает быстродействие насоса примерно на 40% по сравнению с первым вариантом либо позволяет уменьшить габариты насоса при сохранении данной (36 л/с) быстроты откачки.

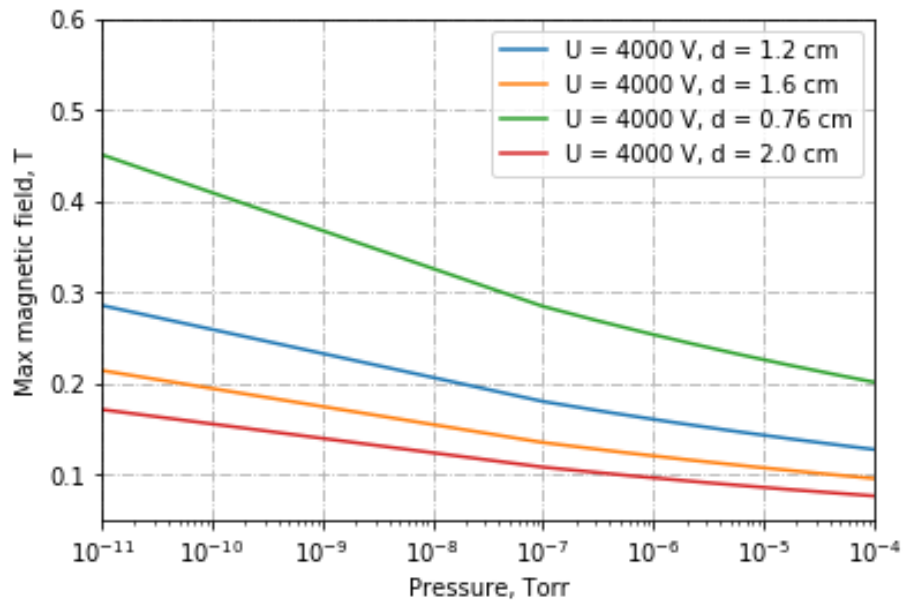


Рисунок 3.11. Определение максимального магнитного поля для различных значений диаметра анодной ячейки

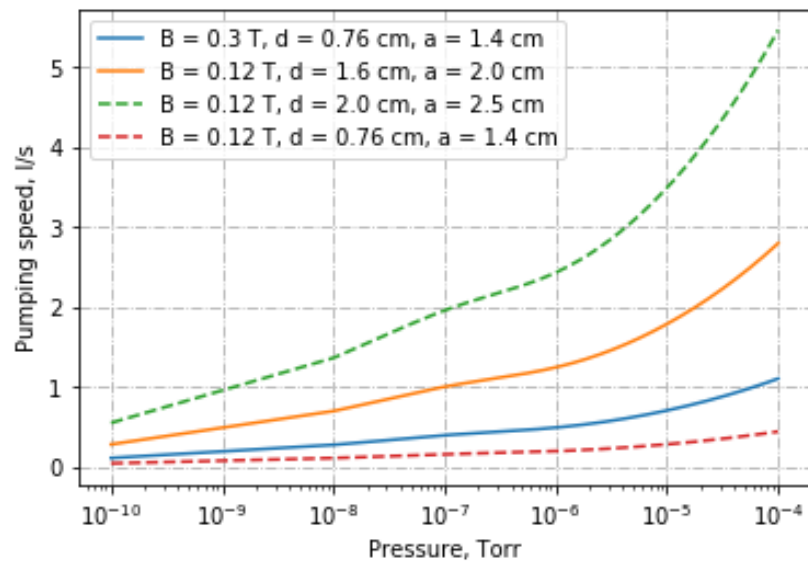


Рисунок 3.12. Теоретические быстроты откачки одной ячейки в зависимости от давления для различных магнитных полей и геометрии анодных ячеек

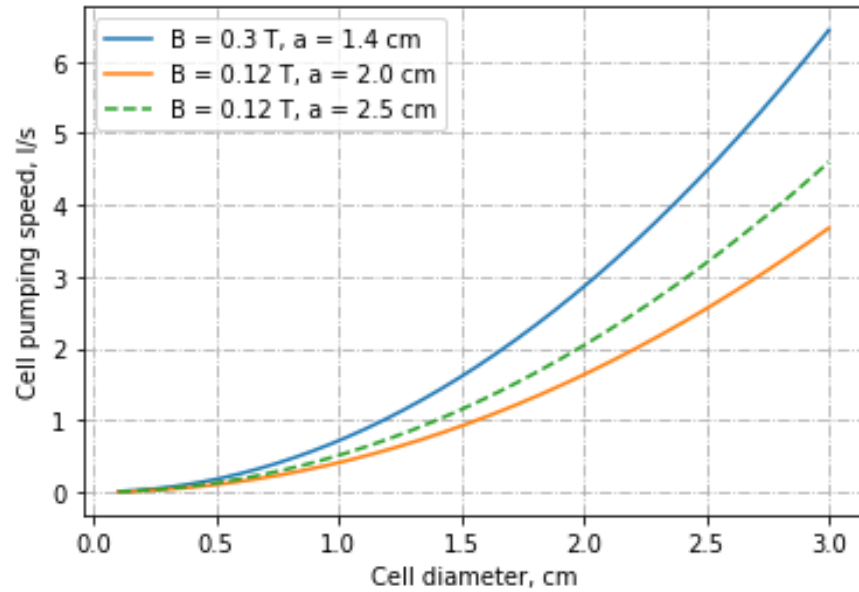


Рисунок 3.13. Зависимости быстроты откачки (расчет) одной ячейки от диаметра анодной ячейки для различных магнитных полей и длины анодных ячеек

Необходимо также помнить про зазор между анодом и катодом, который существенно уменьшает эффективную быстроту откачки насоса.

На рисунке 3.14. представлена схема магниторазрядного насоса, где показаны все размеры, необходимые для расчета его эффективной быстроты откачки.

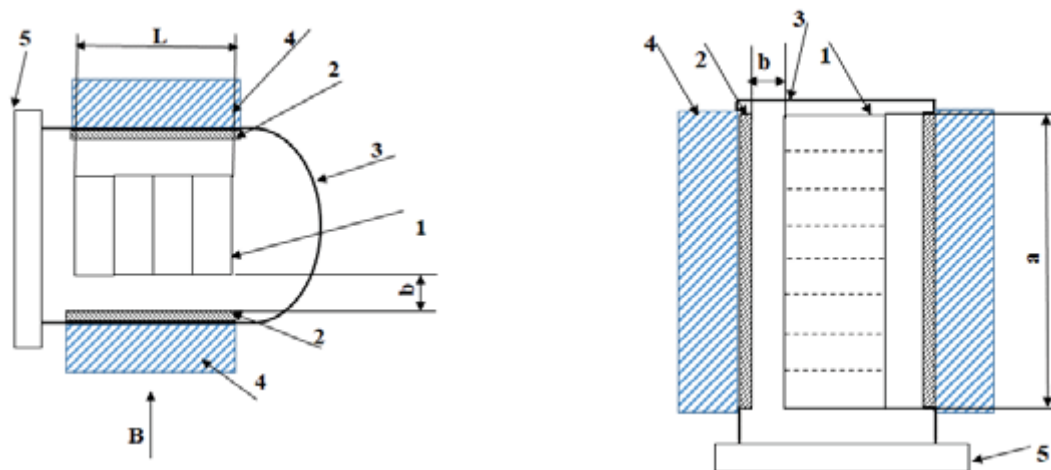


Рисунок 3.14. Схематическое изображение магниторазрядного насоса. 1 – анод, 2 – катоды, 3 – корпус насоса, 4 – магнит, 5 – входной фланец, В - магнитная индукция [75]

В итоге, эффективная быстрота откачки может быть найдена как:

$$S_{eff} = \sqrt{Sn \cdot U} \cdot th\left(\sqrt{\frac{Sn}{U}}\right). \quad (3.5)$$

где S_{eff} – эффективная быстрота откачки насоса, л/с; U – молекулярная проводимость канала (зазора между анодом и катодом), л/с.

$$U = 3,64 \cdot \frac{a^2 \cdot b}{l} \cdot \ln \frac{l}{a} \sqrt{T/M} \text{ [л/с]} \quad (3.6)$$

Подробный расчет молекулярной проводимости отверстия произвольной формы, а также частные случаи проводимостей для круглого трубопровода и узкого прямоугольного канала описаны в Приложении 1. Вывод формулы (3.5) представлен в Приложении 2.

Теоретические расчеты были подтверждены прямыми измерениями зависимостей быстроты откачки и тока разряда от давления, выполненные на вакуумном стенде.

3.4. Стенд для измерения быстроты откачки магниторазрядных насосов

Стенд для вакуумных испытаний магниторазрядных насосов представлен на рисунке 3.15 и выполнен в соответствии с Международным стандартом ISO DIN 3556 [79]. Установка содержит два вакуумных объема: в первом устанавливается испытываемый насос *SIP*, во втором происходит напуск газа. Диаметр D каждого вакуумного объема равен 150 мм, а длина - $3/2D$ и равняется 225 мм. Измерители вакуума устанавливаются на расстоянии $1/2D$ от верхнего фланца в каждом объеме.

В каждой части установки имеется по одному датчику давления с горячим катодом типа Extractor (*IG1* или *IG2*), способных проводить измерения в диапазоне давлений от $2 \cdot 10^{-12}$ Торр до 10^{-5} Торр и датчику давления с холодным катодом (*CG1* или *CG2*), работающих в диапазоне давлений от 10^{-11} Торр до 10^{-5} Торр. Масс-спектрометр *RGA* необходим для контроля напускаемого газа и спектра

остаточных газов, который установлен в объеме с исследуемым магниторазрядным насосом.

Входной фланец для инъекции газа располагается на расстоянии $1/2D$ относительно верхнего фланца вакуумного объема. Внутренняя трубка имеет диаметр 8 мм и длину $1/2D$ и направлена в сторону нижнего фланца, как показано на рисунке 3.15. Напуск газа осуществляется через прогреваемый цельнометаллический ручной щелевой натекатель фирмы Varian (не показан на рисунке 3.15).

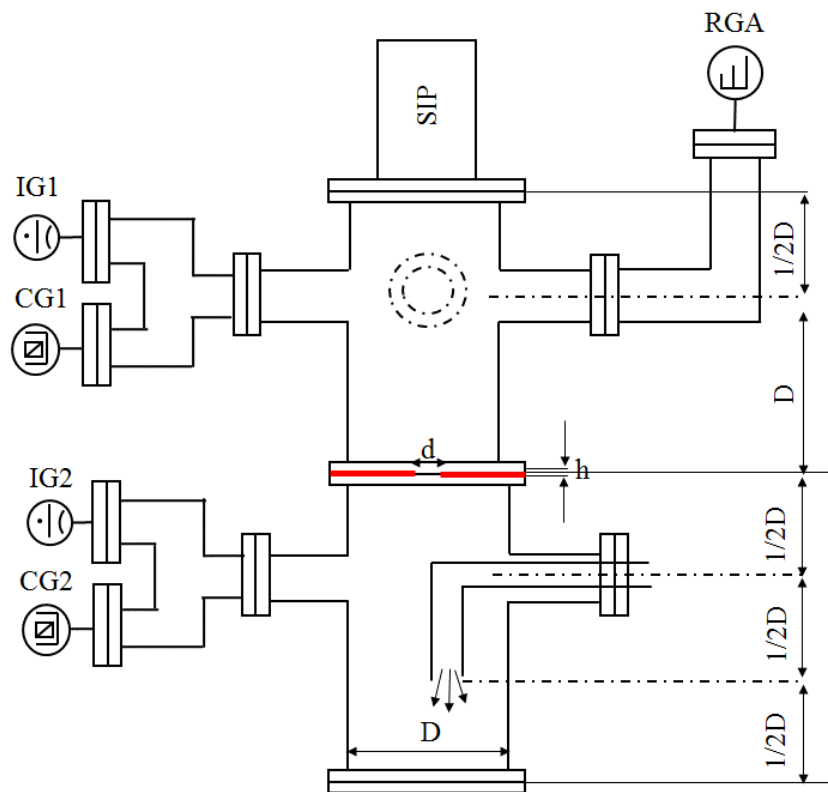


Рисунок 3.15. Стенд для вакуумных испытаний магниторазрядных насосов [79]

Предварительная откачка осуществляется через цельнометаллический ручной угловой клапан Ду 63 с фланцами типа Conflat, последовательно соединенными с турбомолекулярным насосом с быстротой откачки 80 л/с по азоту и форвакуумным спиральным насосом с быстротой откачки $10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Поток газа, откачиваемый насосом, находится методом двух датчиков давления через канал с известной молекулярной проводимостью:

$$Q = C \cdot (P_2 - P_1), \quad (3.7)$$

где Q – поток газа, поступающего к исследуемому насосу, л·Торр/с; P_2 – давление в вакуумном объеме, куда поступает газ, Торр; P_1 – давление в вакуумном объеме с исследуемым насосом, Торр; C – теоретически вычисленная молекулярная проводимость отверстия, л/с.

Молекулярная проводимость подбирается таким образом, чтобы перепад давлений составлял примерно один порядок. В данном случае через отверстие круглого сечения с диаметром, равным 6 мм и толщиной- 3 мм.

Для того чтобы гарантировать молекулярный режим течения газа через отверстие, давление в вакуумном объеме, где инжектируется газ, P_2 не должен превышать значения [79]:

$$P_{2,\max} = \frac{3,76 \cdot 10^{-3}}{d}, \text{Торр}$$

где d – диаметр отверстия, мм.

С учетом коэффициента Клаузинга молекулярная проводимость отверстия C равняется 2,21 л/с для азота и 1,84 л/с для аргона. В Приложении 1 приводится детальный расчет молекулярной проводимости.

Быстрота откачки магниторазрядного насоса может быть вычислена как:

$$S = \frac{C \cdot (P_2 - P_1)}{P_1}, \quad (3.8)$$

где S – быстрота откачки насоса, л/с; C – молекулярная проводимость отверстия круглого сечения, л/с; P_1 и P_2 – давление в верхнем и нижнем вакуумных объемах во время инъекции газа, соответственно, Торр.

Если же измерение быстроты откачки происходит вблизи предельно достижимого в системе вакуума, то измеренное значение может отличаться от истинного в несколько раз. Тогда истинное значение быстроты откачки вблизи предельного вакуума можно найти:

$$S = S_{\text{ист}} \cdot \left(1 - \frac{P_{1,\text{пред}}}{P_1} \right), \quad (3.9)$$

где S – быстрота откачки насоса вблизи предельного вакуума в верхнем вакуумном объеме, вычисленная согласно (3.8), л/с; $S_{ист}$ – «истинная» быстрота откачки насоса, л/с; P_1 – давление в верхнем вакуумном объеме во время инъекции газа, Торр; $P_{1,пред}$ – предельное давление в верхнем объеме до инъекции газа, Торр.

Тогда «истинная» быстрота откачки определяется:

$$S_{ист} = S \cdot \left(\frac{P_1}{P_1 - P_{1,пред}} \right), \quad (3.10)$$

3.5. Калибровка датчиков давления и квадрупольного масс-спектрометра

Точность измерения быстроты откачки напрямую связана с достоверностью измерения датчиков давления относительно друг друга, т.е. одинаковостью значений. Для этого после прогрева при температуре $350 \div 400$ °С и до включения магниторазрядного насоса была проведена проверка относительной чувствительности всех датчиков давления и RGA между собой, для того чтобы убедиться в корректности будущих измерений. Оба вакуумных объема (рисунок 3.15) «отсекаются» от внешних средств откачки путем закрытия цельнометаллического углового клапана, таким образом в обоих объемах устанавливается равновесное давление, которое ухудшается за счет десорбции газа со стенок вакуумных объемов.

Калибровка масс-спектрометра выполнялась при выключенном магниторазрядном насосе, откачка системы осуществлялась при помощи турбомолекулярного насоса.

На рисунках 3.16 и 3.17 представлены относительные калибровочные значения для датчиков давления и масс-спектрометра относительно друг друга, соответственно. Измерения масс-спектрометра сильно нелинейны относительно датчиков давления. Выполнить калибровку масс-спектрометра по аргону не

представляется возможным, т.к. для того, чтобы добиться превышения аргона над водородом, которого в прогретой вакуумной системе больше, необходимо хотя бы на порядок ухудшить давление в системе до 10^{-5} Торр, т.е. почти верхнее предельное значение при измерении быстроты откачки магнитоэридного насоса, а также верхний предел режима работы масс-спектрометра.

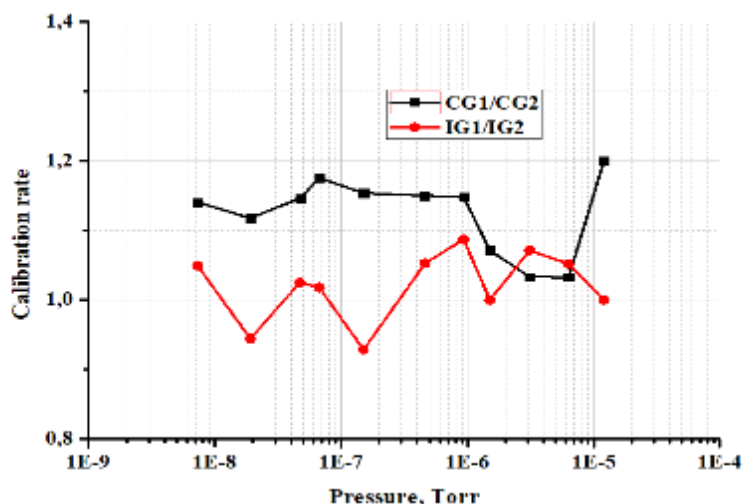


Рисунок 3.16. Относительные калибровочные зависимости показаний датчиков давления с холодным и горячим катодами

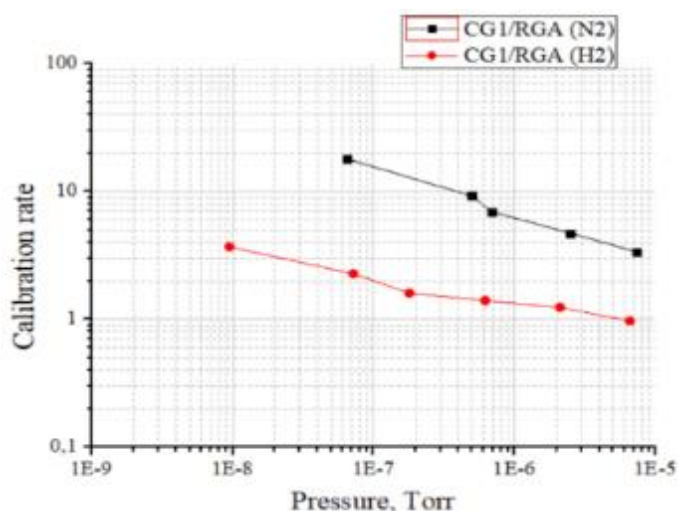


Рисунок 3.17. Калибровочные зависимости показаний масс-спектрометра относительно показаний датчика давления с холодным катодом по азоту и водороду

3.6. Влияние спектра остаточных газов на быстроту откачки магниторазрядного насоса

На быстроту откачки магниторазрядного насоса влияют не только геометрические размеры электродного блока (диаметр и длина анодной ячейки, зазор между анодом и катодом, величина магнитного поля и т.д.) или напряжение, подаваемое на анод или катод, но также и спектр остаточных газов.

В прогретой вакуумной системе доминирующими газами являются водород, содержание которого составляет 90%, и монооксид углерода - 10%.

При напуске азота происходит выделение водорода из самого насоса и соотношение «водород/азот» может составлять «2 к 1» или даже больше. Измеренная быстрота откачки насоса меньше реальной, потому что «вычленив» составляющую водорода в измеренном давлении при помощи ионизирующего датчика давления не представляется возможным. Квадрупольный же масс-анализатор фирмы SRS, как видно из рисунка 3.17, обладает сильной нелинейностью как по разным газам, так и в различных диапазонах давления. По мере увеличения потока тестируемого газа данное соотношение уменьшается за счет тренировки поверхности разрядом, и измеренная быстрота откачки насоса становится больше в сравнении с быстротой откачки до тренировки. Поэтому для уменьшения выделения водорода при исследовании магниторазрядных насосов рекомендуются проводить предварительный прогрев вакуумной установки и насоса.

При напуске аргона можно наблюдать аналогичный эффект. Правда, помимо водорода может выделяться и азот, который был поглощен при измерении быстроты откачки насоса по азоту.

Эти эффекты наблюдаются как в отечественных насосах, так и в импортных (фирма Agilent). Разница заключается в том, что в иностранных насосах водород перестает быть доминирующим при давлении примерно 10^{-7} Торр, в то время как у отечественных, из-за менее качественной процедуры очистки составляющих

элементов насоса, уменьшение доли водорода в спектре наблюдается при давлении большем, чем 10^{-6} Торр.

3.7. Экспериментальные результаты измерения быстроты откачки магниторазрядных насосов

Экспериментальные данные были получены в соответствии с методикой, изложенной в Международном стандарте ISO DIS 3556 [79]. Точность измерения определяется погрешностью датчиков давления и равняется $\pm 10\%$ для датчика давления с горячим катодом и $\pm 30\%$ для датчика давления с холодным катодом.

Корпус насоса у BINP#1 и BINP#2 один и тот же, за исключением магнитной системы, которая является съемной частью, и данный насос проработал в ИЯФ более 20 лет на инжекционном комплексе ВЭПП-5, поэтому можно утверждать, что данный насос находится в насыщенном состоянии. Быстрота откачки диодных насосов по аргону составляет около одного процента от максимального значения по азоту, поэтому провести измерения быстроты откачки по аргону для обоих магниторазрядных насосов BINP#1 и BINP#2 с хорошей точностью не представляется возможным. Таким образом, можно измерить только быстроту откачки насоса по азоту в насыщенном состоянии. Экспериментальные результаты зависимости быстроты откачки и тока разряда от давления для магниторазрядных насосов BINP #1 и BINP #2 представлены на рисунке 3.18 и рисунке 3.19, соответственно [74].

Для увеличения быстроты откачки при сохранении габаритов насоса было предложено заменить диаметр анодной ячейки с 12 мм до 7,6 мм, тем самым количество ячеек увеличивается почти в 3 раза. Корпус насоса, а также катоды были взяты из насоса BINP #1, длина ячейки равнялась либо 10 мм, либо 14 мм. Экспериментальные результаты зависимости быстроты откачки по азоту и тока разряда от давления для магниторазрядных насосов с диаметром ячейки меньше 10 мм представлены на рисунке 3.20 и рисунке 3.21, соответственно.

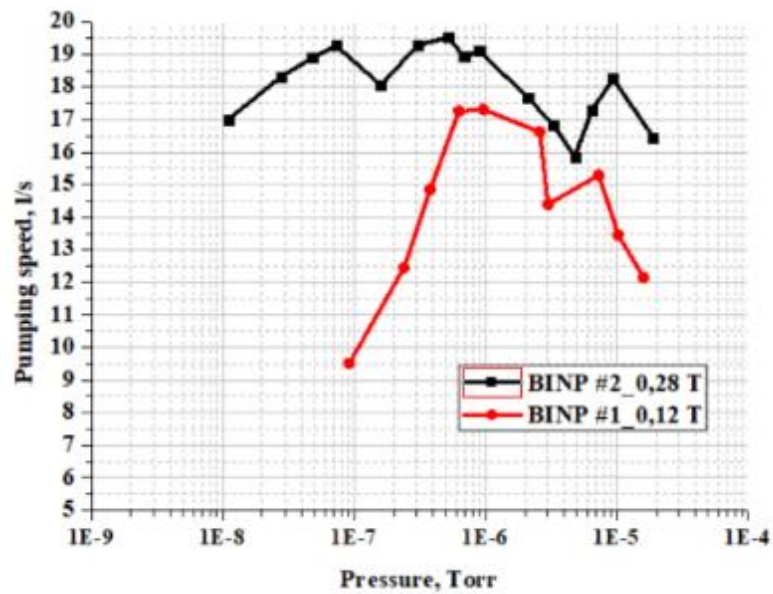


Рисунок 3.18. Зависимости быстроты откачки различных магнетронных насосов с диаметром анодной ячейки 12 мм для азота от давления [75]

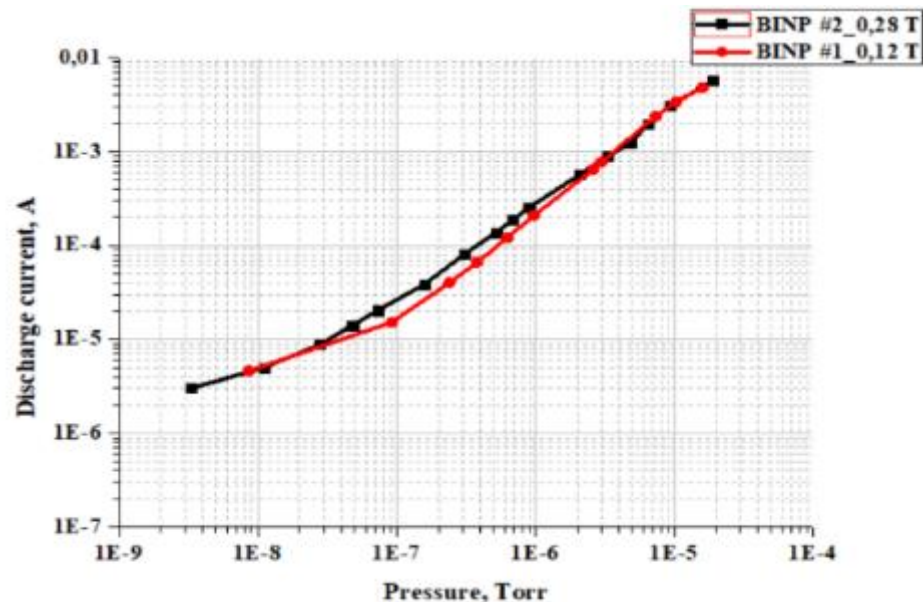


Рисунок 3.19. Зависимости тока разряда в различных магнетронных насосах с диаметром анодной ячейки 12 мм от давления [75]

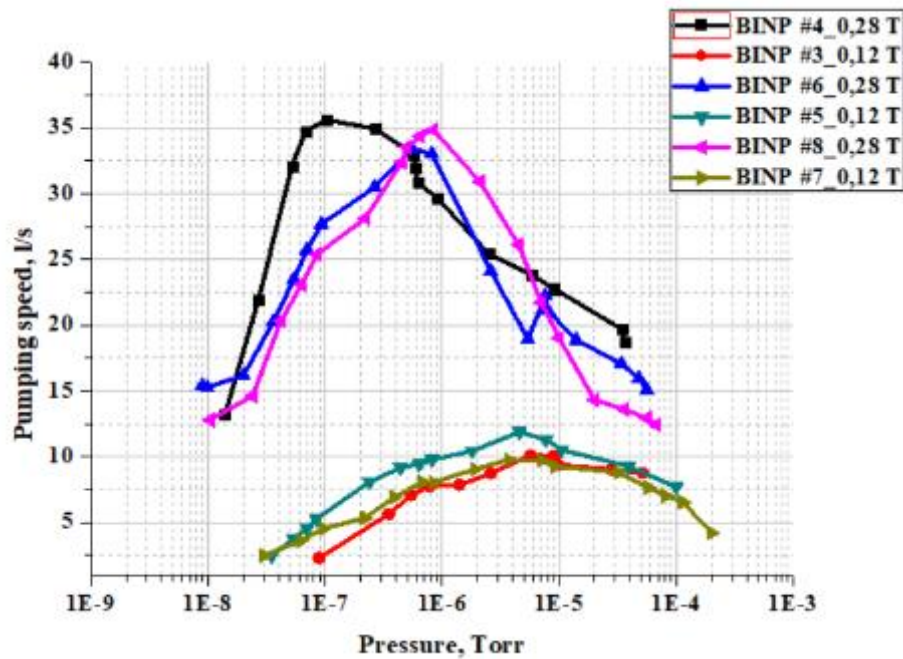


Рисунок 3.20. Зависимости быстроты откачки для различных магниторазрядных насосов по азоту с диаметром анодной ячейки 7,6 мм от давления

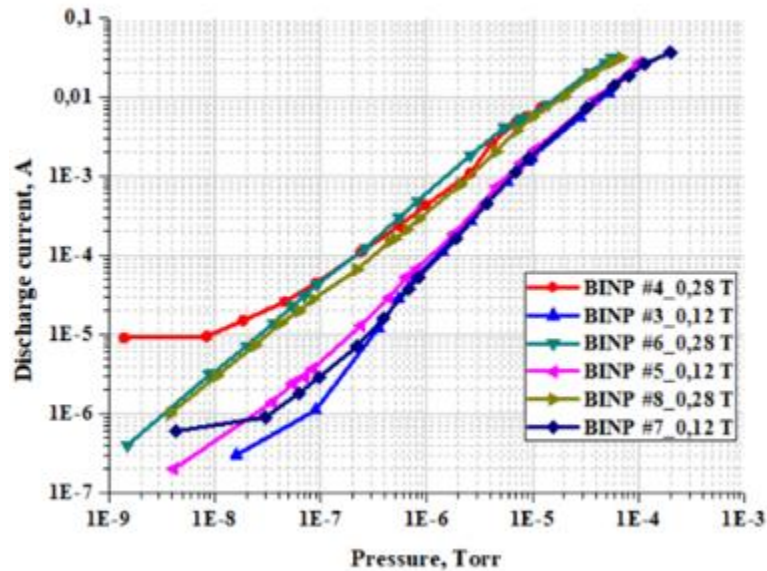


Рисунок 3.21. Зависимости тока разряда для различных магниторазрядных насосов с диаметром анодной ячейки 7,6 мм от давления

Результаты измерения быстроты откачки по азоту и аргону от давления и тока разряда от давления для магниторазрядного насоса НМТР-20 приведены на рисунках 3.22 и 3.23, соответственно.

Магниторазрядный насос является насыщенным, когда поглощается порядка 1,2 л·Торр газа. Как видно из рисунка 3.22, в насыщенном состоянии быстрота откачки по азоту уменьшается примерно на 25%, а для аргона более чем в 2 раза.

Было также замечено, что быстрота откачки насоса по азоту после насыщения не только восстанавливается после напуска аргона, но даже увеличивается. Это связано с тем, что при напуске азота в насос, насыщенный аргоном, ионы азота выбивают поглощенный аргон из катода или анода, при этом аргон, как уже отмечалось не раз, откачивается хуже, чем азот, но при этом коэффициент распыления титана ионами аргона существенно больше, чем у азота. Этим же и объясняется, почему максимум быстроты откачки смещен из области 10^{-6} Торр в область 10^{-7} Торр. Поскольку в области среднего вакуума происходит более быстрая тренировка насоса, ионы аргона быстрее скачиваются. К сожалению, данное свойство непригодно для применения в ускорителях заряженных частиц, т.к. время жизни пучка напрямую зависит от состава остаточного газа. Для частиц с энергией выше 1 ГэВ время жизни пучка будет определяться неупругим рассеянием на ядрах остаточного газа, сечение которого растет, как квадрат заряда ядра атома. Соответственно, при одинаковых давлениях время жизни пучка в аргоне будет почти в 7 раз меньше, чем в азоте.

Экспериментально обнаружено, что при сверхвысоком вакууме быстрота откачки по аргону после насыщения насоса аргоном восстанавливается менее, чем через две недели непрерывной работы насоса, а быстрота откачки по азоту после насыщения аргоном остается такой же.

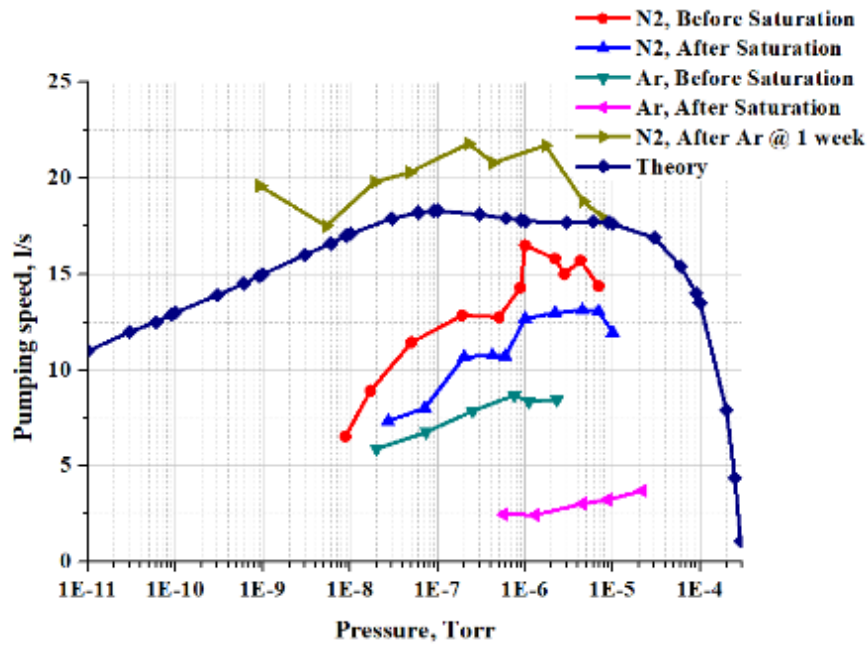


Рисунок 3.22. Зависимости быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТР-20 от давления при различных условиях [74]

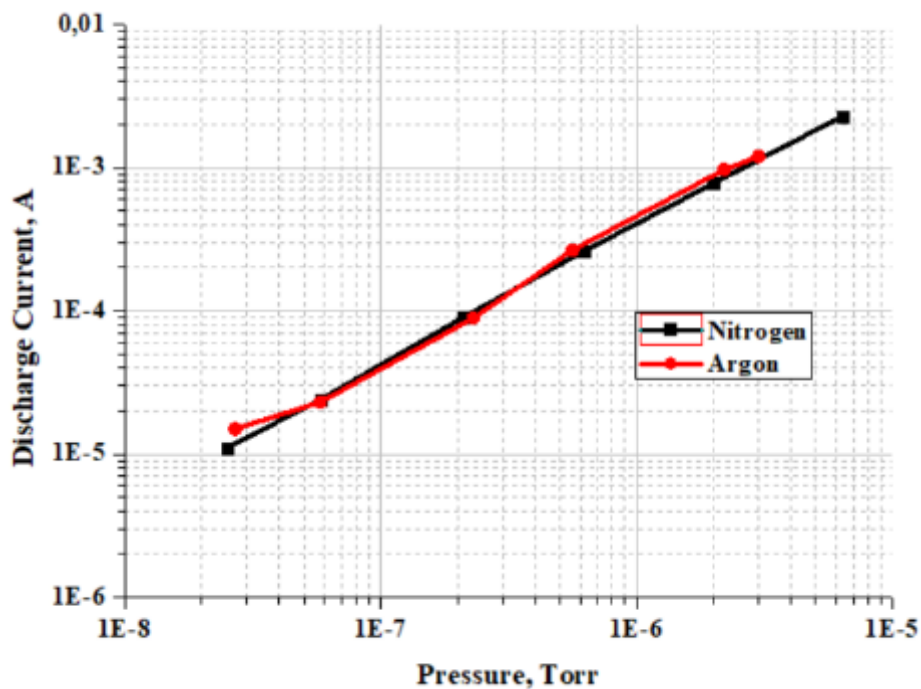


Рисунок 3.23. Зависимости тока разряда магниторазрядного насоса НМТР-20 от давления для азота и аргона [74]

За образец магниторазрядного насоса с быстротой действия 40 л/с был взят насос 45S TiTa Ion Pump, фирмы Gamma Vacuum, но с анодными ячейками

«StarCell». Данные насосы выпускаются с двумя вариантами фланцев: Ду 40, либо Ду 63 типа Conflat, но паспортизируется только максимальное значение быстроты откачки для насоса с фланцем Ду 63, эффективная быстрота откачки насоса с фланцем Ду 40 будет меньше, чем с фланцем Ду 63 за счет уменьшения молекулярной проводимости присоединительного патрубка. Кроме того, необходимо изучить зависимость быстроты откачки насоса и тока разряда во всем диапазоне давления. На рисунке 3.24 и рисунке 3.25 приведены экспериментальные результаты зависимости быстроты откачки по азоту и тока разряда от давления для магниторазрядных насосов с быстротой откачки 40 л/с производства АО «Катод» [74].

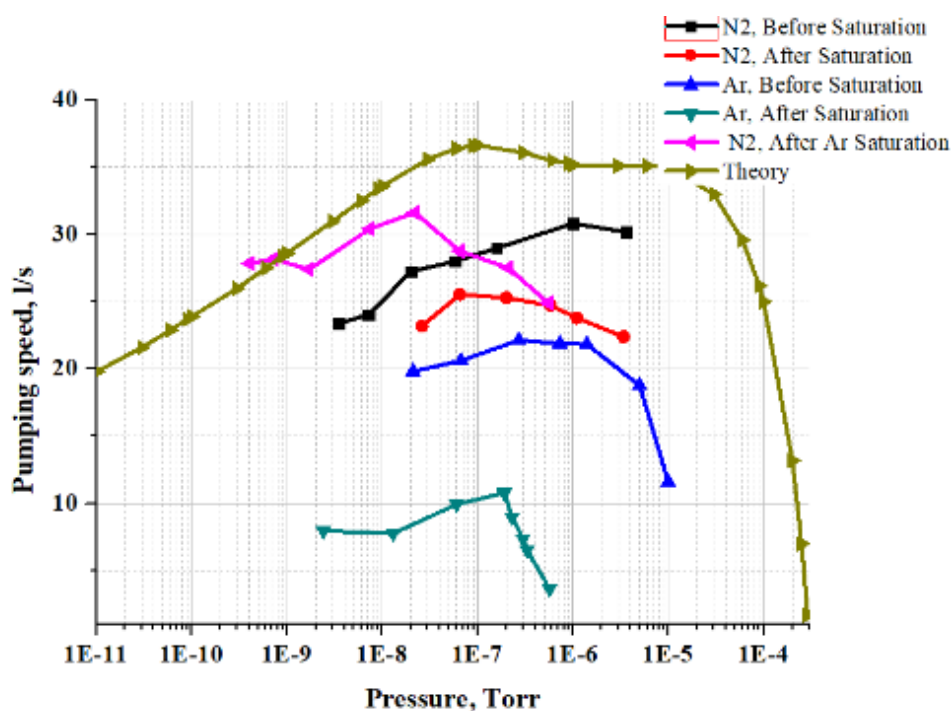


Рисунок 3.24. Зависимость быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТ-К-0,04-СF35 для азота и аргона от давления при различных условиях [74]

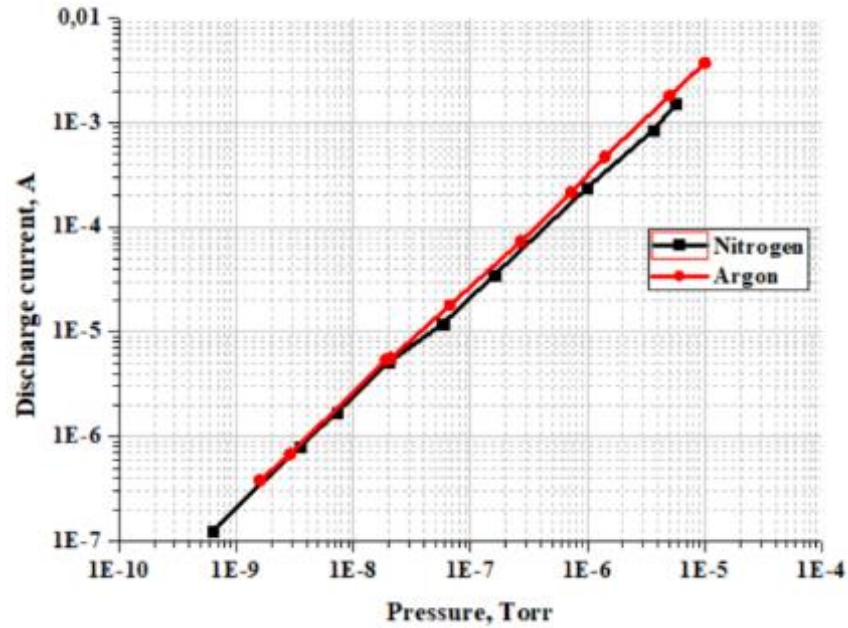


Рисунок 3.25. Зависимости тока разряда магниторазрядного насоса НМТ-К-0,04-CF35 от давления [74]

Ниже проиллюстрированы зависимости быстроты откачки по азоту от давления (рисунок 3.26), быстроты откачки по аргону от давления (рисунок 3.27) и тока разряда от давления (рисунок 3.28) для магниторазрядного насоса НМТ-К-0,02-CF35.

Если же сравнивать насос 45S TiTa фирмы Gamma Vacuum (США) и Vaclon Plus 40 фирмы Agilent (Италия), то быстрота откачки насоса Vaclon Plus 40 составляет 35 л/с за счет больших габаритов насоса, следовательно, можно смело предположить и большего количества ячеек. Но тем не менее эффективная быстрота откачки Vaclon Plus 40 больше, чем у насоса 45S TiTa, всего на 15%, т.к. все определяет молекулярная проводимость соединительного патрубка [80].

Для того, чтобы убедиться в правильности измерений, был протестирован триодный насос с ячейкой «StarCell» Vaclon 20 Plus фирмы Agilent (Италия) [80]. На рисунках 3.29 и 3.30 показаны результаты измерения быстроты откачки насоса и ток разряда в насыщенном состоянии, а также приведены для сравнения значения, взятые с официального сайта фирмы Agilent для данного насоса.

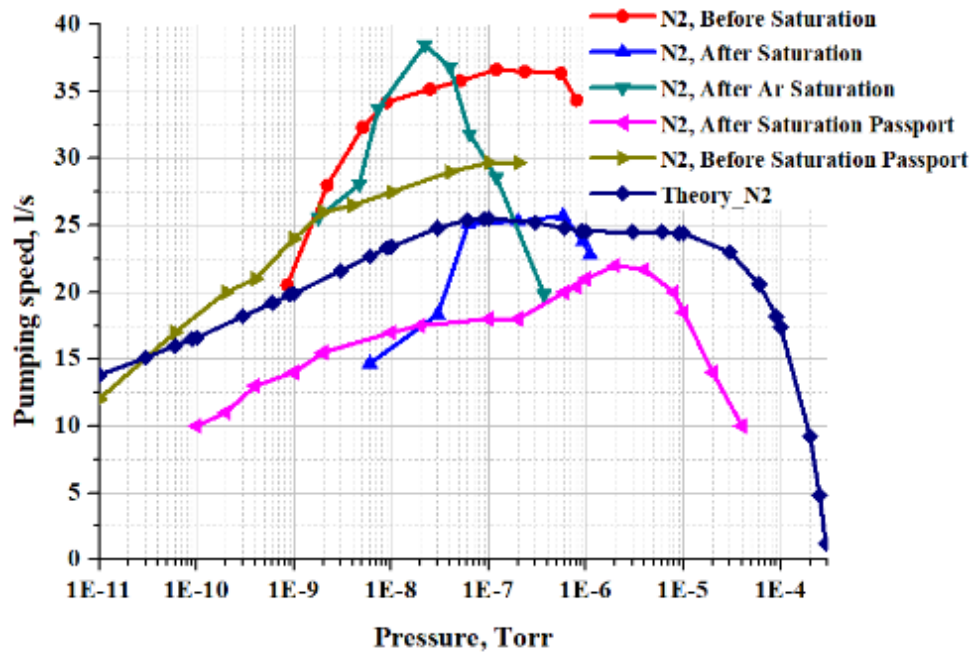


Рисунок 3.26. Зависимость быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТ-К-0,02-СF35 для азота от давления в различных условиях [74]

Измерения в ИЯФ СО РАН выполняются при помощи высоковольтного блока питания ВИП-45 фирмы ООО «НПП Основа» с режимом работы либо -4 кВ, либо -7 кВ, в то время как у фирмы Agilent высоковольтный блок питания 4UHV позволяет работать при -3 кВ, -5 кВ, -7 кВ и способен автоматически переключать напряжения в зависимости от тока разряда, что хорошо заметно на графике зависимости тока разряда от давления (рисунок 3.30). В диапазоне давлений от 10^{-9} Торр до $2 \cdot 10^{-7}$ Торр в Agilent измерения выполнены при -5 кВ, а в ИЯФ СО РАН во всем диапазоне давления при -4 кВ.

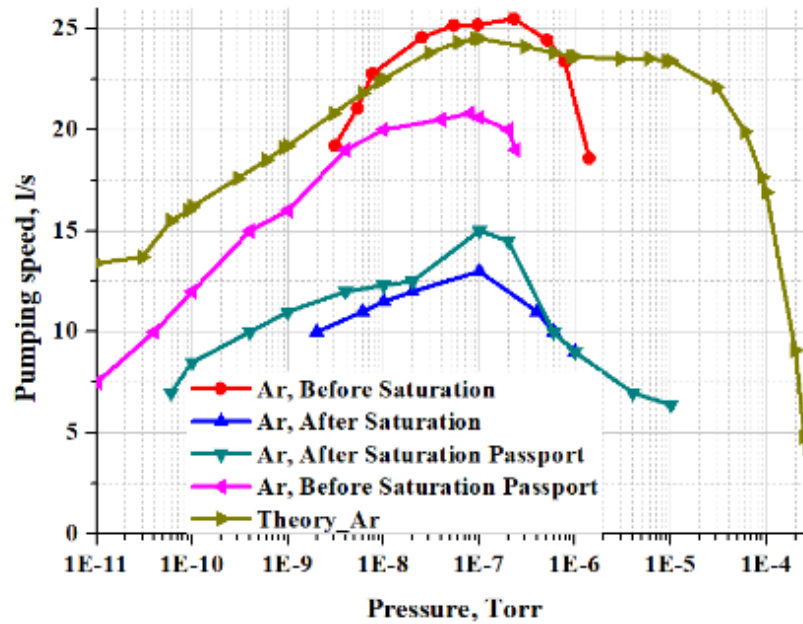


Рисунок 3.27. Зависимости быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТ-К-0,02-СF35 для аргона от давления при различных условиях [74]

Этим можно объяснить расхождения между измерениями быстроты откачки по азоту и аргону от давления, выполненные в фирме Agilent и ИЯФ СО РАН. В диапазоне давления от $4 \cdot 10^{-7}$ Торр до 10^{-5} Торр при переключении с -4 кВ на -7 кВ быстрота откачки увеличивается на 3-4 л/с, и тогда расхождение между измерениями составляет порядка $10 \div 15\%$.

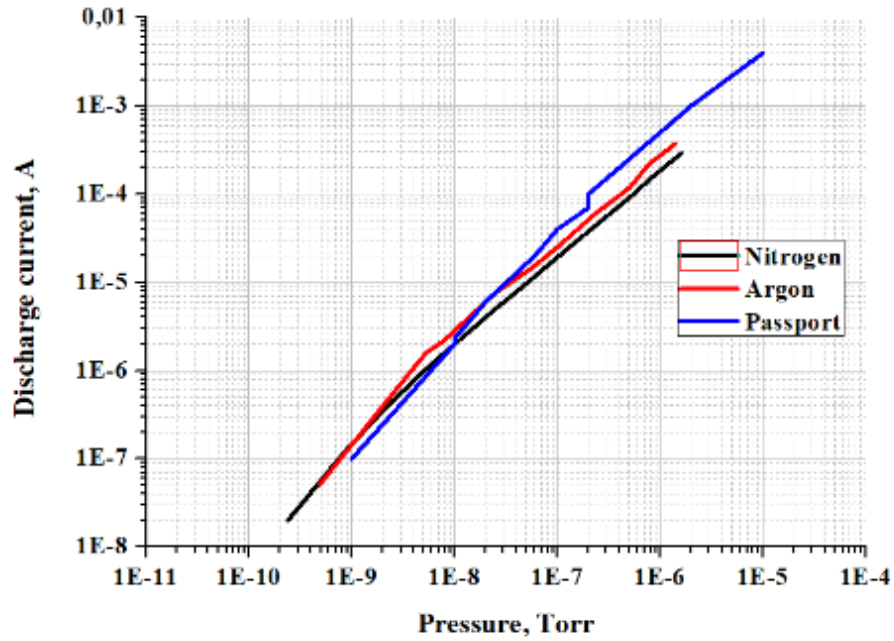


Рисунок 3.28. Зависимости тока разряда магниторазрядного насоса НМТ-К-0,02-CF35 от давления в сравнении с результатами фирмы Agilent (Passport) [74]

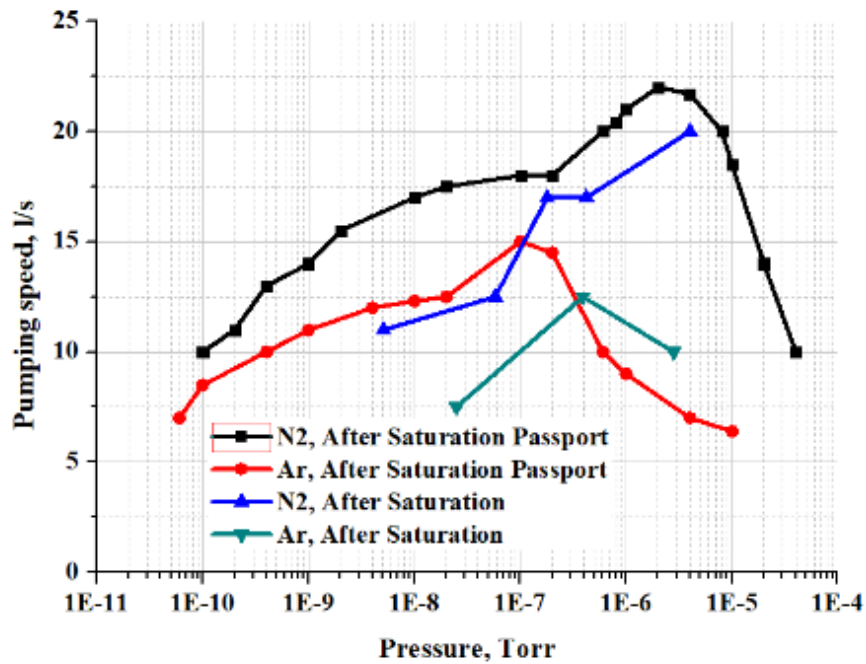


Рисунок 3.29. Зависимости быстроты откачки магниторазрядного насоса Vaclon 20 Plus для азота и аргона от давления при различных условиях [80]

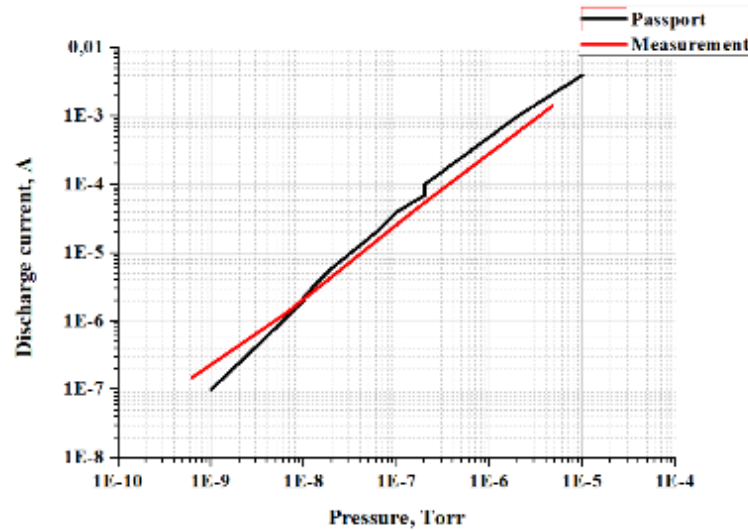


Рисунок 3.30. Зависимости тока разряда магнеторазрядного насоса Vaclon 20 Plus от давления в сравнении с представленными результатами фирмы Agilent (Passport) [80]

На рисунке 3.31 и рисунке 3.32. показаны результаты измерения зависимостей быстроты откачки насоса и тока разряда диодного насоса НМД-К-0,02 от давления. Результаты испытаний Noble диодного насоса НМД-К-0,02-Тi50+Ta50 представлены на рисунках 3.33-3.35 [81].

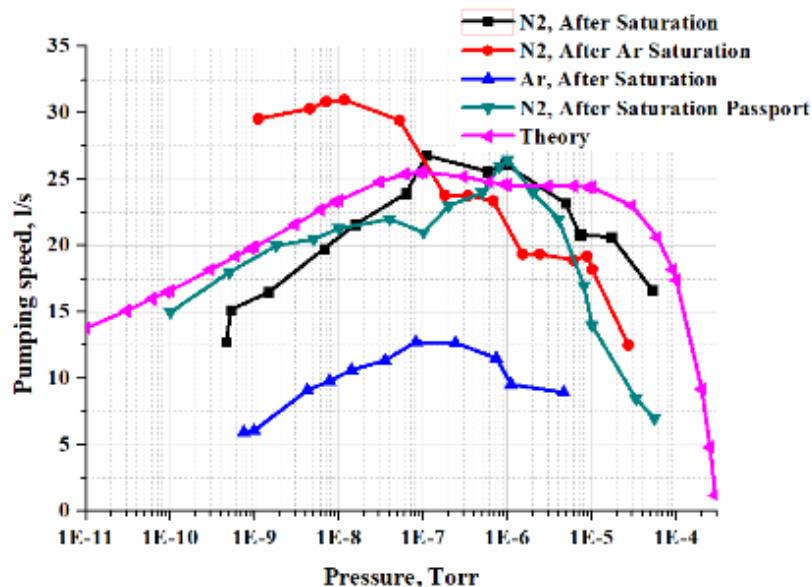


Рисунок 3.31. Зависимости быстроты откачки магнеторазрядного диодного насоса НМД-К-0,02 для азота и аргона от давления при различных условиях [81]

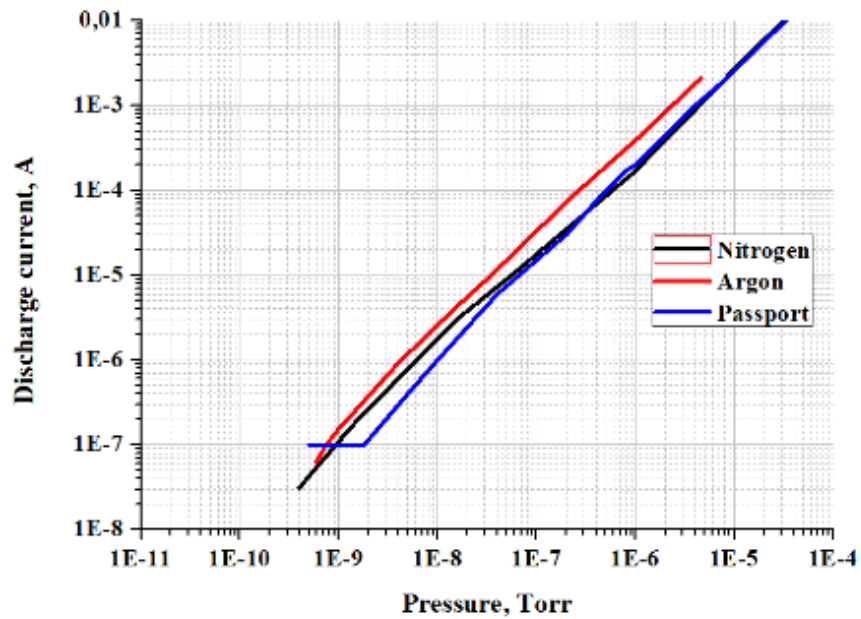


Рисунок 3.32. Зависимости тока разряда магниторазрядного диодного насоса НМД-К-0,02 для азота и аргона от давления в сравнении с теоретическими данными [81]

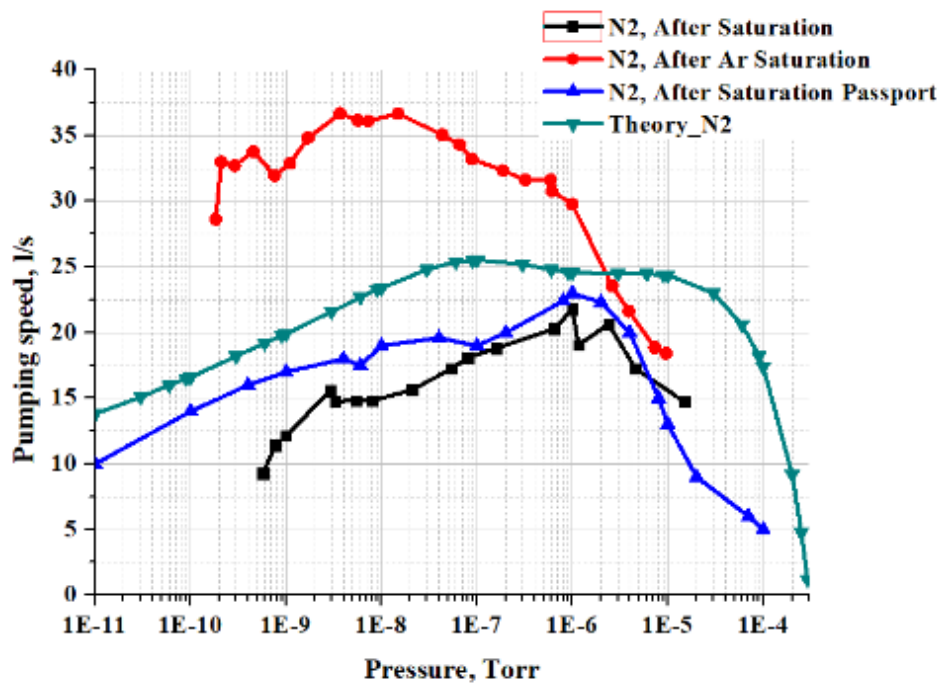


Рисунок 3.33. Зависимости быстроты откачки по азоту от давления для Noble диодного насоса НМД-К-0,02-Ti50+Ta50 при различных условиях [81]

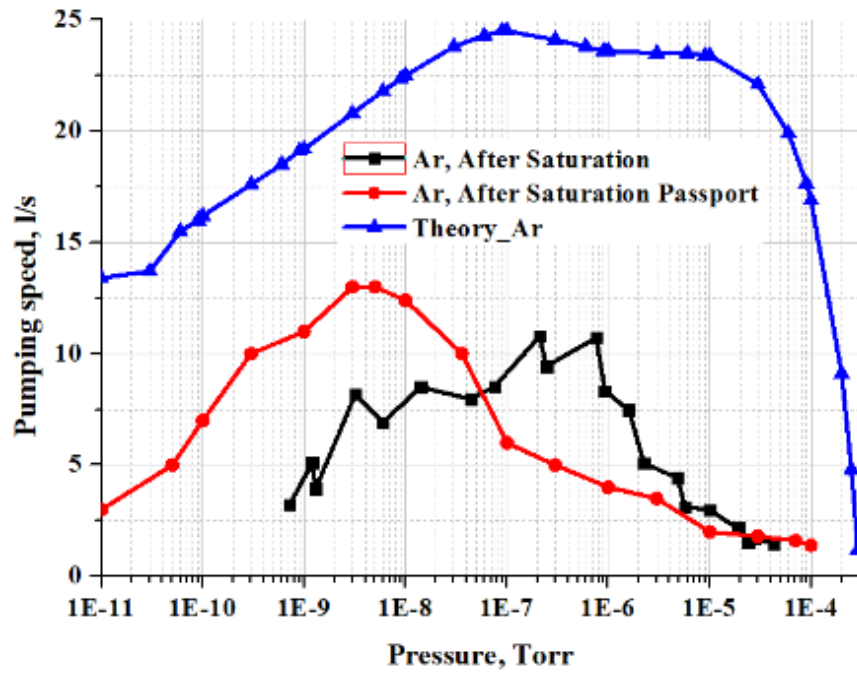


Рисунок 3.34. Зависимости быстроты откачки по аргону от давления для Noble диодного насоса НМД-К-0,02-Ti50+Ta50 при различных условиях [81]

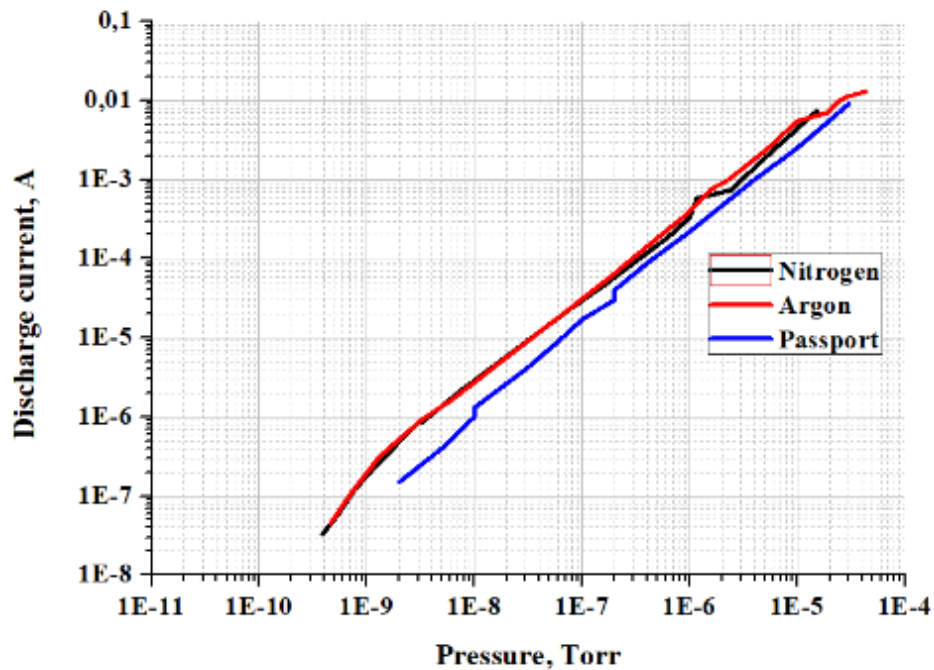


Рисунок 3.35. Зависимости тока разряда Noble диодного насоса НМД-К-0,02-Ti50+Ta50 для азота и аргона от давления в сравнении с теоретическими данными [81]

В таблице 3.2 представлены экспериментальные данные для различных магниторазрядных насосов.

Таблица 3.2. Экспериментальные данные быстроты откачки магниторазрядных насосов. Приводятся только максимальные значения

Название	Быстрота откачки, л/с					
	Расчет	Эксперимент				
		Азот			Аргон	
		До насыщ.	После насыщ.	После насыщ. аргоном	До насыщ.	До насыщ.
BINP #1	15	-	17	-	-	-
BINP #2	23	-	19,5	-	-	-
Катод	16	19,5	-	22	11	3,5
BINP #3	15	-	10	-	-	-
BINP #4	55	-	35	-	-	-
BINP #5	14	-	12,5	-	-	-
BINP #6	52	-	32	-	-	-
BINP #7	14	-	10	-	-	-
BINP #8	53	-	35	-	-	-

Продолжение таблицы 3.2

Название	Быстрота откачки, л/с					
	Расчет (N ₂)	Эксперимент				
		Азот			Аргон	
		До насыщ.	После насыщ.	После насыщ. аргоном	До насыщ.	До насыщ.
НМТ-К-0,04	37	30	25	32	21	10
НМТ-К-0,02	26	35	25	38	25	12
НМД-К-0,02	26	-	27	32	-	-
НМД-К-0,02 - Ti50 + Ta50	26	-	22	36	-	11
НМТР-20	18	16	13	22	8	3,8

В инжекционной части ЦКП «СКИФ», включающей в себя Линак, канал перепуска из Линака в Бустер, сам бустерный синхротрон и канал перепуска из Бустера в Накопитель, будут использоваться триодные магниторазрядные насосы с быстротой откачки 40 л/с по азоту марки НМТ-К-0,04-CF35 фирмы АО «Катод».

Хотя по эффективной быстроте откачки насосы НМТ-К-0,04 и НМТ-К-0,02 сравнимы, но сорбционная емкость у НМТ-К-0,04 больше в 2 раза, чем у НМТ-К-0,02. Однако в клистронах (вакуумно-изолированных устройствах) производства ИЯФ СО РАН поддержание сверхвысокого вакуума достигается параллельно подсоединенными магниторазрядным диодным насосом с быстротой откачки 20

л/с по азоту (НМД-К-0,02) и насосом на базе нераспыляемого геттера с быстротой откачки 300 л/с по водороду.

В накопительном кольце ЦКП «СКИФ» из-за малой апертуры камер (внутренний диаметр равняется 27 мм) применяются Noble диодные насосы НМД-К-0,02-Ti50+Ta50. Более подробно вакуумная система инжектора ЦКП «СКИФ» описана в Главе 5.

3.8. Специализированный источник питания с контроллером

Для измерения тока разряда до величины 10 нА фирмой «НПП Основа» по техническому заданию ИЯФ СО РАН был разработан, успешно протестирован и запущен в серийное производство специализированный источник питания с контроллером под торговой маркой ВИП-45. Основными параметрами, которого являются:

- полярность выходного напряжения: отрицательная или положительная;
- величина выходного напряжения (постоянное): переключаемое 4 и 7 кВ \pm 5%;
- разрешение индикации напряжения: 0,1 кВ;
- кол-во независимых каналов: 4 шт;
- ток короткого замыкания (для каждого канала): 20 мА;
- постоянная максимальная выходная мощность: 4 x 50 Вт;
- круглосуточный режим работы;
- режим работы: ручной и дистанционный;
- диапазон измерения токов: 1 нА до 100 мА;
- точность измерения тока: \pm 6%;
- программируемые по току нагрузки релейные выходы для управления внешними устройствами;
- интерфейс подключения: RS232, Ethernet с TCP/IP или UDP;
- аналоговый выход: 4 (перестраиваемых) - от 0 В (ток 10 нА) до 10 В (ток 20 мА);

- время отклика для аналогового выхода: 20 мс;
- время отклика для передачи данных (relay): 20 мс;
- напряжение питания: 220 В ± 10% / 50 Гц;
- размеры (Д x Ш x В): не более 470 мм x 135 мм x 300 мм;
- кол-во насосов, отличающихся быстротой откачки для каждого канала - до 7 (семи) шт.

Эти источники питания (36 шт) применяются для получения вакуума в инжекционной части ЦКП «СКИФ». Блок-схема источника питания с контроллером ВИП-45 представлена на рисунке 3.36. Вид передней и задней панелей показан на рисунках 3.37 и 3.38, соответственно.

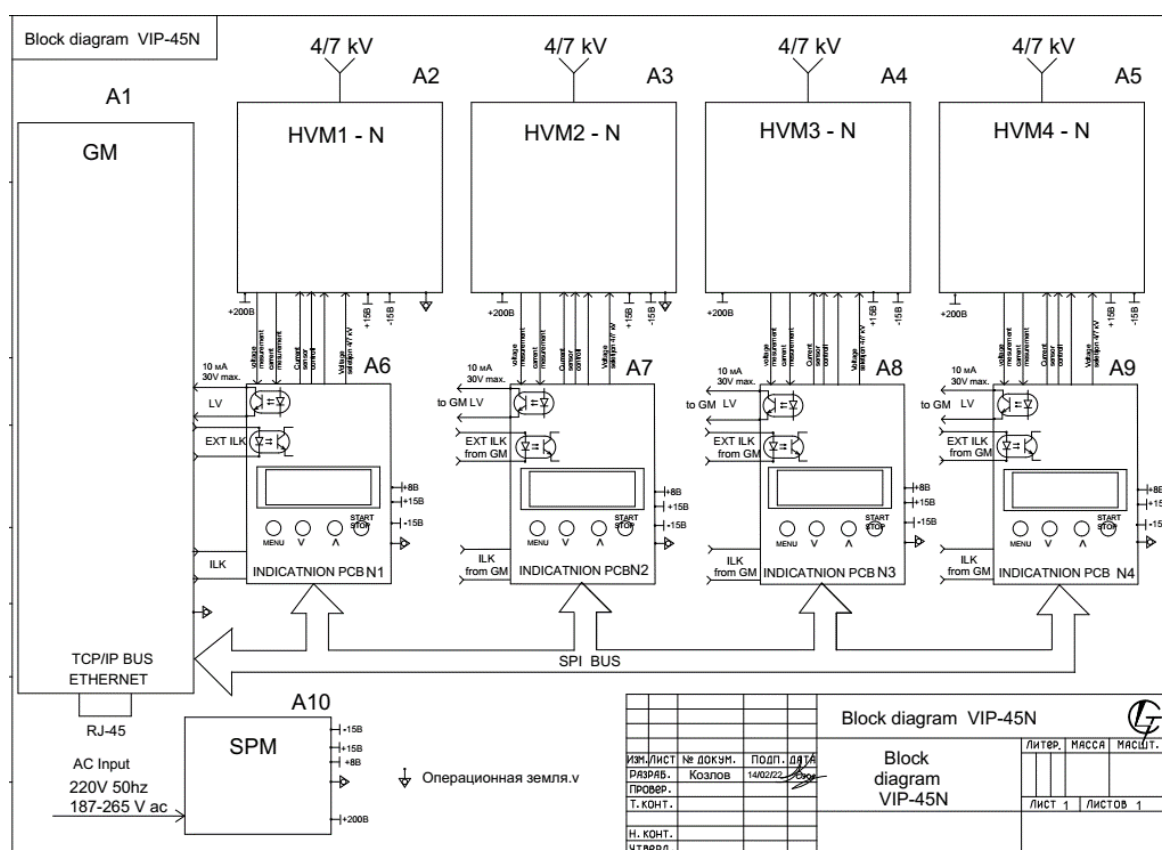


Рисунок 3.36. Блок-схема источника питания ВИП-45



Рисунок 3.37. Передняя панель четырехканального блока питания ВИП-45



Рисунок 3.38. Задняя панель четырехканального блока питания ВИП-45

Глава 4. Насосы на основе нераспыляемых геттеров

Прежде чем переходить к описанию конструкций геттерных насосов необходимо объяснить механизм активации геттеров, а также изложить основные причины выбора того или иного материала в качестве геттера.

Нераспыляемые геттеры (НГ) отличаются от распыляемых геттеров в первую очередь тем, что их предельная сорбционная емкость зависит не от площади поверхности геттера, а от его массы.

Как уже было сказано в Разделе 1, нераспыляемые геттеры обычно изготавливают путем фиксации порошка геттерного материала на (металлической) подложке с помощью прессования, спекания или методом электроосаждения. После размещения в вакуумную систему активация осуществляется нагревом. Обычно НГ представляют собой сплавы элементов IV В группы Периодической Таблицы Менделеева, к которой можно добавить некоторые актиноиды и редкоземельные элементы. Также часто добавляют алюминий для увеличения коэффициента диффузии адсорбированных газов при нагреве.

Работоспособность данного геттера характеризуется температурой активации, коэффициентом прилипания, сорбционной емкостью поверхности, полной сорбционной емкостью геттера для H_2 и для более тяжелых газов и разрушением геттера. Поскольку нераспыляемые геттеры очень пористые (а мелкие зерна плохо контактируют с подложкой), то существует опасность пирофорности, т.е. способность твёрдого материала в измельченном состоянии к самовоспламенению на воздухе при отсутствии нагрева, что определяет верхний предел температуры активации (550–700°C). Если сравнивать с сублимационной откачкой титана, то использование нераспыляемого геттера создает риск отслаивания геттера от подложки из-за чрезмерного нагрева либо отшелушивания из-за перенасыщения водородом. Кроме того, у них более низкая сорбционная емкость по сравнению с распыляемыми геттерами; однако НГ могут обеспечивать

линейную откачку и пассивную активацию. Если температура активации совместима с температурой прогрева камеры, куда вставлен геттер, то геттер может активироваться во время прогрева вакуумной камеры. Эта функция особенно привлекательна, поскольку она устраняет необходимость в электрических вводах и питании/управлении систем и позволяет увеличить поверхность нераспыляемого геттера и, следовательно, скорость его откачки.

4.1. Механизм активации геттера

При активации материала нераспыляемого геттера атомы кислорода перемещаются из поверхностного оксидного слоя внутрь геттера, где и растворяются, образуя твердый раствор. Критерий возможности протекания изобарно-термических процессов в неизолированных, но закрытых системах можно получить, учитывая свободную энергию образования оксида ΔG_{ox} и свободную энергию образования твердого раствора ΔG_{ss} на один атом кислорода при бесконечном разбавлении [82]:

$$\begin{aligned} \Delta G_{ox} &= \Delta H_{ox} - T \cdot \Delta S_{ox} \\ \Delta G_{ss} &= \Delta H_{ss} - T \cdot \Delta S_{ss} \end{aligned} \quad (4.1)$$

где ΔH_{ox} – изменение энтальпии образования оксида, кДж/моль; ΔH_{ss} – изменение энтальпии образования твердого раствора, кДж/моль; ΔS_{ox} – изменение энтропии образования оксида, кДж/(моль·К); ΔS_{ss} – изменение энтропии образования твердого раствора, кДж/(моль·К); T – температура, К.

В Таблице 4.1 приводится энергия растворения кислорода в чистых металлах по сравнению с теплотой образования устойчивого оксида, содержащего наименьшее число атомов кислорода на один атом металла. Значения ΔH_{ss} существенно зависят от концентрации кислорода в твердом растворе. Порядок величины ΔH и ΔS для рассматриваемых металлов составляет около 500 кДж/моль и 10 Дж/(К·моль), соответственно. Закрытая система, содержащая оксид и

твёрдый раствор кислорода, будет развиваться в направлении, позволяющем достичь минимального значения свободной энергии.

При $\Delta G_{ox} < \Delta G_{ss}$ растворение кислорода затруднено. В обратном случае ситуация благоприятствует образованию твёрдого раствора. При $\Delta G_{ox} = \Delta G_{ss}$ обе фазы находятся в равновесии, а концентрация кислорода в твёрдом растворе называется пределом растворимости.

Таблица 4.1. Энергия растворения кислорода в чистых металлах и теплота образования устойчивого оксида, содержащего наименьшее число атомов кислорода на один атом металла

Группа в Таблице Менделеева	Металл – оксид	ΔH_{ox} , кДж/моль	ΔH_{ss} , кДж/моль
4-ая	Ti – TiO	-542,9	-560,67
	Zr – ZrO ₂	-550,65	-619,23
	Hf – HfO ₂	556,9	-552,29
5-ая	V – VO	-432,0	-422,15
	Nb – NbO	-419,8	-383,85
	Ta – Ta ₂ O ₅	-409,5	-385,96

Для частного случая $\Delta G_{ox} > \Delta G_{ss}$ (растворение допускается):

$$\Delta H_{ox} - \Delta H_{ss} > -T(\Delta S_{ss} - \Delta S_{ox}), \quad (4.2)$$

Правая часть выражения (5.2) всегда отрицательна. Следовательно, в случае $|\Delta H_{ss}| > |\Delta H_{ox}|$ неравенство всегда выполняется. Как следствие, растворение всегда термодинамически разрешено независимо от значения температуры до достижения предела растворимости. Лимитирующим фактором реакции восстановления оксида в этом случае является кинетика. Это имеет место для титана, циркония и гафния.

При $|\Delta H_{ss}| < |\Delta H_{ox}|$ оба члена неравенства отрицательны, и, следовательно, правая часть может играть важную роль. Фактически, может случиться, что только

при значениях температуры, превышающих заданный порог, неравенство остаётся справедливым. Данное утверждение верно для ванадия, ниобия и тантала.

При большей разнице двух энтальпий энтروпийный член, т.е. $-T(\Delta S_{ss} - \Delta S_{ox})$, не может компенсировать даже при высокой температуре, и поэтому растворение затруднено. Это справедливо для хрома и большинства других элементов.

Для Ti, Zr и Hf предел растворимости мало зависит от температуры. Это отражает тот факт, что ΔG_{ss} при бесконечном разбавлении не зависит от температуры, и поэтому разность свободных энергий ($\Delta G_{ss} - \Delta G_{ox}$) между бесконечным разбавлением и пределом растворимости постоянна. Для V, Nb и Ta разность свободных энергий зависит от температуры, и то же самое справедливо для твердого раствора. Наконец, растворимость хромом кислорода настолько мала, что её диапазон не может быть отображен на фазовой диаграмме.

Помимо этих важных термодинамических соображений, для применения тех или других геттеров следует также изучить кинетические аспекты (диффузию, предел растворимости).

4.2. Диффузия и предел растворимости

Важными параметрами для выбора материалов, применяемых в качестве геттеров, являются коэффициент диффузии и предел растворимости кислорода, а также коэффициенты диффузии и пределы растворимости азота, водорода, поскольку они являются основными примесями в нераспыляемых геттерах после кислорода.

Коэффициент диффузии i газа в металле при различных температурах определяется как:

$$D_i(T) = D_{oi} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad (4.3)$$

где $D_i(T)$ – коэффициент диффузии при температуре T , см²/с; D_{0i} – постоянная диффузии i газа, см²/с; T – температура, К; E_i – энергия активации i газа, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К·моль).

Численные значения коэффициента диффузии и предела растворимости газов для различных металлов приведены в таблице 4.2 и таблице 4.3, соответственно. Приведенные данные справедливы для случая монокристаллов. Данные для поликристаллических структур на данный момент отсутствуют. Важно отметить, что коэффициент диффузии увеличивается на границах зерен по сравнению с монокристаллом. Значение предела растворимости также увеличивается в присутствии поликристаллов. Действительно, если предполагается, что коэффициент диффузии не является ограничивающим фактором, то для поглощения кислорода доступна поверхность каждого зерна, а не только поверхность пленки.

Эффективность поглощения газа в металле характеризуется длиной диффузии, т.е. расстоянием, на которое происходит перемещение молекул газа в процессе диффузии, прежде чем они поглотятся.

Длина диффузии L за время t при температуре T определяется выражением:

$$L = \sqrt{D_i(T) \cdot t} \quad (4.4)$$

В таблице 4.4. представлены численные значения длины диффузии кислорода в нанометрах для элементов 4-й и 5-й групп Таблицы Менделеева при нагревании в течение 2 часов при температуре, равной 573 К.

Эти данные о длине диффузии указывают на то, что металлы 5-й группы имеют более высокий коэффициент диффузии кислорода, чем металлы 4-й группы, или, другими словами, что объёмно-центрированные кубические кристаллические структуры имеют более высокий коэффициент диффузии, чем гексагональные плотноупакованные.

Значения предела растворимости (таблица 4.3) указывают на то, что металлы 4-й группы имеют более высокую ёмкость для хранения кислорода и азота, чем металлы 5-й группы, или, другими словами, что гексагональные

плотнупакованные кристаллические структуры имеют более высокую ёмкость для хранения, чем объёмно-центрированные кубические кристаллические структуры.

Таблица 4.2. Численные значения коэффициента диффузии газов для различных металлов

Газ	Металл	Постоянная диффузии D_0 , см ² /с	Энергия активации E_i , кДж/моль	Температура, К
Кислород	Ti	0,45	201	573
	Zr	$6,62 \cdot 10^{-2}$	184,2	563
	Hf	0,66	212,8	773
	V	$2,46 \cdot 10^{-2}$	123,5	333
	Nb	$1,38 \cdot 10^{-2}$	111,5	296
	Ta	$1,05 \cdot 10^{-2}$	110,4	300
Азот	Ti	0,21	224	723
	Zr	0,56	241,4	773
	Hf	$2,4 \cdot 10^{-2}$	242,3	823
	V	$4,17 \cdot 10^{-2}$	148,5	333
	Nb	$2,56 \cdot 10^{-2}$	152,1	543
	Ta	$3,7 \cdot 10^{-3}$	156,8	483
Водород	Ti	$2,8 \cdot 10^{-5}$	23,9	300
	Zr	$1,1 \cdot 10^{-3}$	47,7	333
	Hf	$6,0 \cdot 10^{-4}$	41,8	473
	V	$4,4 \cdot 10^{-4}$	5,7	333
	Nb	$1,2 \cdot 10^{-3}$	11,3	373
	Ta	$6,1 \cdot 10^{-4}$	14,65	473

Таблица 4.3. Численные значения предела растворимости газов по атомарному содержанию для различных металлов

Газ	Металл	Предел растворимости %	Температура, К
Кислород	Ti	33	573
	Zr	29	
	Hf	17	
	V	4	
	Nb	0,01	
	Ta	0,4	
Азот	Ti	-	-
	Zr	22	973
	Hf	-	-
	V	1,5	400
	Nb	0,5	573
	Ta	5,5	300
Водород	Ti	6,8	573
	Zr	1,0	500
	Hf	0	200÷500
	V	3	300
	Nb	5,7	300
	Ta	20	300

Таблица 4.4. Численные значения длины диффузии кислорода для элементов 4-й и 5-й групп при нагревании в течение 2 часов при температуре 573 К для кислорода

Металл	Диффузионная длина, нм
Ti	0,4
Zr	0,9
Hf	0,1
V	300
Nb	650
Ta	800

4.3. Роль температуры и времени для активации геттеров

Простая диффузионная модель позволяет оценить продолжительность процесса активации при заданной температуре, достаточную для полного растворения поверхностного оксидного слоя.

Рассмотрим плоский источник (оксид), изначально расположенный на поверхности полубесконечной среды (металла). Даже при нагревании существуют только эти две фазы. В таком случае количество диффундирующего кислорода M_{tot} за время t при температуре T определяется следующим образом [83]:

$$M_{tot} = 2 \cdot c_0 \sqrt{\frac{D_i(T) \cdot t}{\pi}}, \quad (4.5)$$

где $D_i(T)$ – коэффициент диффузии кислорода в металле при температуре T . В частном случае, растворения оксида $M_{tot} = M_{oxide}$ – полное количество кислорода, содержащегося в оксидном слое, c_0 – концентрация кислорода в металле на границе раздела металл-оксид; если предполагается локальное равновесие на границе раздела, c_0 – предел растворимости кислорода в металле.

Время t_{oxide} , необходимое для растворения оксидного слоя при температуре T , составляет:

$$t_{oxide} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{M_{oxide}}{c_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{D_i(T)}, \quad (4.6)$$

Для металла Me с плотностью ρ_{Me} , молекулярной массой M_{Me} и пределом растворимости кислорода:

$$c_0 = x_0(T) \cdot \frac{\rho_{Me}}{M_{Me}} \cdot N_A \cdot 100, \quad (4.7)$$

где c_0 – концентрация кислорода в металле на границе раздела металл-оксид, атом/см³; ρ_{Me} – плотность металла, г/см³; M_{Me} – молекулярная масса металла, г/моль; x_0 – предел растворимости кислорода, %; N_A – постоянная Авогадро, равная $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Для оксида металла с плотностью, молекулярной массой и толщиной:

$$M_{oxide} = y \cdot N_A \cdot \frac{\rho_{Me_xO_x}}{M_{Me_xO_x}} \cdot h, \quad (4.8)$$

где M_{oxide} – полное количество кислорода, содержащегося в оксидном слое, атом/см²; $\rho_{Me_xO_y}$ – плотность оксида, г/см³; $M_{Me_xO_y}$ – молекулярная масса оксида, г/моль; h – толщина оксидного слоя, см; y – степень окисления химических элементов; N_A – постоянная Авогадро.

Подставляя выражения 4.7 и 4.8 в выражение 4.6:

$$t_{oxide} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{y \cdot \frac{\rho_{Me_xO_x}}{M_{Me_xO_x}} \cdot h}{x_0(T) \cdot \frac{\rho_{Me}}{M_{Me}}} \right)^2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right)}, \quad (4.9)$$

Толщина оксидного слоя принимается равной 5 нм для всех типов оксидов. Это значение было принято на основе оценки глубинного профилирования, измеренного в CERN методом оже-электронной спектроскопии для большинства геттерных материалов [84].

Данные, необходимые для расчета времени t_{oxide} растворения поверхностного оксидного слоя в зависимости от температуры нагрева, приведены в таблице 4.5. Значения коэффициента диффузии D_0 и предела растворимости x_0 справедливы для монокристаллов. Расчетное время t_{oxide} представлено в виде функции от температуры нагрева на рисунке 4.1. Данные, представленные в [31], [85], [86] для температуры активации, получены методом электронно-стимулированной десорбции, заключающимся в измерении газовой выгрузки с поверхности, вызванного бомбардировкой электронами, которое снижается с уменьшением газовой нагрузки с поверхности.

Таблица 4.5. Физические свойства металлов 4 и 5 групп и их оксидов

	Y	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta
ρ_{Me} , г/см ³	4,5	4,5	6,49	13,1	6,1	8,57	16,6
M_{Me} , г/моль	88,9	47,9	91,2	178,5	50,9	92,9	180,95
x_0 , %	0,5	33	29	17	4	0,4	0,6
x в Me_xO_y	2	1	1	1	2	2	2
y в Me_xO_y	3	2	2	2	5	5	5
D_0 , см ² /с	9,4E-3	0,8	6,6E-2	0,66	1,9E-2	8,0E-2	1,1E-2
- E_0 , Дж/моль	86700	200830	184100	212550	122850	116320	110940
ρ_{MeO_y} , г/см ³	5,03	4,23	5,68	9,68	3,35	4,6	8,2
M_{MeO_y} , г/моль	225,8	79,9	123,2	210,5	181,9	265,8	441,9
h, нм	5	5	5	5	5	5	5
Температура, К	1173 ÷ 1733	673 ÷ 1123	563 ÷ 923	773 ÷ 2073	333 ÷ 2098	403 ÷ 1073	298 ÷ 1873

В стандартной процедуре измерения образец нагревается в течение 2 часов при заданной температуре, начиная со 100 ÷ 120 °С, а затем охлаждается до комнатной температуры перед проведением измерения. Эта последовательность повторяется через каждые 50 °С до максимальной температуры 400 °С [84].

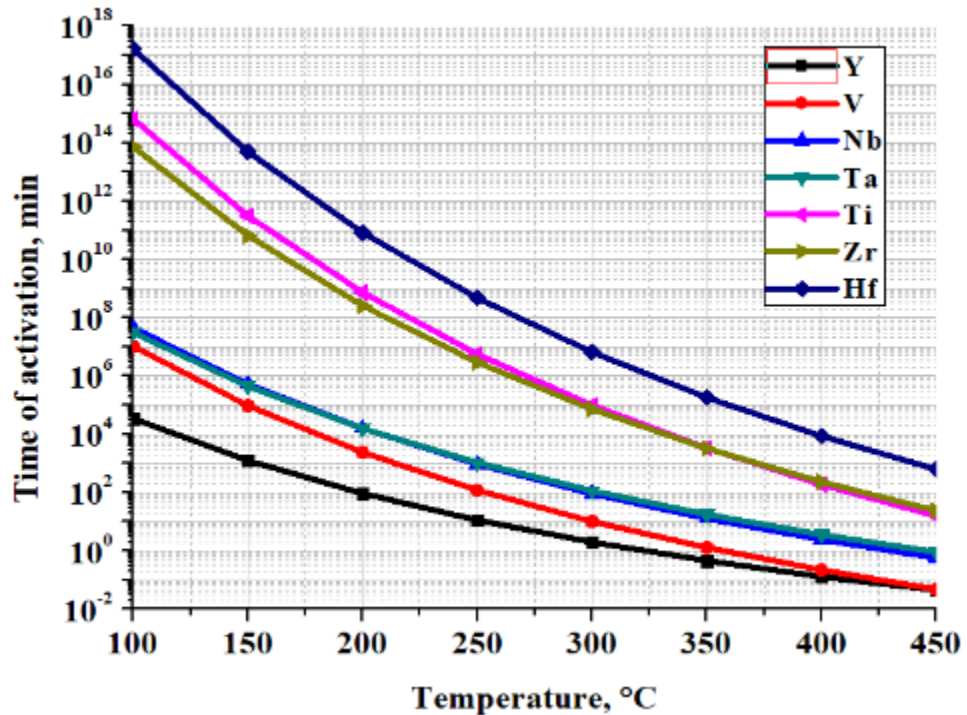


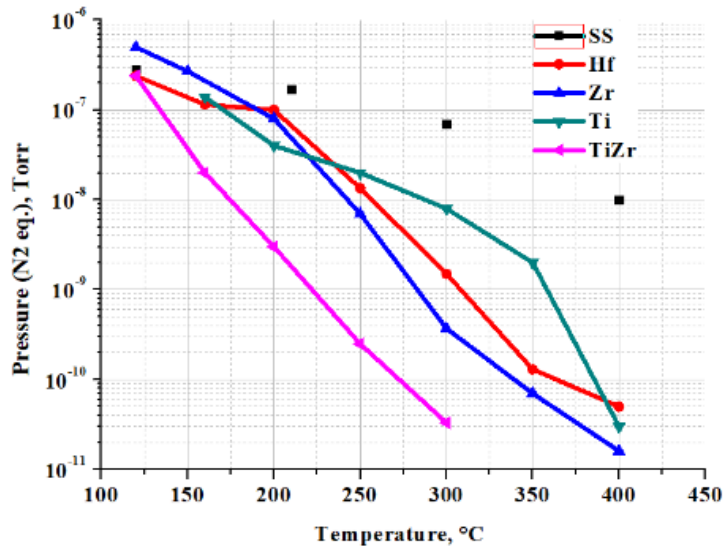
Рисунок 4.1. Расчетное время активации в зависимости от температуры прогрева для различных материалов

Зависимости давления от температуры активации (T_a) во время электронной бомбардировки проиллюстрированы на рисунке 4.2 [84]. На каждом графике характеристики геттеров сравниваются с характеристиками нержавеющей стали, из которой изготавливается большинство вакуумных камер. Значение температуры активации произвольно принимается равным, когда давление равняется 10^{-10} Торр и приведено в таблице 4.6.

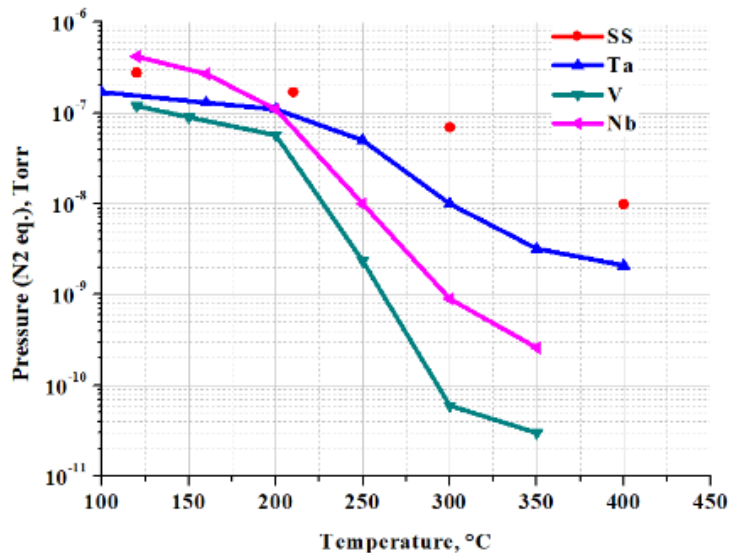
Расчёты показывают, что металлы 5-й группы активируются быстрее, чем металлы 4-й группы. В 4-й группе первым активируется цирконий, а в 5-й группе – ванадий. Эта простая модель позволяет предсказать, какой металл имеет самую низкую температуру активации в 4-й и 5-й группах, что согласуется с некоторыми экспериментальными данными, полученными методом электронно-стимулированной десорбции (ЭСД). В частности, обнаружено, что Zr активируется после 2 часов нагрева при температуре около $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, что недалеко от расчётного значения (около $365\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 2 часах нагрева) (таблица 4.6) [84].

Важно отметить, что пределы растворимости, принятые для данного расчета, экстраполированы из высокотемпературных данных, взятых из литературы.

Эта экстраполяция может быть источником ошибок, которые могут объяснять различия между некоторыми измерениями и соответствующими значениями, полученными путем моделирования.



а)



б)

Рисунок 4.2. Результаты измерений электронно-стимулированной десорбции для металлов 4-й группы (а) и для металлов 5-й группы (б) от температуры [84]

Таблица 4.6. Значения температуры активации геттеров, измеренные методом электронно-стимулированной десорбцией и полученная расчетом (для пленок)

Металл	Эксперимент T_a , °C	Расчет T_a , °C
Y	-	150
Ti	380	370
Zr	350	365
Hf	360	440
V	290	200
Nb	≈400	230
Ta	>400	230

4.4. Стенд для испытания насосов на базе нераспыляемых геттеров

Активационные и газопоглощающие характеристики геттерных насосов измерялись на установке, приведенной на рисунке 4.3 [28], [87]. Предварительная откачка системы проводилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос *TMP1* и безмасляный спиральный насос *MP*. Высоковакуумная откачка осуществлялась турбомолекулярным насосом *TMP2*. От прорыва атмосферы со стороны *TMP1* + *MP* был установлен аварийный электрический клапан *VR3*. Форвакуум и высокий вакуум измерялись широкодиапазонным датчиком давления фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani и датчика давления с холодным катодом марки PKR251.

Напуск газа в систему выполнялся через щелевой натекатель *VF* и капилляр *C* (молекулярная проводимость по водороду $3 \cdot 10^{-3}$ л/с). Откачка системы инъекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны *VR4* и *VR5*. Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и емкостный датчик давления “Baratron”, позволяющий измерять давление в диапазоне от 10^{-4} до 1,0 Торр.

Давление в системе измерялось датчиком давления с горячим катодом *IG1*. Парциальные давления газов измерялись квадрупольным масс-спектрометром *RGA* фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом *IG2* предназначен для контроля потока газа, откачиваемого турбомолекулярным насосом *TMP2*.

До проведения экспериментов весь стенд прогревался при температуре 220–240°C, чтобы уменьшить десорбцию со стенок камеры. Также до проведения экспериментов были измерены эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса *TMP2*, молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом по каждому газу (H_2 , CO, Ar). После каждого вскрытия на атмосферу проводилась калибровка всех измерителей вакуума. В начале экспериментов клапан *VRI* был закрыт. Затем клапан открывался, и инжектируемый газ начинал поступать в тест-камеру через капилляр. Газовый поток в тест-камеру определяется выражением:

$$Q_{total} = C \cdot (P_{in} - P_{out}), \quad (4.10)$$

где C – канал с калиброванной проводимостью, л/с; P_{in} , P_{out} – давление на входе и выходе капилляра C , Торр.

Быстрота откачки геттера S_{NEG} может быть определена в течение напуска газа как:

$$S_{NEG} = \frac{C \cdot (P_{in} - P_{out})}{K \cdot (P_{IG1after} - P_{IG1before})} - S_{TMP}, \quad (4.11)$$

где S_{NEG} – скорость откачки насоса на базе нераспыляемых геттеров, л/с; S_{TMP} – быстрота откачки турбомолекулярного насоса *TMP2* и равной 32 л/с по водороду, 8,9 л/с по монооксиду углерода; C – молекулярная проводимость капиллярного канала, л/с; $P_{IG1after}$ – давление после напуска газа датчика давления *IG1*, Торр; $P_{IG1before}$ – давление до напуска газа датчика давления *IG1*, Торр; K – коэффициент чувствительности, равный 2,4 для водорода, 0,9 для монооксида углерода и 0,77 для аргона.

Сорбционная емкость определялась как количество молекул, при поглощении которых быстрота откачки насоса снижается до 10% от первоначального уровня.

$$Doze = \int_0^t (Q_{total} - Q_{TMP}) \cdot dt, \quad (4.12)$$

где Q_{total} – полный поток газа, л·Торр/с; Q_{TMP} – поток газа, откачиваемый турбомолекулярным насосом $TMP2$, л·Торр/с; t – время измерения, с.

Поток газа, который откачивается турбомолекулярным насосом $TMP2$, может быть найден как:

$$Q_{TMP} = S_{TMP} \cdot K \cdot (\Delta P_{IG1} - \Delta P_{IG2}), \quad (4.13)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{IG1} &= P_{IG1after} - P_{IG1before} \\ \Delta P_{IG2} &= P_{IG2after} - P_{IG2before}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

$P_{IG1after}$ – давление после напуска газа датчика давления $IG1$, Торр; $P_{IG1before}$ – давление до напуска газа датчика давления $IG1$, Торр; $P_{IG2after}$ – давление после напуска газа датчика давления $IG2$, Торр; $P_{IG2before}$ – давление до напуска газа датчика давления $IG2$, Торр.

4.5. Первые вакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров из отечественных материалов

Вакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров стали использовать в 70-х годах прошлого века в Европе и за более чем 50-летнюю историю их применения претерпели ряд изменений. Первоначально в качестве вакуумных насосов использовались геттерные ленты, которые получались из порошков, нанесенных на константан или другую подложку, затем либо спекались, либо прессовались.

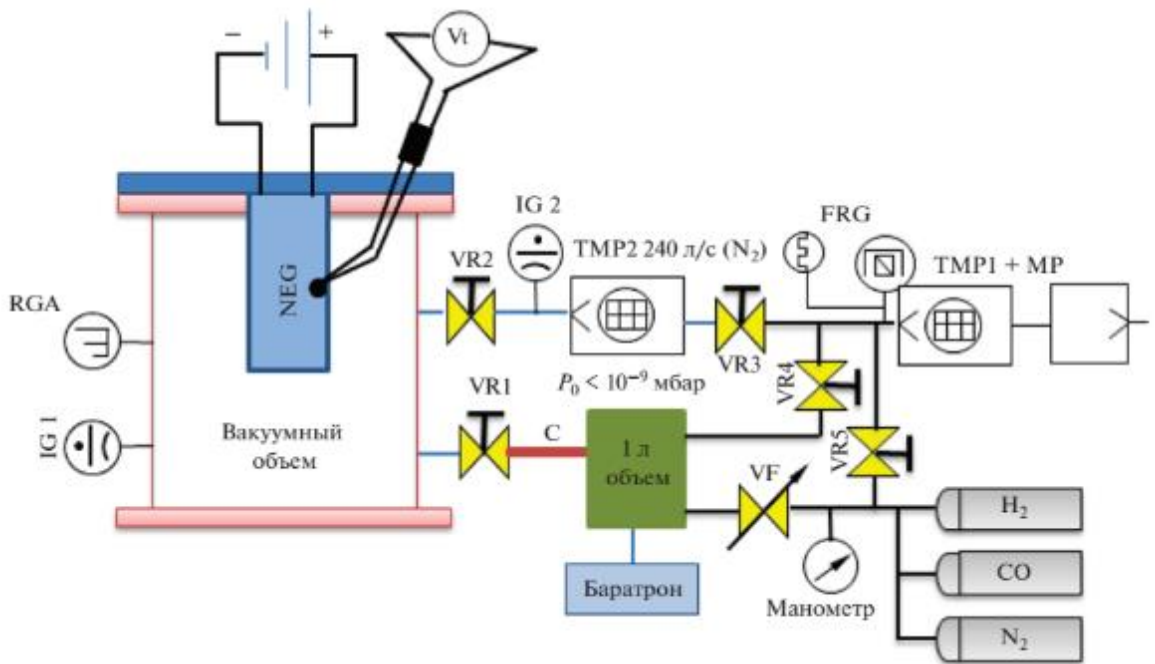


Рисунок 4.3. Упрощенная схема вакуумного стенда. RGA – масс-спектрометр; IG1-2 – датчик давления с горячим катодом; FRG – широкодиапазонный датчик; геттер – тестируемый насос; С – капиллярный канал с молекулярной проводимостью; TMP1 + MP – турбомолекулярная станция откачки; TMP2 – турбомолекулярный насос; Баратрон – емкостной датчик давления; Манометр – стрелочный деформационный манометр; VF – щелевой натекатель; VR1, VR2, VR4, VR5 – цельнометаллические угловые клапаны; VR3 – аварийный электрический клапан [28]

Затем стали создавать насосы из этих же лент, но согнутых в виде гармошки, тем самым увеличивалась эффективная скорость откачки, но возрастал риск отшелушивания геттера от подложки за счет механического воздействия. Следующим шагом эволюции геттерных насосов является создание сосредоточенных вакуумных насосов из спеченных геттеров в виде дисков или пластин. Если толщина геттерного слоя в лентах составляла десятки микрон, то в данной конфигурации уже порядка $1,5 \div 2$ мм, и, следовательно, увеличение сорбционной емкости насоса. Так как газопоглотители обладают избирательностью при откачке газов (не откачивают благородные газы и метан), то напрашивалось создание насоса, который сможет откачивать все сорта газов,

поэтому появились сосредоточенные насосы, объединяющие в одном корпусе магниторазрядные насосы и насосы на базе нераспыляемых геттеров.

В Российской Федерации одним из производителей нераспыляемых геттеров является завод порошковой металлургии АО «Полема», который выпускает в серийных масштабах нераспыляемые геттеры из титана и титановых сплавов (Ti-Zr-Al, Ti-V), применяемые в различных областях техники для откачки, улучшения и поддержания глубокого вакуума в электровакуумных приборах, камерах и других вакуумных устройствах, и системах.

Для получения нераспыляемых геттеров АО «Полема» использует порошки собственного производства из активных материалов: титана, Ti-V и Ti-Zr-Al сплавов с высокоразвитой поверхностью частиц, отличной прессуемостью и спекаемостью.

Первые результаты по исследованию сорбционных характеристик Ti-Zr-Al в виде таблеток (диаметром – 12 мм, толщиной – 2,5 мм) были выполнены методом вакуумного термогравиметрического анализа в НИИ микроэлектроники и информационно-измерительной техники Московского государственного института электроники и математики им. А.Н. Тихонова (ГУ НИИ МИЭМ) [88].

Удельная максимальная сорбционная емкость по водороду после активации и при температуре 200 ± 20 °С и давлении 10^{-5} Торр оказалась равной $(53\pm 1,43)$ л·Торр/г.

Скорость сорбции по водороду составила 6,6 л/(с·г) после активации и при температуре 200 ± 20 °С.

Создание сосредоточенных вакуумных насосов от первых прототипов до серийных образцов для ЦКП «СКИФ», в основе которых лежат нераспыляемые геттеры, заняло более десяти лет.

Первыми прототипами стали насосы с внешним нагревателем, изготовленные из цилиндрической трубы с внутренним диаметром 150 мм, заглушенной с одной стороны и имеющей с другой стороны присоединительный фланец Ду 150 типа Conflat. В прототипе № 1 (рисунок 4.4а) таблетки в количестве 1300 штук расположены на каркасе по радиусам 75 и 20 мм. В прототипе № 2 (рисунок 4.4б)

таблетки прижаты широкой стороной к стенке цилиндрической трубы по всей ее поверхности и плотно примыкают друг к другу. В прототипе № 3 (рисунок 4.4в) 1300 штук таблеток насыпаны в цилиндр произвольным образом и прижаты к его поверхности металлической сеткой. Медный диск служит экраном для отражения тепла на геттер, тем самым обеспечивая лучшую активацию таблеток. Для активации насосов использовался внешний нагреватель мощностью 1.5 кВт. Температура во время активации контролировалась термопарой типа хромель-копель.

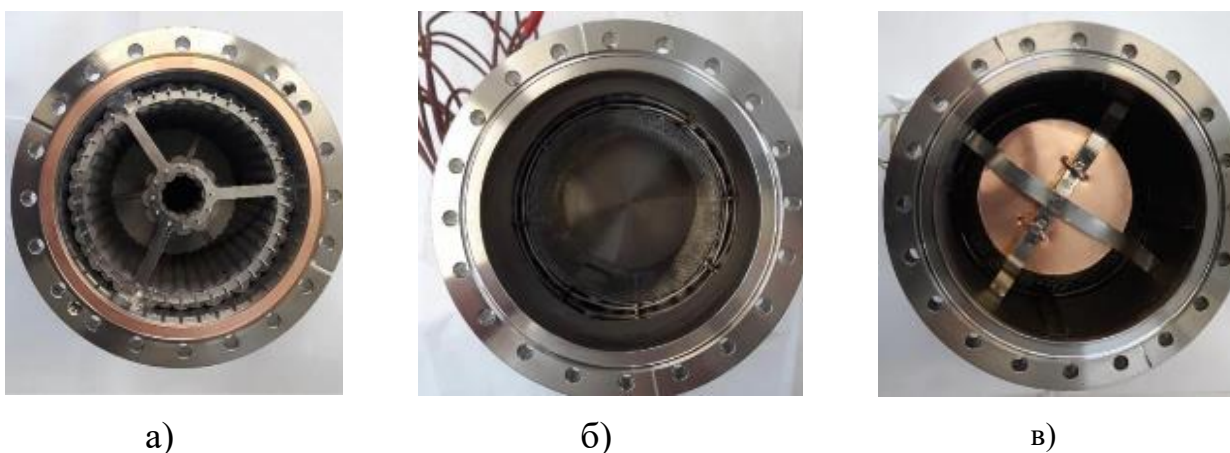


Рисунок 4.4. Прототипы геттерных насосов: а) прототип №1, б) прототип №2, в) прототип №3 [28]

Следующим шагом при создании сосредоточенных насосов был отказ от активации с помощью внешних нагревателей и использование внутреннего нагревателя (рисунок 4.5). Насос с внутренним нагревателем представлял собой цилиндр с внешним диаметром 90 мм, длиной 140 мм, в котором были размещены около 300 таблеток общей массой 450 г. Таблетки располагались с зазором $1 \div 1,5$ мм между цилиндрическими сетками и для активации геттера нагревались встроенным резистивным нагревателем мощностью 150 Вт. Геометрическая активная площадь геттера – внешняя стенка цилиндра (поскольку торцы картриджа были закрыты для обеспечения равномерного прогрева таблеток) – равнялась 395 см^2 . Нагреватель располагался внутри по центру картриджа и был прикреплен к фланцу Ду 150 типа ConFlat, на котором находился картридж.

Температура во время активации контролировалась термопарой типа хромель-копель. Геттерные таблетки изготовлены из Ti-Zr-Al диаметром 13 мм и толщиной 2,5 мм.



Рисунок 4.5. Вакуумный насос с внутренним нагревателем [28]

Результаты вакуумных измерений температуры активации и быстроты откачки насоса с внутренним нагревателем приведены в [89].

На рисунке 4.6 представлены зависимости скорости откачки для каждого насоса от сорбционной емкости. Согласно таблице 4.7, прототип № 4 с внутренним нагревателем обладает лучшими газопоглощающими параметрами, нормализованными на суммарную площадь геттера по сравнению с насосами, которые активируются при помощи внешнего нагревателя. Это объясняется тем, что внутренний нагреватель более равномерно прогревает геттерные таблетки по сравнению с внешним, при работе которого часть таблеток остается неактивированной. Это особенно хорошо заметно на примере прототипов № 1 и №3. В насосе № 2 активация проходит более эффективно благодаря тому, что все таблетки плотно прилегают широкой стороной к стенке цилиндра, которая нагревается, в отличие от насоса № 1, у которого центральная часть остается непрогретой.

Таблица 4.7. Результаты испытаний геттерных насосов

	Быстрота откачки по H_2 , л/с/см ²	Сорбционная емкость по H_2 , л·Торр/см ²	Сорбционная емкость по CO , л·Торр/см ²
Насос №1	0,24	Не измерялась*	2,4E-3
Насос №2	0,34	Не измерялась*	2,1E-3
Насос №3	0,071	Не измерялась*	1,4E-3
Насос №4	1,7	Не измерялась*	2,9E-3

* После регенерации геттер готов к сорбции водорода. Ожидалось, что сорбционная емкость составит тысячи л·Торр.

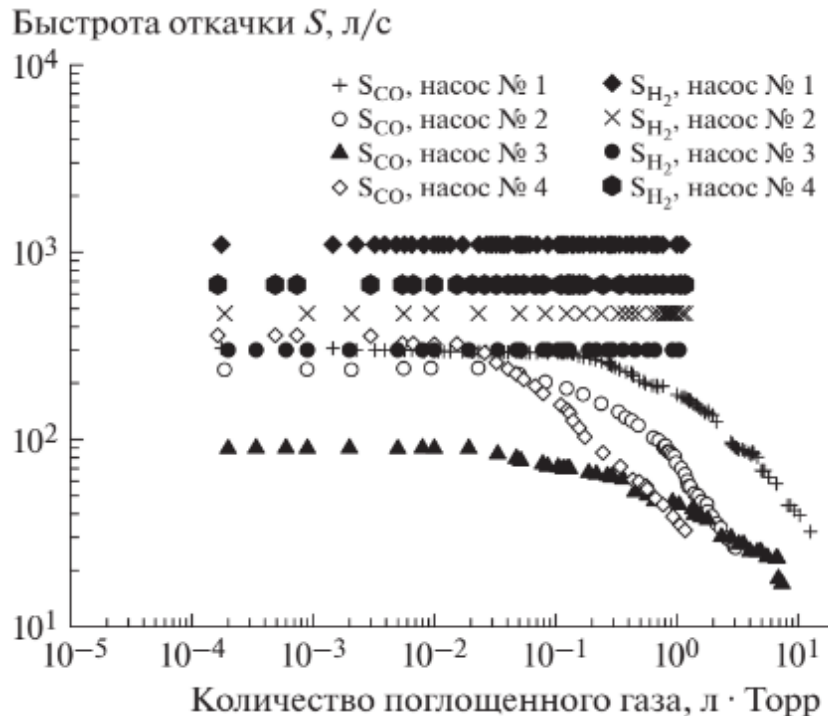


Рисунок 4.6. Зависимость быстроты откачки геттерных насосов на основе TiZrAl по водороду и монооксиду углерода от количества поглощенного газа [28]

4.6. Сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ»

4.6.1. Сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров

Как отмечалось выше, широкое распространение в вакуумных системах ускорителей заряженных частиц получили ионно-геттерные магниторазрядные насосы. Но, к сожалению, увеличение скорости откачки данных насосов сопряжено с увеличением как габаритов, так и массы. Данное обстоятельство не позволяет достичь требуемых параметров откачивающей системы на основе только магниторазрядных насосов из-за пространственных ограничений на размещение вакуумных элементов в накопителе «СКИФ». Существенно меньшими масса-габаритными параметрами обладают геттерные насосы, в которых спеченный геттерный материал, в виде пластинок или дисков, уложен в картридж, снабженный нагревателем для термической активации геттера.

Изучив результаты испытаний прототипов геттерных насосов и конструкции вакуумных насосов фирмы SAES Getters [37], было принято решение о создании насосов, изготовленных из геттерных дисков с внутренним нагревателем. Внешний диаметр каждого диска 25 мм, толщина 1,6 мм, пористость 30%, внутренний диаметр 8 мм для размещения нагревателя. Химический состав нераспыляемого газопоглотителя – Ti-Zr-Al.

Были также проведены расчеты зависимости коэффициента захвата поверхностью собранных последовательно дисков от величины зазора между дисками. Расчеты проводились с помощью модуля Transitional Flow программы COMSOL Multiphysics. Результаты расчетов показаны на рисунке 4.7. Максимальный коэффициент захвата достигается при зазоре 0,5 мм и составляет 13%, но обеспечить с хорошей точностью данную величину зазора затруднительно, поэтому, с точки зрения удобства изготовления и сборки геттерных насосов, диски установлены последовательно в ряд с зазором 1,5 мм в

количестве 31 шт в каждой «колонне». Высота (от фланца до торца геттерного насоса) не превышает 130 мм. Температура нагрева контролируется термопарой хромель-алюмель. Для снижения мощности нагревателя в два раза используется один защитный экран снаружи. Геттерные насосы располагаются на фланцевых соединениях типа Conflat. Изображения геттерных насосов с одной, двумя, четырьмя и шестью «колоннами» представлены на рисунке 4.8. Основные параметры показаны в таблице 4.8.

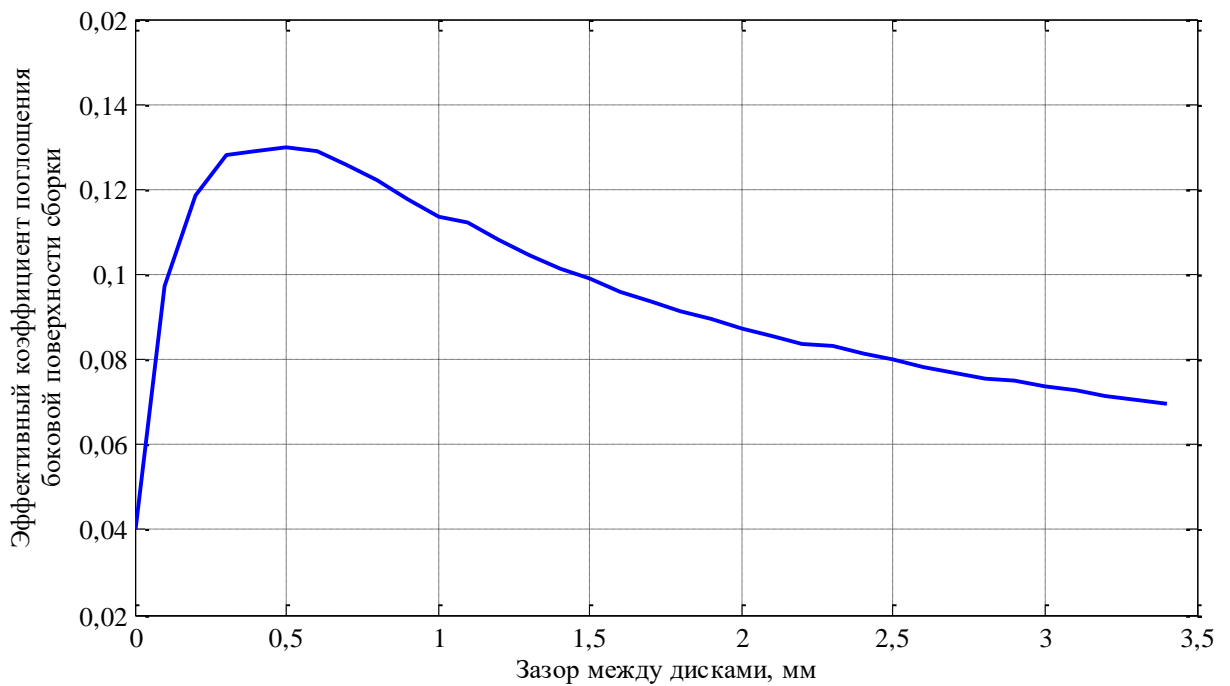


Рисунок 4.7. Зависимость коэффициента захвата цилиндрической поверхностью геттерной сборки от зазора между дисками

Геттерные насосы активировались при температуре, равной 650 °С в течение 1 часа, затем после измерений происходила пассивация в атмосфере воздуха в течение не менее трех часов, с последующей повторной активацией. Заметная скорость откачки по водороду наблюдается при температуре 300 °С. Все измерения вакуумных характеристик для каждого насоса проводились от 4 до 8 раз.

Таблица 4.8. Основные параметры вакуумных насосов из спеченных геттерных дисков

Образец	Температура активации, °С	Число «колонок», шт	Поверхность геттера, см ²	Вес геттера, г	Пористость, %	Тип фланца
NEG300	650	1	300	60	30	DN 40
NEG600		2	600	120		DN 63
NEG800		3	900	180		DN 63
NEG1000		4	1200	240		DN 100
NEG1300		6	1600	360		DN 100

Измерения скорости откачки по водороду и сорбционной емкости по монооксиду углерода выполнялись после активации геттеров при температуре от 350 до 650 °С через каждые 50 °С, но после охлаждения геттерного насоса до комнатной температуры. Целью данного эксперимента было понять, при какой температуре стоит работать геттерным насосам на ЦКП «СКИФ». Время активации при малых температурах выбиралась так, чтобы можно было достоверно измерить скорость откачки по водороду. Сорбционная емкость по водороду оценивается порядка нескольких тысяч л·Торр, поэтому данной сорбционной емкости по водороду хватит прежде чем, геттер будет пассивирован оксидами. К тому же, чрезмерное насыщение геттера водородом приводит к разрушению и растрескиванию геттера. Результаты измерения скорости откачки по водороду и по угарному газу в зависимости от температуры активации для каждого геттерного насоса представлены на рисунке 4.9, сорбционная емкость для каждого типа насоса после активации при максимальной температуре (650 °С) проиллюстрированы на рисунке 4.10. В таблице 4.9 приводятся экспериментальные результаты для геттерных насосов производства ИЯФ СО РАН и параметры насосов фирмы SAES Getters.



а)



б)

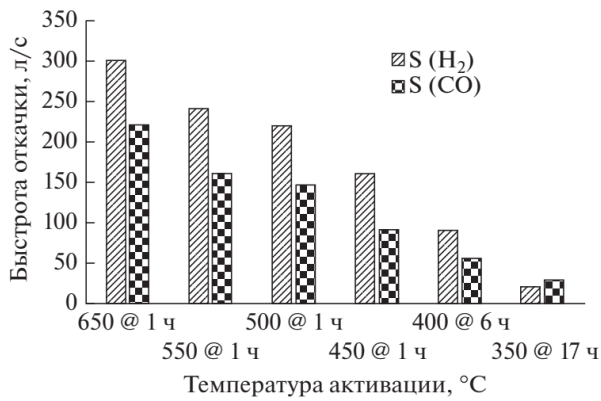


в)

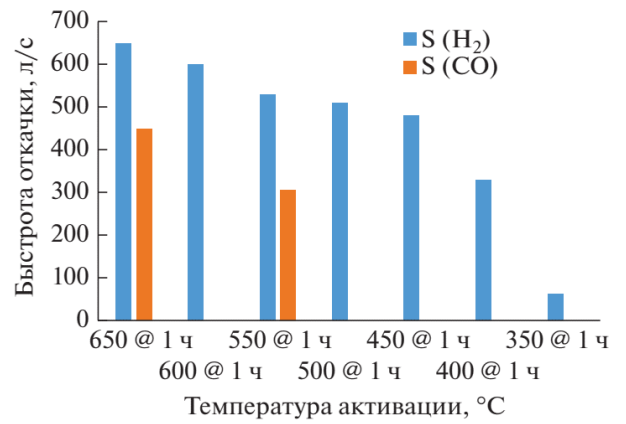


г)

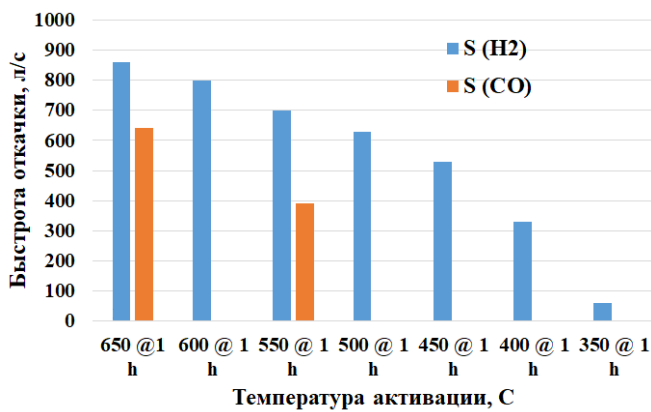
Рисунок 4.8. Изображения геттерных насосов с одной (а), двумя (б), четырьмя (в) и шестью (г) «колоннами» [87]



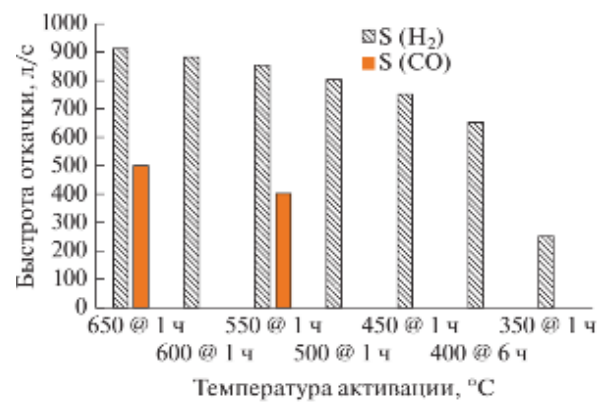
а)



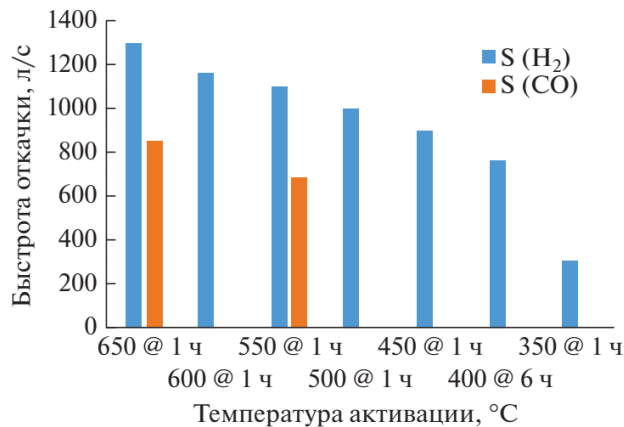
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.9. Быстрота откачки по водороду и по угарному газу в зависимости от температуры активации для насоса с одной (а), двумя (б), тремя (в), четырьмя (г) и шестью (д) «колоннами» [87]

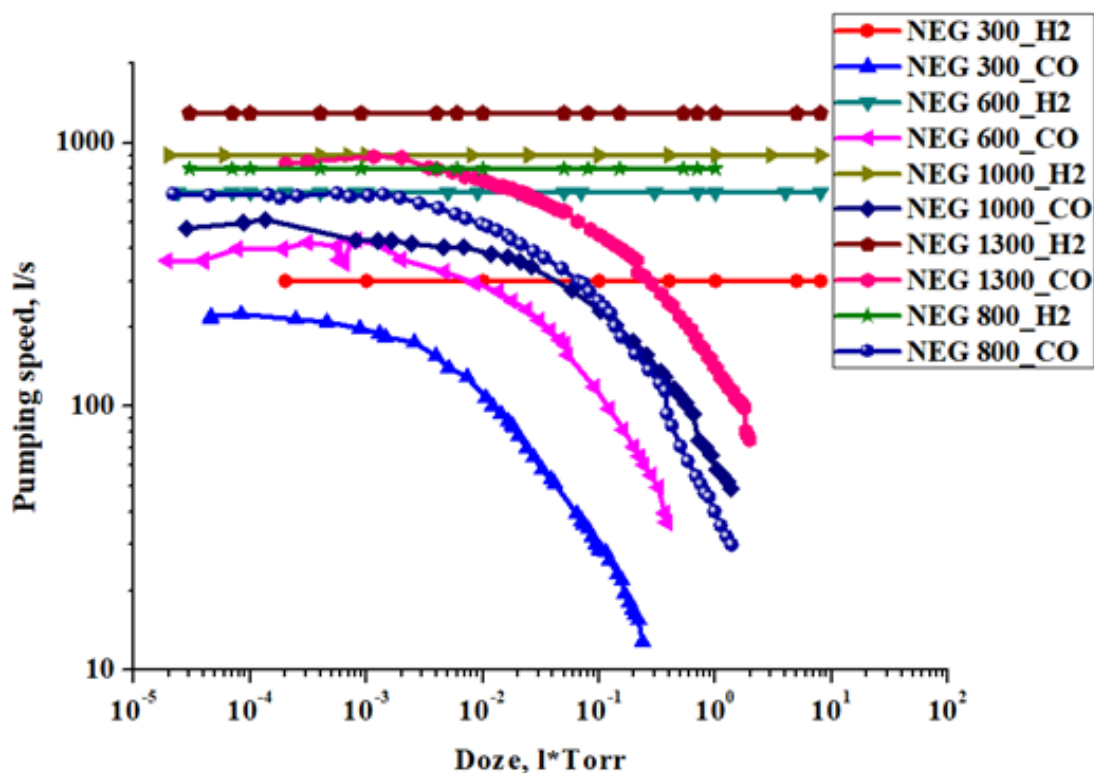


Рисунок 4.10. Сорбционная емкость геттеров для водорода и монооксида углерода для каждого типа насоса после активации при 650 °С в течение 1 ч [87]

4.6.2. Комбинированные насосы

Поскольку геттерные насосы, обладающие даже большой быстротой откачки, не способны откачивать инертные газы и метан, то необходимо добавить к ним небольшой насос, способный откачивать химически пассивные газы (например, магниторазрядный), в таком случае получится универсальный комбинированный насос, обладающий малыми массогабаритными размерами и откачивающий весь спектр остаточных газов.

Впервые данный тип насоса был разработан и изготовлен фирмой SAES Getters (Италия) [37]. В ИЯФ СО РАН был изготовлен и протестирован прототип комбинированного насоса с быстротой откачки 1000 л/с по водороду и 23 л/с по аргону, который в последующем серийно выпускается АО «Катод» (г. Новосибирск).

Таблица 4.9. Экспериментальные результаты для геттерных насосов производства ИЯФ СО РАН и параметры насосов фирмы SAES Getters

	NEG насос	Мах скорость откачки по H ₂ , л/с	Мах скорость откачки по CO, л/с	Сорбционная емкость по CO, л·Торр*	Мощность активации @ 650 °С, Вт	Мощность активации @ 550 °С, Вт	Отношение скорости откачки по H ₂ к площади геттера
ИЯФ СО РАН	NEG300	300	220	0,24	124	78	1,0
	NEG600	650	450	0,38	273	160	1,08
	NEG800	860	640	0,6	240	143	0,96
	NEG1000	900	500	1,4	270	180	0,83
	NEG1300	1300	850	2,0	370	255	0,81
SAES Getters	CapaciTor 200	200	125	0,6	-	58	0,84
	CapaciTor 1000	1000	600	4	-	190	0,88

* Сорбционная емкость по CO соответствует дозе поглощенного газа, при которой быстрота откачки падает до 10% от первоначального значения.

В комбинированном насосе применяется магниторазрядный насос триодного типа с ячейкой «StarCell» производства АО «Катод» и быстротой действия 40 л/с по азоту марки насоса НМТ-К-0,04-СF35. Более подробно данный насос и его характеристики представлены в Разделе 3.

Насос изготовлен из аналогичных геттерных дисков, что и описанные выше сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров. Диски установлены последовательно в ряд с зазором 1,5 мм в количестве 30 шт в каждой «колонне».

Суммарная площадь и вес геттера составляет 1600 см^2 и 360 г , соответственно. Количество «колонок» - 6 шт. Высота (от фланца до торца геттерного насоса) не превышает 130 мм . Температура контролируется термопарой типа «К». Для снижения мощности нагревателя в два раза используется один наружный защитный экран. Геттерный насос располагается на фланцевом соединении типа Conflat Ду 100. 3D изображение комбинированного насоса приведено на рисунке 4.11.

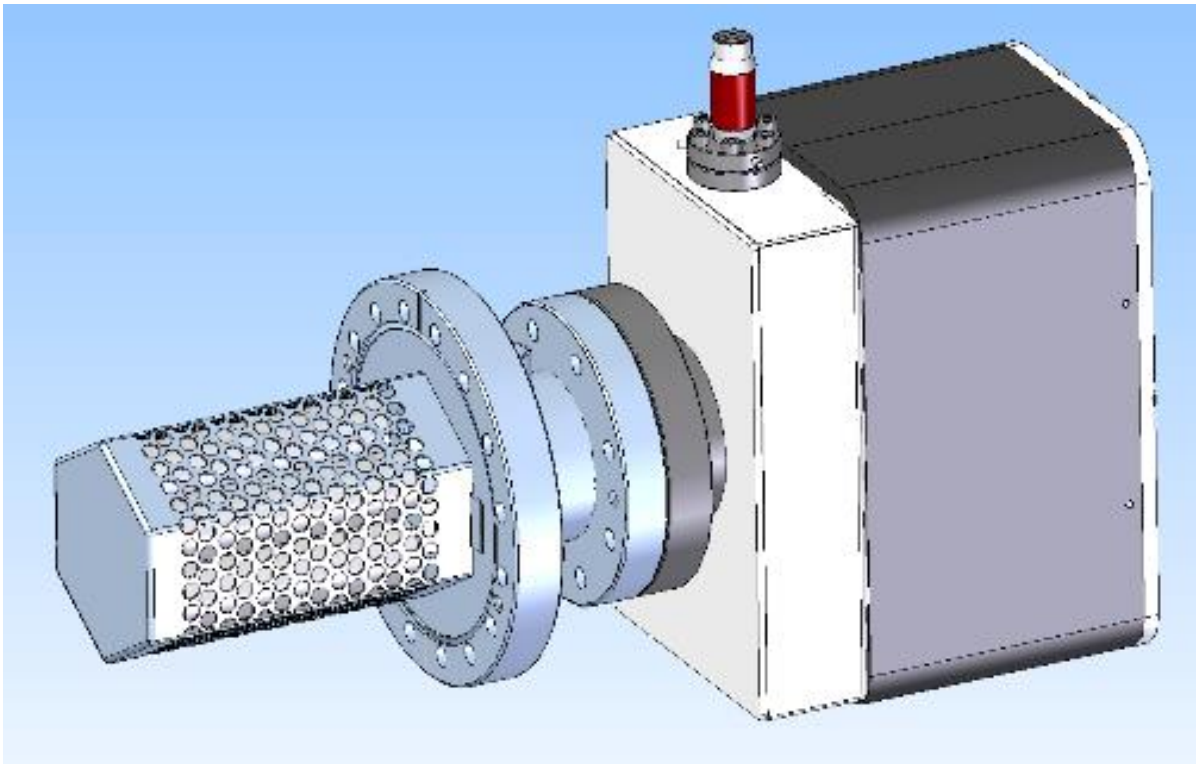


Рисунок 4.11. 3D изображение комбинированного насоса [90]

На рисунке 4.12 представлена фотография комбинированного насоса с быстрой откачкой 800 л/с по водороду марки НГМД-К-0,8-0,02-CF63 производства ООО «Оптикон».

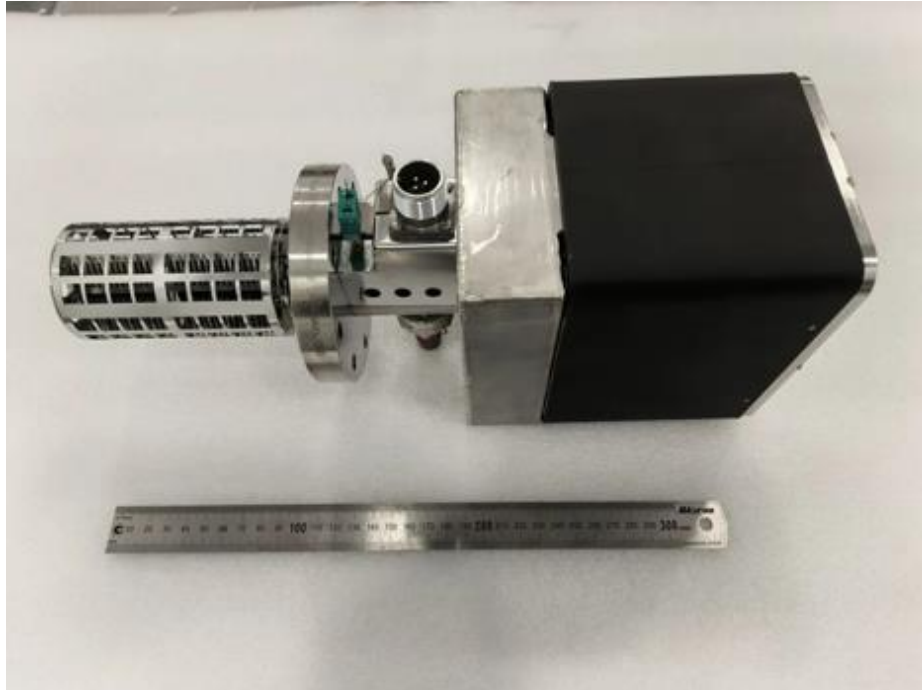


Рисунок 4.12. Фотография комбинированного насоса с быстротой откачки 800 л/с по водороду марки НГМД-К-0,8-0,02-CF63 производства ООО «Оптикон»

Перед началом измерений весь стенд прогревался при температуре 230 °С в течение 24 часов для уменьшения фонового давления. После охлаждения до комнатной температуры, геттерный насос активировался при максимальной температуре (650 °С) в течение 1 часа.

Измерения скорости откачки по различным газам выполнялись каждый раз после активации геттера при температуре 650 °С, и последующего охлаждения геттерного насоса до комнатной температуры, чтобы убедиться, что на поверхности геттера не осталось газов от предыдущих измерений. Измерения сорбционной емкости по каждому газу представлена на рисунке 4.13. Результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями свойств геттерных насосов [87].

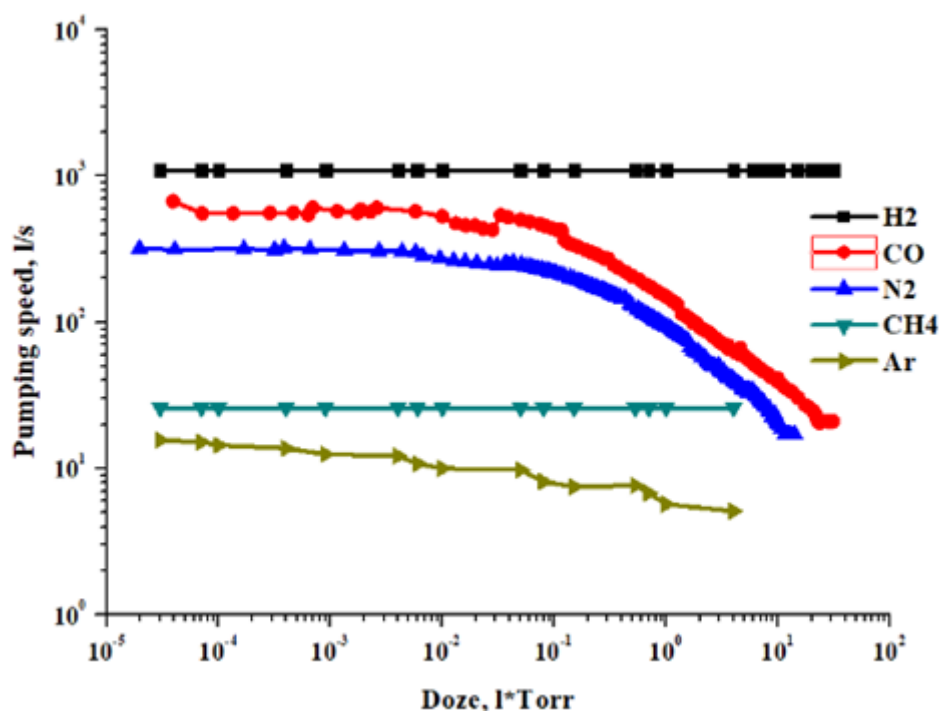


Рисунок 4.13. Зависимости быстроты откачки от количества поглощенного газа для комбинированного насоса для различных газов [90]

К сожалению, появление микро-течей, которые сложно или невозможно устранить без вскрытия на атмосферу - это довольно распространенное явление в сложных электровакуумных установках. Поэтому способность откачивать хоть и небольшие, на уровне $< 10^{-7}$ л·Торр/с, но непрерывно поступающие потоки молекул воздуха, сохраняя необходимый уровень вакуума, является важной характеристикой откачивающей системы. При этом наибольшую опасность для комбинированного насоса представляет аргон, который откачивается только маломощной магниторазрядной частью. Очевидно, накопление аргона в магниторазрядных ячейках должно привести к увеличению предельного давления по аргону, что может повлиять на «вакуумное» время жизни пучка уже при давлении аргона порядка 10^{-10} Торр, поскольку сечение рассеяния релятивистских электронов пропорционально квадрату заряда ядра. Именно это обстоятельство определило выбор магниторазрядной ячейки триодного типа «StarCell», обладающей наибольшей быстротой откачки и сорбционной емкостью по инертным газам, при конструировании комбинированного насоса.

На рисунке 4.14 показано измеренное равновесное давление по аргону в зависимости от поглощенного количества газа (аргона). Видно, что давление аргона находится на приемлемом уровне вплоть до поглощенной дозы порядка 1 л·Торр. Такую дозу аргона можно набрать при непрерывном натекании атмосферного воздуха через течь уровня 10^{-7} л·Торр/с в течение 30 лет.

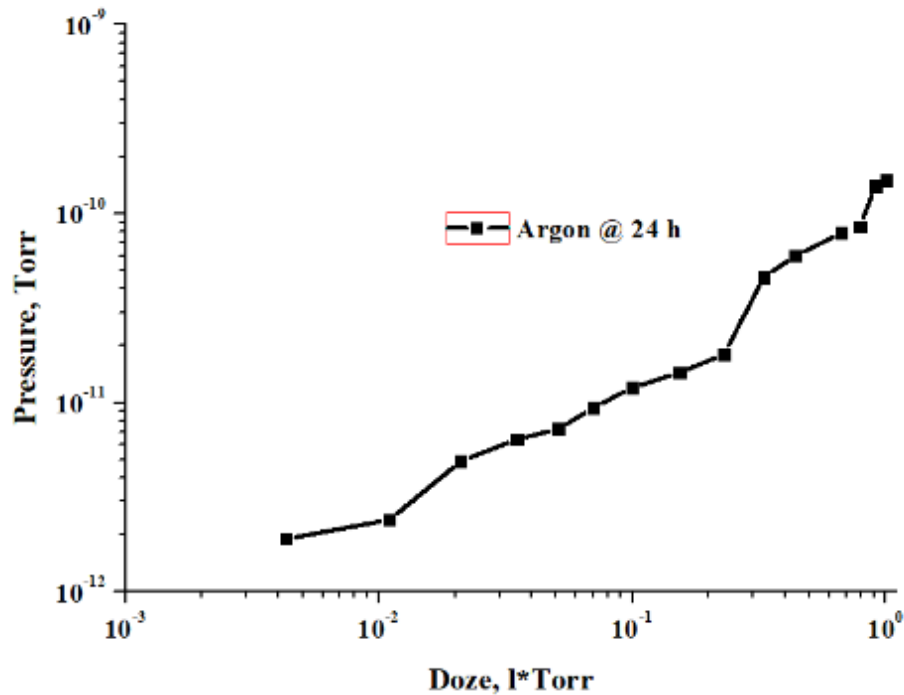


Рисунок 4.14. Равновесное давление в системе от количества поглощенного аргона [90]

В таблице 4.10 представлены результаты измерения параметров комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры комбинированного насоса NEXToorr D1000-StarCell фирмы SAES Getters.

4.6.3. Нераспыляемые геттеры в узкоапертурных камерах

Для того, чтобы увеличить скорость откачки, геттерное покрытие стали наносить прямо на внутреннюю поверхность стенки вакуумной камеры, при этом превращая внутреннюю поверхность вакуумной камеры из источника газовой

нагрузки в эффективный насос, что снижает равновесное давление в вакуумных системах.

Таблица 4.10. Экспериментальные результаты для комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры насоса NEX Torr D1000-StarCell фирмы SAES Getters

	Мах скорость откачки по H ₂ , л/с	Мах скорость откачки по CO, л/с	Сорбционная емкость по CO, л·Торр*	Мах скорость откачки по CH ₄ , л/с	Мах скорость откачки по N ₂ , л/с	Сорбционная емкость по N ₂ , л·Торр*
ИЯФ СО РАН	1000	650	20	26	320	10
NEX Torr D1000- StarCell	1000	580	6	30	320	2,5

* Сорбционная емкость достигается, когда быстрота откачки равняется быстроте откачки магниторазрядного насоса.

Данный способ является одним из эффективных методов получения вакуума в узкоапертурных вакуумных камерах вставных устройств (ондуляторов или вигглеров), где вертикальная апертура для пучка равняется всего 5 мм, горизонтальный – 40 мм и длина вакуумной камеры (от фланца до фланца) примерно 2,7 м.

Как было показано выше, в качестве геттеров применяются металлы 4-ой и 5-ой групп Таблицы Менделеева. В процессе изучения подходящего состава нераспыляемого геттера было изучено более 20 различных покрытий из элементов

Ti, Zr, Nb, V, Hf, а также их двойных и тройных сочетаний. Как было обнаружено, оптимальным покрытием на сегодняшний день можно считать Ti(30 %)-Zr(20 %)-V(50 %) с температурой активации $180 \div 200$ °C [32]. Нанесение покрытия на стенку вакуумной камеры осуществляется методом магнетронного распыления во внешнем соленоидальном поле и позволяет получать на материале основы пленки заданной толщины и химического состава [91]. Данное геттерное покрытие запатентовано в CERN и уже хорошо себя зарекомендовало во многих ускорительных комплексах, например, на коллайдерах LHC (Женева, Швейцария), BEPC-II (Пекин, Китай), SuperKEKB (Цукуба, Япония), источниках синхротронного излучения MAX-IV (Лунд, Швеция), ESRF-EBS (Гренобль, Франция).

Поиск покрытия с температурой активации в диапазоне $140 \div 160$ °C не прекращается и по настоящее время, например, в работе [92] говорится о том, что геттерное покрытие Ti-Zr-Hf-V начинает активироваться уже при температуре $150 \div 160$ °C, но 100% активация достигается либо при откачке в течение более длительного времени, чем 24 ч, либо при температуре больше 160 °C, т.е. важно, чтобы откачивающие свойства нового геттерного покрытия были, как минимум, не хуже по сравнению с широко используемым во всем мире Ti-Zr-V. Поскольку на геттерное покрытие Ti-Zr-V на момент проектирования ЦКП «СКИФ» действовал патент, то было предложено рассмотреть перспективные геттерные пленки на базе титан-тантал, нанесенные на внутреннюю поверхность вакуумных камер из нержавеющей стали.

Для этого были изготовлены четыре одинаковых камеры из бесшовных нержавеющей труб диаметром 100 мм и длиной 2,5 м с фланцами Ду 150 типа ConFlat для подсоединения к вакуумному объему измерителей вакуума и масс-спектрометра. Также для контроля за уровнем вакуума в центре камеры был изготовлен порт с фланцем Ду 40 типа ConFlat. Длина каждой вакуумной камеры выбиралась из расчета обеспечения измерения коэффициента прилипания по водороду с достаточно хорошей чувствительностью.

Камеры были электрохимполированы и промыты согласно рекомендациям [8] для лучшей адгезии покрытия к стенке вакуумной камеры и перед напылением прогреты при температуре 250 °С в течение 24 часов для выявления возможных микротечей и предварительного обезгаживания камер от загрязнений в процессе финишной сборки. Напыление НГ осуществлялось методом магнетронного напыления во внешнем соленоидальном поле, который позволяет получать равномерные покрытия на материале основы. Катод состоял из двух, трех или четырех переплетенных проволочек Ta, Ti, Zr и V с толщиной 0,5 мм и степенью чистоты больше 99%. Напыление происходило в атмосфере аргона при давлении $5E-3$ Торр. В процессе напыления потенциал катода устанавливается на уровне – 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, в процессе напыления вакуумная камера нагревалась еще на 20÷30 °С [91].

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 32 часа, толщина покрытия Ti-Zr-V составит 1,3 мкм.

После каждой замены образца геттера, но до активации геттерного покрытия, проводилась калибровка всех измерителей вакуума. Затем определялась оптимальная температура активации геттера при помощи внешних резистивных нагревателей и теплоизоляции непосредственно на стенде после получения вакуума по нижеследующей методике. Температура контролировалась термопарами типа «хромель-копель».

Коэффициент прилипания является одним из критериев применимости того или иного геттерного покрытия. Чем он больше, тем больше, естественно, и полная скорость откачки со стороны стенок вакуумной камеры. Для более надежных и качественных измерений коэффициентов прилипания перепад давлений измерялся не только на «вход»/«выход» камеры, но и на «вход»/«центр».

Коэффициент прилипания по водороду вычисляется, применяя диффузионную модель Кнудсена для одномерного потока газа вдоль вакуумной камеры с сорбирующими стенками. Метод основан на измерении давлений на краях (или в центре) камеры в течение инъекции газа со стороны вакуумного объема. При квазистационарном режиме, т.е. $\frac{\partial n}{\partial t} \approx 0$ концентрация газа вдоль камеры описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$u \frac{d^2 n(z)}{dz^2} - \alpha \cdot C \cdot n(z) = 0, \quad (4.15)$$

где n – концентрация газа, молекула/см³; V – объем вакуумной камеры на единицу длины, см³/см; α – коэффициент прилипания; $C = A \cdot \bar{v} / 4$ – идеальная скорость откачки стенками камеры на единицу длины, см³/(с·см); \bar{v} – среднеарифметическая скорость молекул, см/с; A – площадь стенки вакуумной на единицу длины, т. е. периметр, см²/см; $u = A_c D$ – проводимость камеры на единицу длины, см⁴/с; A_c – площадь сечения вакуумной камеры, см²; D – коэффициент диффузии по Кнудсену, см²/с.

Представленное уравнение применимо при выполнении следующих условий:

– если длина камеры много больше характеристического размера $f = \frac{4 \cdot S}{\Pi}$, где

S и Π – площадь и периметр сечения вакуумной камеры, соответственно, для камеры круглого сечения характеристический размер равен диаметру камеры;

– коэффициент прилипания α меньше отношения f/L , где L – длина камеры.

Общее решение для уравнения (4.15) имеет вид:

$$n(z) = B_1 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha \cdot C}{u}} \cdot z\right) + B_2 \cdot \exp\left(+\sqrt{\frac{\alpha \cdot C}{u}} \cdot z\right), \quad (4.16)$$

При граничных условиях ($n(L) = n_{out}$, $n(L/2) = n_{centre}$, $\frac{dn}{dz}(0) = 0$), где n_{out}

– концентрация на «выходе» камеры, n_{centre} – концентрация в «центре» камеры.

Если один конец камеры закрыт, и газовый поток, напускаемый с другого конца

камеры, контролируется в течение инъекции, то решение выражения (4.16) для плотности газа или давления имеет следующий вид:

$$\frac{n_{in}}{n_{out}} = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \cosh\left(L \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot C}{u}}\right), \quad (4.17)$$

(для «ВХОД»/«ВЫХОД»)

и

$$\frac{n_{in}}{n_{centre}} = \frac{P_{in}}{P_{centre}} = \frac{\cosh\left(L \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot C}{u}}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot C}{u}}\right)}, \quad (4.18)$$

(для «ВХОД»/«ЦЕНТР»)

На рисунке 4.15 представлены зависимости перепада давлений в центре и на краях камеры от коэффициента прилипания.

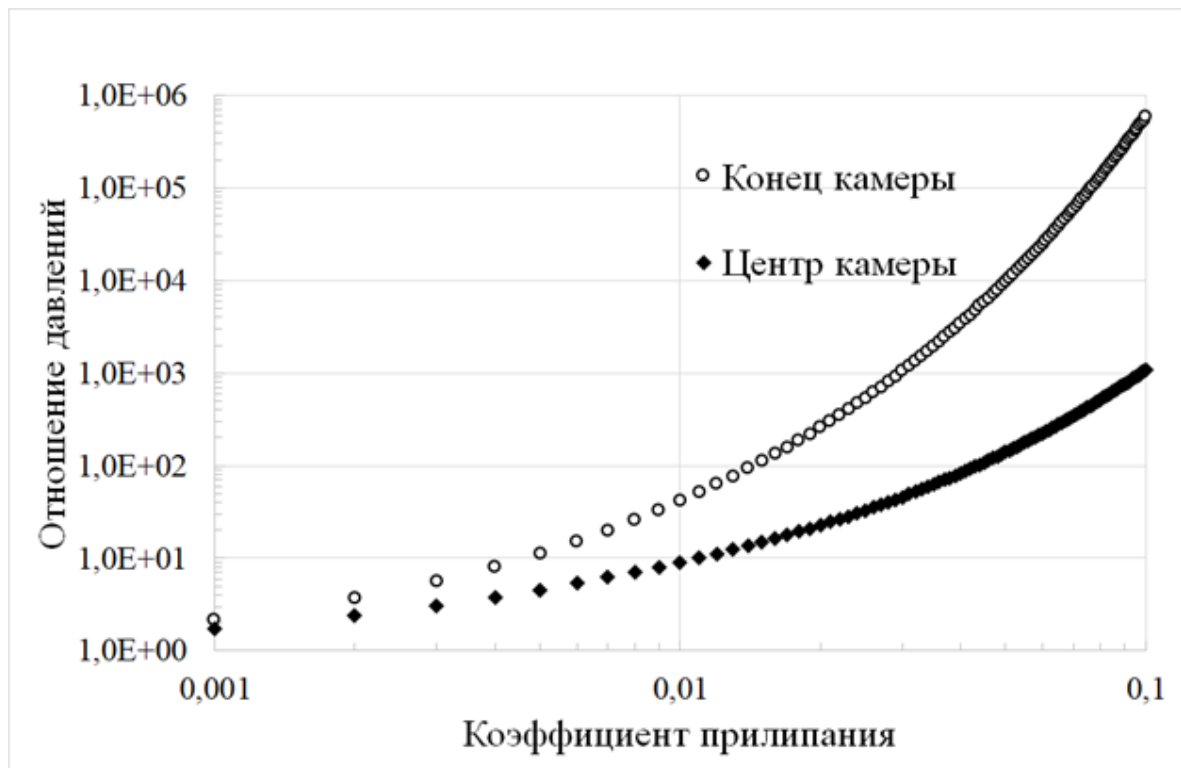


Рисунок 4.15. Отношение давлений на краях камеры в зависимости от коэффициента прилипания [93]

Коэффициент прилипания по монооксиду углерода составляет от нескольких единиц процентов до десятков процентов и сильно зависит от многих факторов, а именно: от материала, из которого были изготовлены образцы, от условий очистки поверхности, подвергалось ли покрытие пассивации до проведения измерений т. д. [94]. Поэтому применение диффузионной модели Кнудсена для определения коэффициента прилипания по монооксиду углерода неприемлемо (ошибка вычислений больше 10 %). Здесь целесообразнее использовать методы анализа молекулярных потоков в трехмерных структурах произвольной геометрии, основанные на упрощенных математических моделях течения разреженного газа (метод угловых коэффициентов или метод Монте-Карло) [93].

С другой стороны, коэффициент прилипания геттера по монооксиду углерода может быть экспериментально определен в течение времени напуска газа с помощью соотношения [93]:

$$\alpha = \frac{Q}{3,64 \cdot A \cdot \Delta P_{IG1}} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (4.19)$$

где Q – газовый поток, поступающий в тест-камеру, л·Торр/с. Равновесное давление на «выходе» камеры $\Delta P_{IG1} = P_{IG1inj} - P_{IG1back}$ определялось как разность между давлением, измеренным в процессе напуска газа, и «фоновым» давлением без инжектируемого газа в начале эксперимента, Торр; T – температура, при которой находится газ, К; M – молекулярная масса, а.е.м.; A – площадь поверхности стенок вакуумной камеры, см².

Погрешность измерения определяется точностью измерения датчика давления с горячим катодом, равной $\pm 10\%$.

Газовый поток в тест-камеру определяется выражением:

$$Q = C \cdot (P_{in} - P_{out}), \quad (4.20)$$

где C – канал с калиброванной проводимостью, л/с; P_{in} , P_{out} – давления на входе и выходе канала, Торр.

Ниже приводится процедура проведения эксперимента по измерению оптимальной температуры геттера.

1. В начале осуществляется прогрев вакуумного объема и датчиков давления при температуре, равной $250 \div 300$ °С в течение 24 часов. При этом температура тестовой вакуумной камеры поддерживается на уровне 120 °С, чтобы не допустить на покрытии нежелательной конденсации паров воды.

2. Затем температура на вакуумном объеме и датчиках давления понижается до 120 °С, и датчики давления включаются и обезгаживаются, потом охлаждаются до комнатной температуры, после чего температура вакуумной камеры опять повышается, но через каждые 50 °С стабилизируется и проводится измерение коэффициента прилипания по водороду и угарному газу. Измерения проводятся до максимальной температуры 400 °С, поскольку нагреть вакуумную камеру при помощи резистивных нагревателей выше этой температуры затруднительно.

3. Оптимальной температурой активации считается температура, при которой достигается максимальный коэффициент прилипания по водороду. Тестовая вакуумная камера выдерживается при данной температуре в течение 4 часов, затем охлаждается до комнатной температуры. Дальнейшие измерения проводятся при комнатной температуре. Определяется коэффициент прилипания по водороду и монооксиду углерода, а также сорбционная емкость по угарному газу.

Необходимо также напомнить, что, в отличие от водорода, монооксид углерода пассивирует геттерную пленку, и по мере насыщения геттерного слоя суммарная скорость откачки по СО будет уменьшаться и достигнет нуля при образовании одного монослоя. В нашем случае монослой образуется на поверхности при дозе, равной 0,12 л·Торр (или $3,9 \cdot 10^{18}$ молекул). Поэтому газовый поток необходимо выбирать порядка $3 \cdot 10^{14}$ л·Торр/с, чтобы пассивации подвергалась только незначительная часть слоя геттера. Количество адсорбируемых молекул газа измерялось при постоянном потоке газа в вакуумную камеру как функция времени, а сорбционная емкость определяется, когда скорость откачки по монооксиду углерода составляет 10 % от максимальной величины. Примеси при напуске газов контролировались при помощи квадрупольного масс-спектрометра.

Водород не пассивирует пленку, а абсорбируется внутри геттера, как следствие, чрезмерное насыщение им приведет к отшелушиванию геттерного слоя, по этой причине измерение сорбционной емкости по водороду представляется затруднительным.

Атомарный состав каждого геттерного покрытия измерялся на образцах, специально размещенных на торце камеры, с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JCM 5700, оснащенного энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией Inca Energy 150. Этот метод позволяет определить поверхностный состав образцов, за исключением самых легких элементов, таких как водород и литий. В таблице 4.11 показан атомный состав каждого покрытия, полученный электронным микроскопом с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией.

Таблица 4.11. Химический состав геттерных покрытий на базе Ta-Ti

Геттер	Тантал, %	Титан, %	Цирконий, %	Ванадий, %
TaTi	78	22	-	-
TaTiZr	52	29	19	-
TaTiZrV	39	21	17	23
TiZrV	-	32	18	50

На рисунке 4.16 показаны экспериментально полученные коэффициенты прилипания по водороду и монооксиду углерода для различных геттерных пленок и температур активации. Геттер Ti-Zr-V выступает в данном случае как эталон. Наилучшими газопоглощающими и активационными свойствами обладает геттер с химическим составом Ta-Ti-Zr-V. Но у него с ростом температуры уменьшается коэффициент прилипания как по водороду, так и по монооксиду углерода [93], что может стать причиной ухудшения вакуумных условий при увеличении температуры активации для продления срока эксплуатации геттерного покрытия.

Напуск CO газа осуществляется до тех пор, пока давления на «входе» и «выходе» не выравнивается, что свидетельствует о том, что геттер пассивировался

полностью. Сорбционная емкость по монооксиду углерода для всех протестированных геттеров находилась в диапазоне $(1 \div 4) \cdot 10^{14}$ молекул/см².

На основании полученных результатов видно, что оптимальным геттерным покрытием для применения в узкоапертурных камерах в накопителе ЦКП «СКИФ» является покрытие с химическим составом Ti-Zr-V, который был успешно нанесен в вакуумных камерах для ондуляторов для источника синхротронного излучения 3 поколения PETRA-III [39], [40] и спиралевидных ондуляторов для релятивистского коллайдера тяжёлых ионов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) (BNL, Нью-Йорк, США) [95]. Отработанная методика нанесения геттерных покрытий может быть применена для напыления вакуумных узкоапертурных камер для ЦКП «СКИФ» длиной порядка 3 м и диаметром 27 мм, которые планируются временно установить вместо сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов.

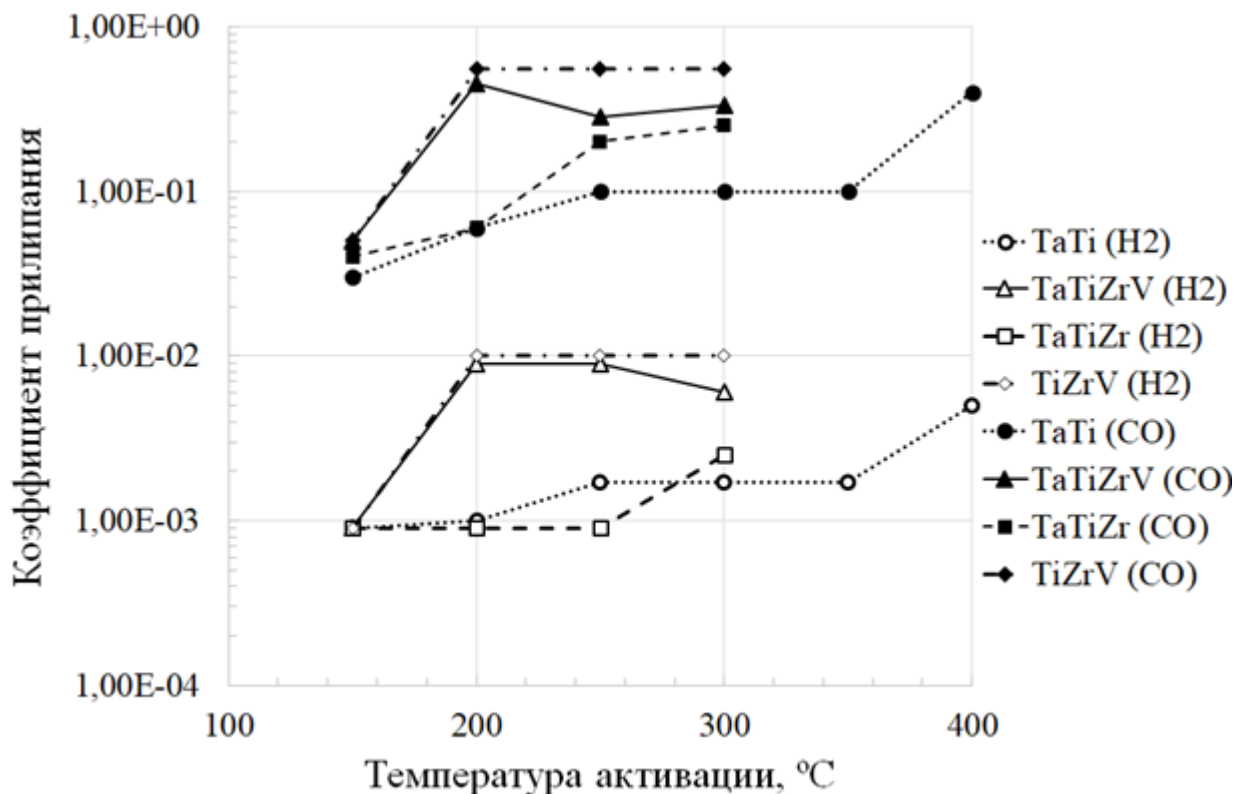


Рисунок 4.16. Начальные коэффициенты прилипания по водороду и монооксиду углерода в зависимости от температуры активации [93]

Глава 5. Вакуумная система инжекционной части ЦКП «СКИФ»

5.1. Вакуумная система линейного ускорителя

Сибирский кольцевой источник фотонов или ЦКП «СКИФ» – это источник синхротронного излучения 4+ поколения, создаваемый в Научноградском Кольцово под Новосибирском. СКИФ представляет собой ускорительный комплекс, состоящий из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, бустерного синхротрона, ускоряющего электроны с 200 МэВ до полной энергии с частотой 1 Гц, и накопителя. Накопитель релятивистских электронов с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и сверхмалым расчетным горизонтальным натуральным эмиттансом 73.2 пикометра на радиан будет поставлять пучки синхротронного излучения с предельной яркостью в диапазоне от 100 эВ до 100 кэВ на 30 экспериментальных станций [96]. На рисунке 5.1 показана общая схема ЦКП «СКИФ».

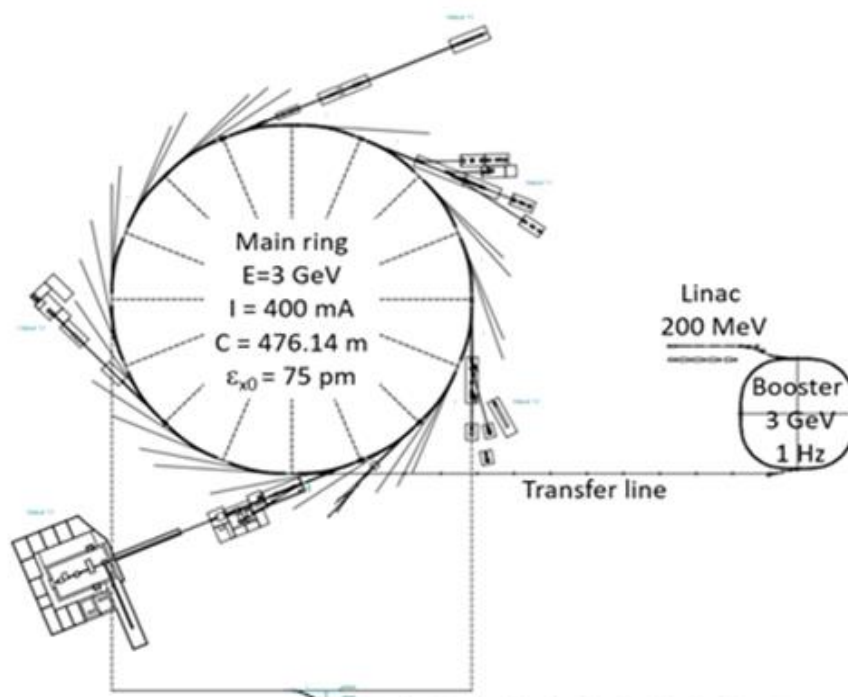


Рисунок 5.1. Общая схема ЦКП «СКИФ»

При разработке вакуумной системы линейного ускорителя (Линака) ЦКП «СКИФ» был учтен опыт создания и эксплуатации вакуумных систем линейных ускорителей ТНК (Зеленоград, Россия) [24] и инжекционного комплекса ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН.

С помощью шиберов линейный ускоритель разделяется на три вакуумных объема. Первый включает в себя СВЧ-пушку, второй – систему группировки и предускорения, которая заканчивается предускорителем-группирователем, третий объем состоит из регулярных ускоряющих секций. В рабочем состоянии во всех объемах линейного ускорителя давление остаточного газа не должно превышать 10^{-9} Торр. Для передачи СВЧ мощности от клистронов (50 МВт) к нагрузкам планируется использовать волноводы с внутренним поперечным сечением 72×34 мм² с водяной термостабилизацией, сечение вакуумных камер Ду 35. Все фланцевые разъемные соединения Линака – фланцы типа Conflat, для волноводного тракта – специальные прямоугольные LIL фланцы.

Каждый вакуумный объем отсекается цельнометаллическим вакуумным шибером (время срабатывания ~ 2 с), способным обеспечить автоматическое закрытие объема пушки в случае вакуумной аварии.

Откачка линейного ускорителя осуществляется магниторазрядными насосами триодного типа с быстротой откачки 40 л/с по азоту, обладающими большей скоростью по инертным газам, чем у диодного типа. Для форвакуумной откачки используются мобильные вакуумные откачные станции, включающие в себя турбомолекулярный насос и спиральный насос.

Контроль вакуума осуществляется форвакуумным терморезистивным датчиком давления ПМТ-6-3, измеряющим давление от 10^{-3} Торр до атмосферы. Высокий вакуум измеряется датчиком давления с горячим катодом Bayard-Alpert (от $2 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-4} Торр). В каждой части Линака располагается минимум по одному датчику давления (каждого типа) и цельнометаллическому угловому ручному клапану Ду 40 для предварительной откачки. Цельнометаллические угловые клапаны требовательны к чистоте поверхности и малейшее загрязнение на них приводит к нарушению герметичности. Поэтому последовательно к

цельнометаллическим клапанам пристыковываются угловые клапаны с витоновым уплотнением.

Поскольку клистроны (три из четырех изготовлены в ИЯФ СО РАН, один – фирмы Canon (Япония)) являются вакуумно-изолированными изделиями, то в них предусмотрены магниторазрядные насосы диодного типа с быстротой откачки 20 л/с по азоту и насос на базе нераспыляемых геттеров с быстротой откачки 300 л/с по водороду. Также предусмотрен цельнометаллический угловой клапан Ду 40 для предварительной откачки во время прогрева клистрона или активации геттера.

На рисунке 5.2. представлена схема расположения вакуумного оборудования на Линаке.

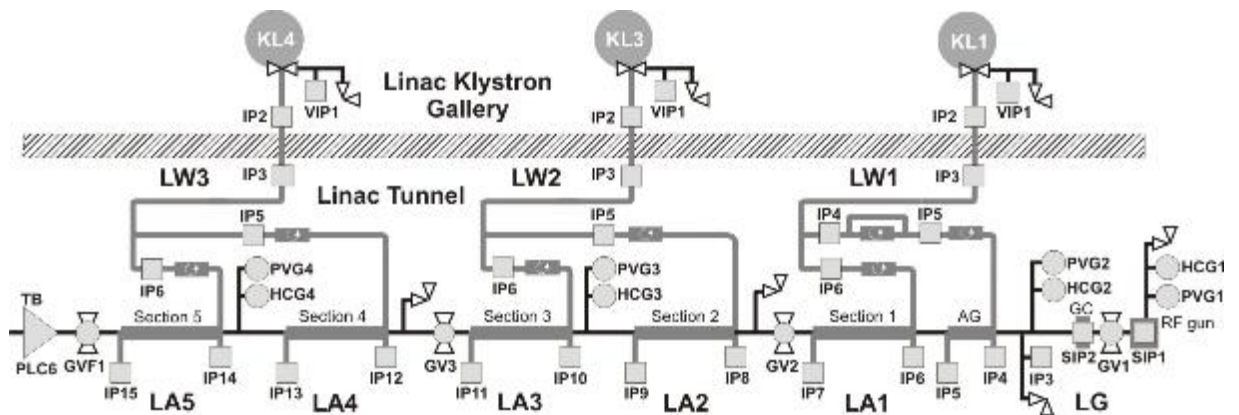


Рисунок 5.2. Схема расположения вакуумного оборудования на Линаке. IP – магниторазрядный насос; PVG – форвакуумный датчик давления; HCG – датчик давления с горячим катодом; GV – цельнометаллический шибер Ду 40; IP – магниторазрядный насос; PVG – форвакуумный датчик давления; HCG – датчик давления с горячим катодом; GV – цельнометаллический шибер Ду 40; GVF – быстрый аварийный шибер Ду 40; LA – ускоряющая структура; LW – волноводный тракт; LG – участок группировки пучка

5.2. Вакуумная система перепускных каналов

Суммарная длина канала перепуска от Линака до Бустера равна примерно 24 м. Вакуумные камеры в канале Линак-Бустер имеют внутренний диаметр 35 мм, и

изготовлены из бесшовной трубы с внешним диаметром 38 мм. Материал трубы – нержавеющая сталь аустенитного типа марки 316L. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного нагревом, применены гидроформованные сильфонные узлы Ду 40 с фланцами типа Conflat.

Полная длина канала транспортировки пучка из Бустера до Накопителя порядка 250 м. Канал Бустер-Накопитель условно разделен на три части: часть канала, находящаяся в тоннеле Бустера (ТМ1); часть канала в тоннеле Бустера-Накопителя (ТМ2) и подъем канала (ТМ3). Сечение большинства вакуумных камер участка ТМ1 и ТМ3 имеет внутренний диаметр 38 мм. Вакуумная камера выполняется из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L с внешним диаметром 40 мм. Фланцевое соединение – типа Conflat Ду 40.

Вакуумные камеры участка канала ТМ2 изготавливаются из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L диаметром 42,4 мм и толщиной 2 мм. Фланцевое соединение – типа Conflat Ду 63. Для компенсации погрешностей изготовления камер также применяются гидроформованные сильфонные узлы Ду 63 с фланцами типа Conflat.

Расположение вакуумного оборудования на каналах Линак-Бустер и Бустер-Накопитель проиллюстрированы на рисунке 5.3 и рисунке 5.4, соответственно.

Высоковакуумная откачка состоит из магниторазрядных вакуумных насосов триодного типа с быстротой откачки, равной 40 л/с по азоту. Магниторазрядные насосы располагаются на расстоянии 8 метров друг от друга. Для предотвращения прорыва атмосферы в Линак, Бустер или Накопитель в начале и конце канала устанавливаются быстрые аварийные электропневматические шиберы (время срабатывания ~ 10 мс).

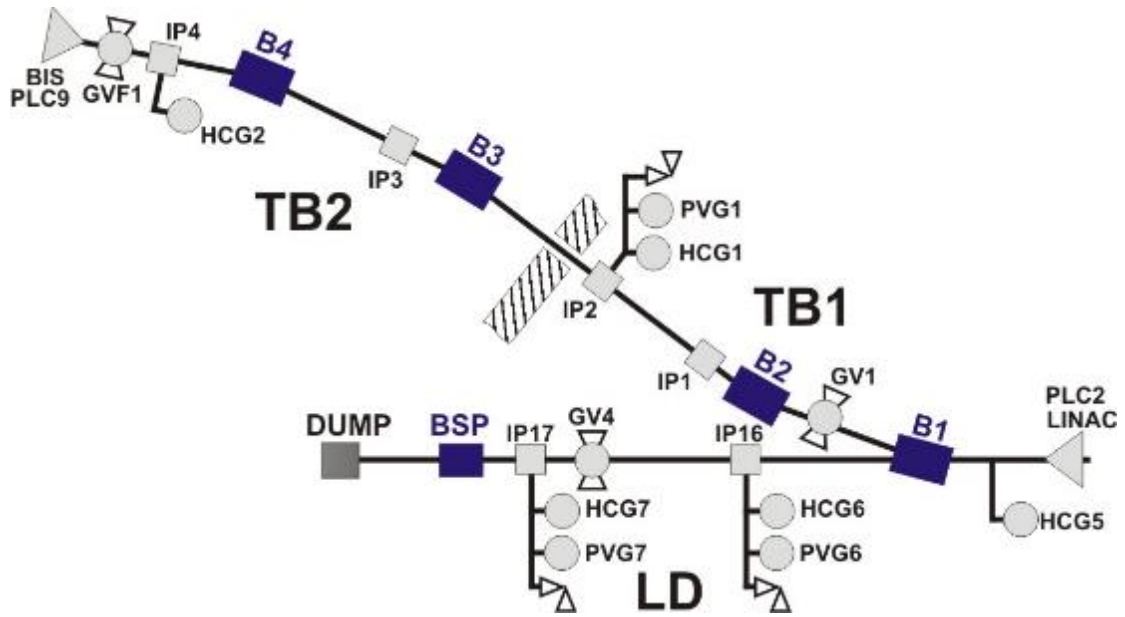


Рисунок 5.3. Схема расположения вакуумного оборудования на канале Линак-Бустер. IP – магниторазрядный насос; PVG – форвакуумный датчик давления; HCG – датчик давления с горячим катодом; GV – цельнометаллический шибер Ду 40; GVF – быстрый аварийный шибер Ду 40

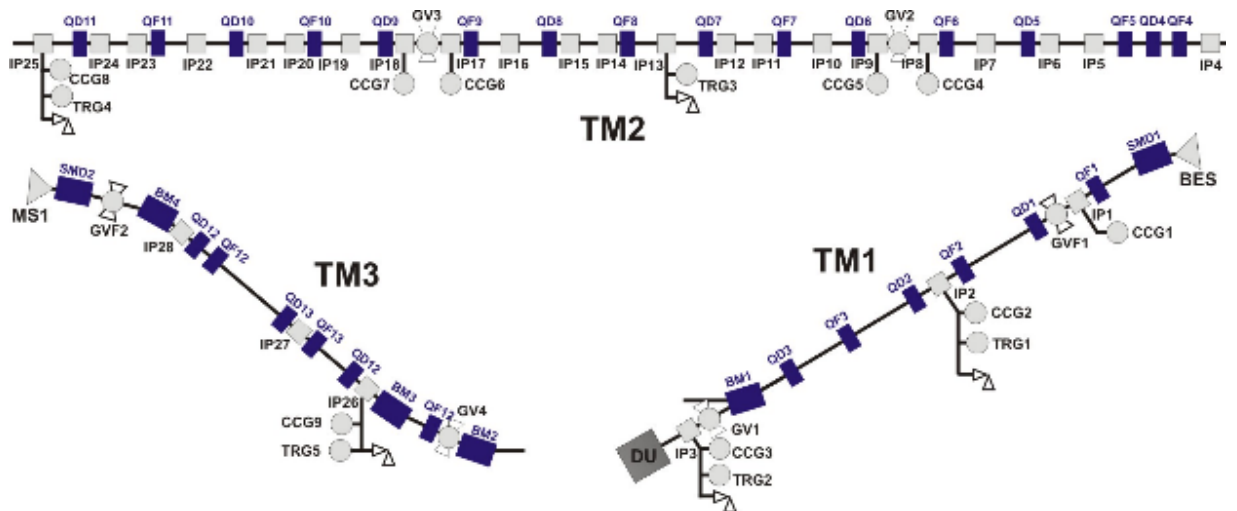


Рисунок 5.4. Схема расположения вакуумного оборудования на канале Бустер-Накопитель. IP – магниторазрядный насос; TRG – форвакуумный датчик давления; CCG – датчик давления с горячим катодом; GV – цельнометаллический шибер Ду 40; GVF – быстрый аварийный шибер Ду 40

Как и в Линаке и Бустере для форвакуумной откачки используются мобильные вакуумные откачные станции, включающие в себя турбомолекулярный насос и спиральный насос, которые подключаются через цельнометаллические угловые ручные клапаны Ду 40 и последовательно пристыкованные к нему угловые клапаны с витоновым уплотнением. Контроль вакуума осуществляется форвакуумным терморезистивным датчиком давления ПМТ-6-3 и датчиками давления с горячим катодом Bayard-Alpert.

В таблице 5.1 представлен полный перечень вакуумного оборудования обоих каналов.

Поскольку каналы транспортировки предназначены для однократного перепуска пучка заряженных частиц, то к ним не предъявляются жестких требований по вакууму: достаточно иметь среднее давление порядка $2 \cdot 10^{-8}$ Торр. Основным источником газовой нагрузки является термическое газовыделение. Удельный коэффициент термического газовыделения равен $3 \cdot 10^{-11}$ л·Торр/с/см², которое достигается после 48 часов непрерывной откачки. Единственное место, где требуется получение локально сверхвысокого вакуума является место соединения канала с Накопителем из-за того, что статическое давление в накопительном кольце необходимо не хуже 10^{-10} Торр. По этой причине на подъеме канала перепуска Бустер-Накопитель организована дифференциальная откачка, которая получается применением двух магниторазрядных насосов триодного типа (скорость откачки 40 л/с по азоту), расположенных на расстоянии 3,5 м друг от друга, и комбинированного насоса (магниторазрядный насос + насос на основе нераспыляемого геттера) с быстротой откачки 1000 л/с по водороду, который размещается максимально близко к накопительному кольцу. Расчетное распределение профиля давления и измеренные значения давления в канале Бустер-Накопитель показаны на рисунке 5.5. Улучшение вакуума перед подъемом канала связано с меньшим коэффициентом термического газовыделения, чем закладывалось при расчетах, из-за более длительного времени откачки данной части канала (больше девяти месяцев непрерывной откачки). Ухудшение вакуума перед накопителем

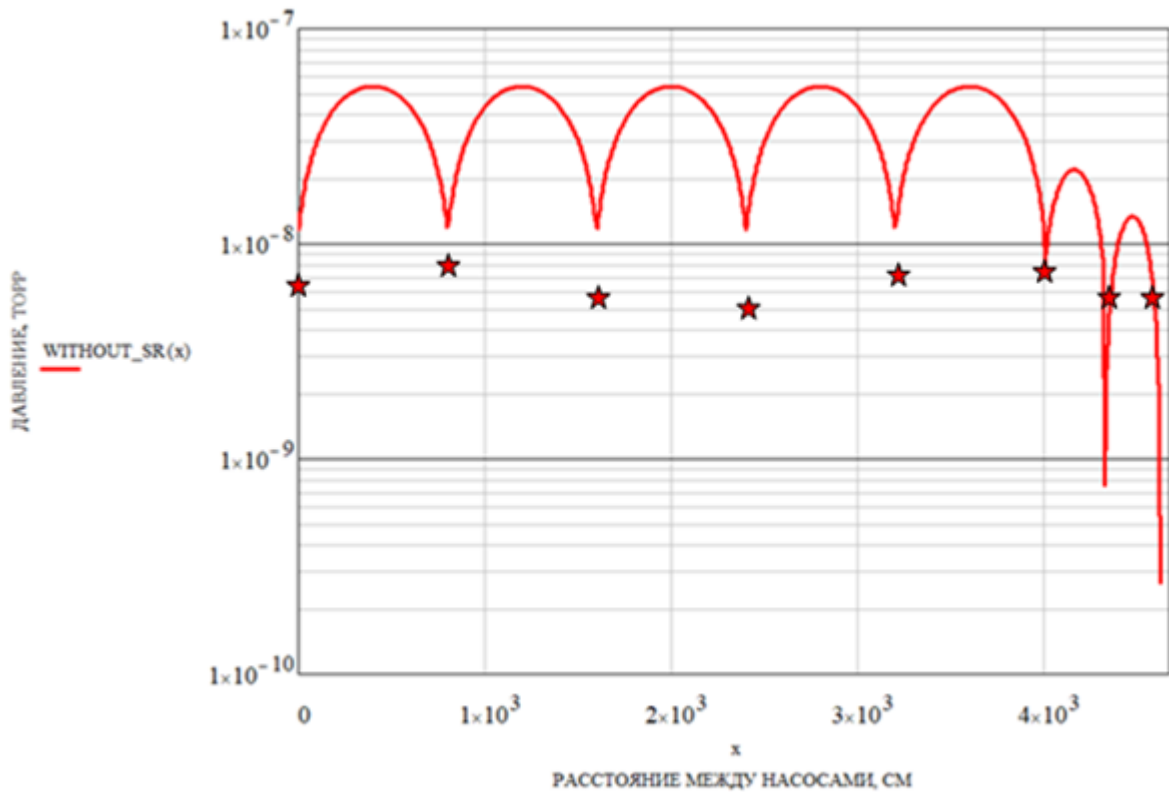


Рисунок 5.5. Расчетное распределение давления и измеренные значения давления (★) в канале транспортировки Бустер-Накопитель (показаны последние 50 м канала). Коэффициент термического газовыделения равен $3 \cdot 10^{-11}$ л·Торр/с/см²

5.3. Вакуумная система бустерного синхротрона ЦКП «СКИФ»

При проектировании вакуумной системы бустерного синхротрона для источников фотонов ЦКП «СКИФ» за основу была взята вакуумная система бустера NSLS-II. Разница заключается в том, что периметр бустера для «СКИФ» длиннее на 300 мм.

На рисунке 5.6 показана общая схема вакуумной системы бустера. Вакуумная система бустера, с периметром 158,71 м, состоит из 4 суперпериодов (каждый из которых включает в себя поворотную секцию длиной 31 м и 8,7 м прямолинейный промежуток), изолированных друг от друга цельнометаллическими ручными прямопролетными клапанами Ду 63 с RF контактами производства ИЯФ СО РАН.

Таблица 5.1. Вакуумное оборудование каналов транспортировки ЦКП «СКИФ»

	Канал Линак- Бустер	Канал Бустер-Накопитель			
		ТМ1	ТМ2	ТМ3	Всего
Магниторазрядный насос	6	3	22	2	27
Комбинированный насос	-	-	-	1	1
Форвакуумный датчик давления	3	2	2	1	5
Высоковакуумный датчик давления	5	3	5	1	9
Быстрый аварийный шибер	1	1	-	1	2
Цельнометаллический затвор	2	1	2	1	4
Клапан для форвакуум откачки	3	2	2	1	5

Высокий вакуум достигается магниторазрядными насосами триодного типа с быстротой откачки по азоту 40 л/с, расположенными на расстоянии 2,2 м друг от друга (по 15 насосов в поворотных секциях и по 3 в промежутках диагностики и выпуска и по 2 в промежутке впуска и резонаторном промежутке). В самих резонаторах, где присутствует большая газовая нагрузка из-за наличия большой площади поверхности резонатора, особенно во время тренировки, требуются насосы с большой скоростью откачки. Поэтому в каждом резонаторе установлен комбинированный насос (магниторазрядный насос триодного типа с быстротой откачки 40 л/с по азоту и насос на базе нераспыляемого геттера с быстротой откачки 1300 л/с по водороду).

Требуемый уровень вакуума определяется тем, что при давлении $2 \cdot 10^{-8}$ Торр обеспечивается время нарастания ионной неустойчивости пучка электронов порядка времени затухания бетатронных колебаний. Для обеспечения необходимого уровня вакуума и для соблюдения электромагнитной «гладкости» камеры порты откачки изготавливаются из сплошной трубы с пазами под откачку с суммарной площадью $5,2 \text{ см}^2$ (рисунок 5.7). Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса определяется пазами и составляет 13 л/с.

В каждом промежутке располагается по два цельнометаллических угловых ручных клапана Ду 40 с фланцами типа Conflat и последовательно пристыкованные к нему угловые клапаны с витоновым уплотнением для форвакуумной откачки, по одному форвакуумному датчику и по два датчика высокого вакуума. В прямолинейных промежутках также установлены по одному масс-спектрометру.

В таблице 5.2 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, нержавеющей 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). При изготовлении камер из алюминиевых или медных сплавов искажения магнитных полей будут увеличены в 26 и 41 раз, соответственно, что недопустимо с точки зрения стабильности орбиты пучка.

Вакуумная камера в поворотных магнитах, изготовленная из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L, представляет собой в поперечном сечении эллипс $41 \text{ мм} \times 24 \text{ мм}$ с молекулярной проводимостью $3,2 \text{ л} \cdot \text{м}/\text{с}$). Из-за малого расстояния между магнитами в поворотных секциях, вакуумная камера одного гирдера содержит в себе камеры дипольных магнитов BD и BF, короткие прямолинейные промежутки для мультипольных магнитов, порты для

дополнительного вакуумного оборудования (датчиков давления, магниторазрядных насосов или клапанов для форвакуумной откачки), сильфоны, датчики положения пучка, а также специальные плавные переходы с эллипса на круглые отверстия диаметром 46 мм. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения Ду 63 типа Conflat, соединения участков вакуумной камеры выполнены аргонно-дуговой сваркой неплавящимся электродом в защищенной атмосфере инертного газа. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного нагревом, применены сварные сильфонные узлы.

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

Вакуумная камера впускных/выпускных BUMP магнитов имеет форму эллипса с внутренней апертурой $60,3 \text{ мм} \times 21 \text{ мм}$. Толщина стенки 0,5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются высокотемпературным медно-оловянистым припоем CuSn10 ребра жесткости из нержавеющей стали марки 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм друг от друга. Температура плавления припоя равняется $980 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 ЦКП «СКИФ».

Апертура основных камер впускного и выпускного септумов аналогична апертуре дипольного магнита, т.е. имеет сечение эллипс $41 \text{ мм} \times 24 \text{ мм}$. 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, сильфоны в промежутках впуска/выпуска снабжены ВЧ экранами, изготовленными из нержавеющей стали марки 316 LN (рисунок 5.8).

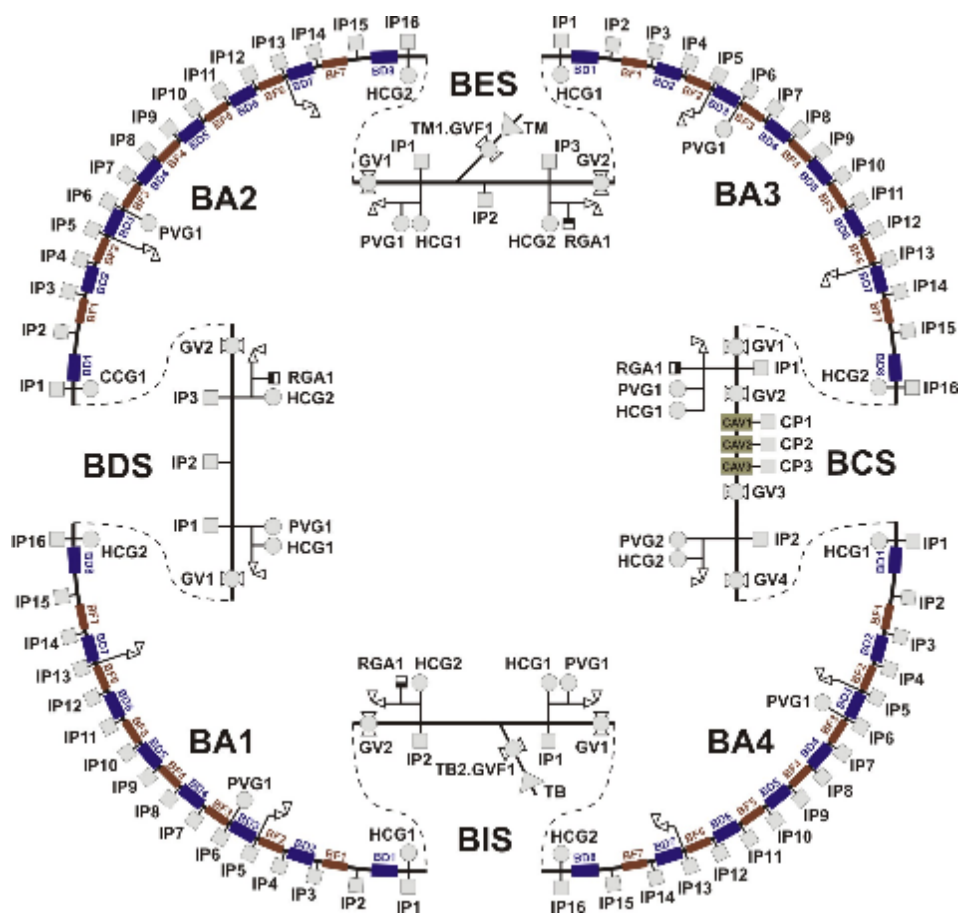


Рисунок 5.6. Схема расположения вакуумного оборудования в бустере ЦКП «СКИФ». IP – магниторазрядный насос; PVG – форвакуумный датчик давления; HCG – датчик давления с горячим катодом; RGA – масс-спектрометр; GV – цельнометаллический шибер Ду 40; GVF – быстрый аварийный шибер Ду 40. BA1-4 – арки бустера; BIS – участок инъекции; BES – участок экстракции; BDS – участок диагностики; BCS – резонаторный участок

Также для обеспечения разрыва замкнутого витка в промежутке диагностики установлена керамическая камера диаметром 95 мм с фланцами Ду63 типа Conflat. Вакуумные камеры диагностического промежутка, изготовленные из трубы нержавеющей стали марки 316 L, имеют апертуру равную диаметру 63,5 мм с толщиной стенки 1,6 мм.

Датчики положения пучка в поворотных секциях имеют апертуру, аналогичную дипольной вакуумной камере, в прямолинейных промежутках – эллипс 62 мм × 22 мм.

Особенности конструирования вакуумных камер бустера, таких как дипольная камера BD и BF магнитов, кикера, BUMP и обоих септумов, а также расчеты механической прочности представлены в [97].

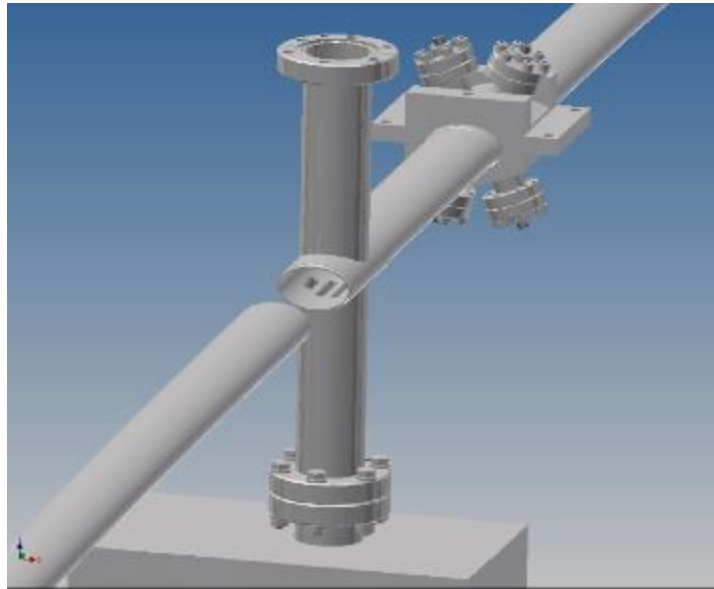


Рисунок 5.7. Пикап-электроды и порт откачки с пазами [98]

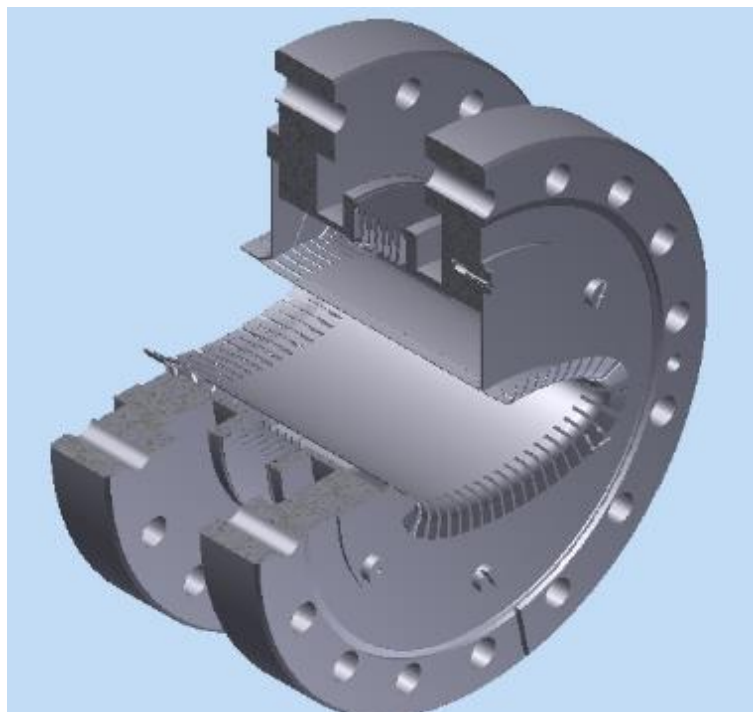


Рисунок 5.8. Сильфонный узел апертурой 62 мм × 22 мм с RF контактами [98]

Таблица 5.2. Вакуумное оборудование бустера СКИФ

Название промежутка	Магниторазрядн ый насос	Комбинированн ый насос	Форвакуум датчик	Высоковак датчик	Масс- анализатор	Шибер	Клапаны форвакуум откачки
Поворот _1	16	-	1	2	-	2	2
Диагнос тика	3	-	1	2	1	-	2
Поворот _2	16	-	1	2	-	2	2
Выпуск	3	-	1	2	1	-	2
Поворот _3	16	-	1	2	-	2	2
Резонат ор	2	3	2	3	1	2	2
Поворот _4	16	-	1	2	-	2	2
Впуск	2	-	1	2	1	-	2
Итого	74	3	9	17	4	10	16

5.3.1. Расчет профиля давления

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) определяется решением уравнения:

$$q_i - \sum_p S_{pi} \cdot \delta(z - z_p) \cdot [P_i - P_{0i}] + u_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial z^2} = 0, \quad (5.1)$$

Здесь q_i – суммарный коэффициент газовой выделенности 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 десорбциями, 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

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

полуоси эллипса, метр, T – температура, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молярная масса газа, кг/кмоль.

Допуская постоянство интенсивности десорбции вдоль камеры, распределение давления вдоль камеры между насосами будет иметь форму параболы (рисунок 5.9) и иметь следующее решение с учетом граничных условий:

$$P(x) = -\frac{q_\Sigma \cdot x^2}{2u} + \frac{q_\Sigma \cdot L}{2u} \cdot x + \frac{q_\Sigma \cdot \Pi \cdot L}{S_{эфф}}, \quad (5.2)$$

где q_Σ – суммарный коэффициент газовой выделенности 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.

При наличии синхротронного излучения фотонно-стимулированная десорбция будет доминировать над термической десорбцией. Основной

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

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)^{-\alpha} \text{ [молекула/фотон]}, \quad 5.3$$

где η_0 – начальное значение коэффициента десорбции, молекула/фотон; 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 $0,6 \div 1,0$ [99]. Формула справедлива при фотонной дозе $\Gamma > 10^{19}$ фотон/м.

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

$$\Delta \hat{P} = \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{12u} L^2, \quad (5.4)$$

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 – переводной коэффициент, равный количеству молекул в литровом объеме при давлении 1 Торр при комнатной температуре 300 К и равняется $3,2 \cdot 10^{19}$, молекула/(л·Торр).

Давление на входе насосов определяется из соотношения:

$$P_0 = \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{S} L, \quad (5.5)$$

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

$$\hat{P} \approx \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K + q \cdot \Pi}{9u} L^2, \quad (5.6)$$

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 показателе степени α , равным 0,67, поток десорбированных молекул оказывается пропорционален кубическому корню от фотонного потока:

$$Q = \eta(\Gamma) \cdot \Gamma' \cdot k \propto \Gamma'^{1/3}, \quad (5.7)$$

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

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:

$$\Gamma' \approx 8 \cdot 10^{20} I \cdot E \text{ [фотон/с]}, \quad (5.8)$$

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

Это позволяет проводить усреднение молекулярных потоков на участках, где интенсивность облучения изменяется в десятки раз [33]. 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 находится в кубической зависимости от характерного размера поперечного сечения камеры, поэтому эффективность сосредоточенных насосов будет определяться проводимостью камеры.

Для поворотной секции бустера ЦКП «СКИФ» ($a_1=0,0205$ 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 (рисунок 5.10).

Для достижения уровня вакуума лучше $2 \cdot 10^{-8}$ Торр необходимо, чтобы величина коэффициента фотонно-стимулированной десорбции не превышала $2 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон. Данная величина достигается при накопленной дозе фотонов 10^{23} фотон/м или интеграле тока около 1,43 А·час. Более подробно расчет профиля давления представлен в [97], [98].

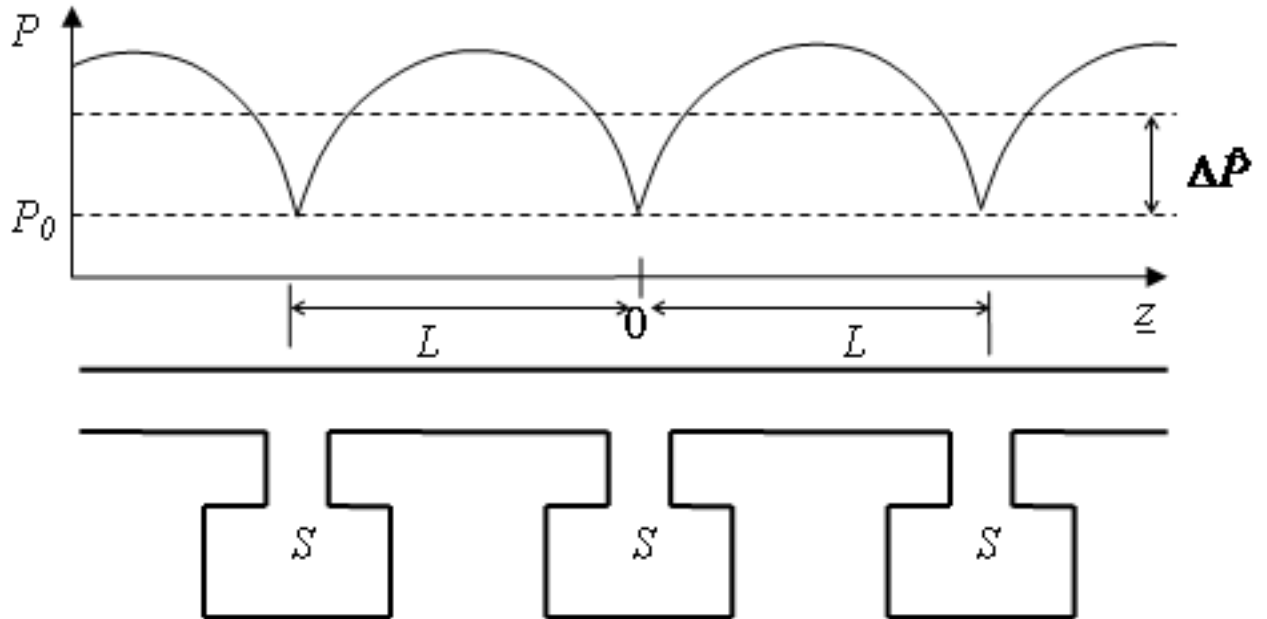


Рисунок 5.9. Схематическое расположение равномерно расположенных сосредоточенных магниторазрядных насосов с быстротой откачки S [98]

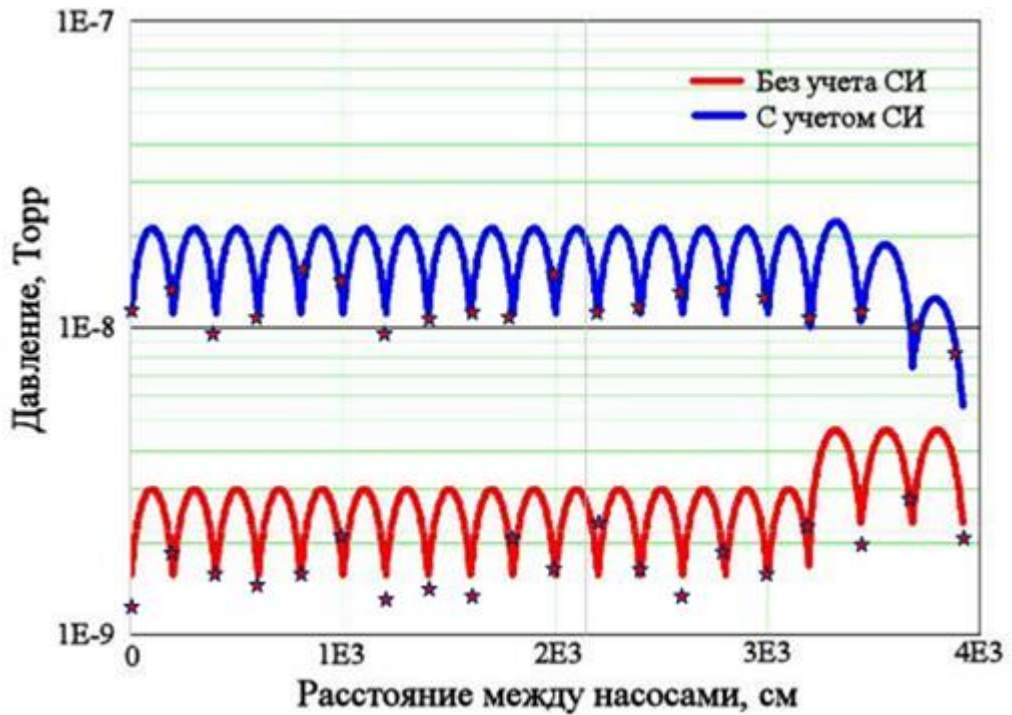


Рисунок 5.10. Расчетный профиль давления и измеренные значения давления (★) вдоль одной поворотной секции и прямолинейного промежутка. Коэффициент термического газовыделения равен 10^{-11} л·Торр/с/см², для поворотной секции: $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ молекул/фотон, $\Gamma = 8,8 \cdot 10^{16}$ фотон/м/с; для инжекционного промежутка (среднее): $\Gamma = 1,8 \cdot 10^{16}$ фотон/м/с, $\eta = 4,3 \cdot 10^{-4}$ молекул/фотон [97], [98]

Заключение

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

- Исследованы вакуумные свойства люминофорных материалов (сцинтиллятор Р43, аэрогель из аморфного диоксида кремния) в зависимости от длительности обезгаживания, условий подготовки и способа изготовления;
- Исследованы вакуумные свойства сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов, изготовленных объемной и фронтальной полимеризацией в зависимости от длительности обезгаживания, условий подготовки и способа изготовления;
- Изучено термическое газовыделение для карбидных керамических материалов (карбида бора и карбида кремния) в зависимости от длительности обезгаживания и при различных температурах;
- Разработаны и испытаны разъемные вакуумные соединения больших диаметров (до 2000 мм) для получения сверхвысокого вакуума;
- Сконструированы, экспериментально измерены быстрота откачки малогабаритных однопотенциальных неохлаждаемых триодных и Noble диодных насосов и запущены серийно в производство;
- Сконструированы, экспериментально измерены газопоглощающие характеристики и активационные свойства высоковакуумных насосов на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al, запущены серийно в производство;
- Сконструированы, экспериментально измерены газопоглощающие характеристики комбинированного высоковакуумного насоса, последовательно соединенного в одном корпусе насоса на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al и триодного магниторазрядного насоса, насос запущен серийно в производство;

- Измерены газопоглощающие и активационные свойства нераспыляемых геттеров на базе тантал-титан, нанесенных на внутреннюю поверхность вакуумных камер, с возможностью применения в узкоапертурных вакуумных камер встроенных источников синхротронного излучения (ондуляторов и вигглеров) ЦКП «СКИФ».
- Разработана вакуумная система инжекционной части синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ», включающей линейный ускоритель на энергию 200 МэВ, бустер и двух каналов перепуска;
- Спроектирована, изготовлена, собрана и запущена вакуумная система инжекционной части синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ» с получением требуемых параметров.

Благодарности

В заключение выражаю искреннюю благодарность своим научным руководителям Анашину Вадиму Васильевичу и Краснову Александру Анатольевичу, без которых не было бы данной диссертации и которым я очень признателен за руководство всей моей научной работой, за ценные замечания и советы в написании диссертации. Выражаю искреннюю благодарность моему научному консультанту Логачеву Павлу Владимировичу. Также выражаю благодарность Жукову Александру Анатольевичу за помощь в проведении измерений быстроты откачки насосов и определении предельного вакуума насосов. Я признателен заводу АО «Катод» и особенно его сотрудникам Нечаеву Павлу Георгиевичу и Высоцкому Алексею Петровичу за помощь в создании серийных магниторазрядных насосов триодного типа и вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров.

Выражаю благодарность Левичеву Евгению Борисовичу, Чуркину Игорю Николаевичу и Гурову Сергею Михайловичу за их руководство при создании синхротрона 4+ поколения СКИФ, поддержку и участие. Синяткину Сергею Викторовичу, Левичеву Алексею Евгеньевичу за техническую консультацию в создании вакуумной системы инжекционной части СКИФ. Автор также признателен сотрудникам Экспериментального Производства ИЯФ СО РАН, принимавшим непосредственное участие в работах по созданию вакуумных элементов СКИФ: Е. С. Рувинскому, А. Н. Косареву, В. А. Косареву и многим другим.

Хочу также выразить свою благодарность всему научно-конструкторскому отделу ИЯФ СО РАН, в особенности Сергею Владимировичу Шиянкову, Олегу Анатольевичу Павлову, Людмиле Львовне Беловой и Надежде Александровне Золотухиной за проектирование вакуумной системы инжекционной части синхротрона 4+ поколения СКИФ.

Особую признательность хотел бы выразить Шошину Андрею и Бурдакову Александру Владимировичу за то, что дали возможность поучаствовать в проекте ITER.

Олегу Игоревичу Мешкову моя искренняя благодарность за помощь в создании прототипов сцинтилляторов типа P43, а также за полезные дискуссии при написании диссертации. Толочко Борису Петровичу за предоставление образцов сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов.

Слова моей теплой благодарности всем неравнодушным сотрудникам лаборатории 1-4, в особенности, Голынскому Владимиру Васильевичу за помощь в проведении экспериментов, Овчарову Евгению Михайловичу за изготовление прототипов вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров, Девятьярову Алексею Леонидовичу и Фомину Ивану Владимировичу за создание вакуумного стенда для испытания магниторазрядных насосов.

Приложение А1. Расчет проводимости в молекулярном режиме

При очень высоком вакууме (в молекулярном режиме течения газа) молекулы могут преодолеть путь в сотни и даже тысячи метров до того, как столкнутся между собой.

Для случая длинного прямолинейного трубопровода длиной l с поперечным сечением произвольной формы поток газа равен:

$$Q = U \cdot (P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}), \quad (\text{A1.1})$$

где Q – поток газа через трубопровод, л·Торр/с; U – проводимость трубопровода, л/с; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе трубопровода, Торр; $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе трубопровода, Торр.

Длинным трубопроводом считается трубопровод, если выполняется условие, что $l/f \gg 100$, где f – это характеристический поперечный размер трубопровода, который находится как $f = \frac{4A}{\Pi}$, где A и Π – площадь и периметр сечения трубопровода, соответственно. Для трубы круглого сечения характеристический поперечный размер равняется диаметру этой самой трубы.

Молекулярная проводимость любого трубопровода равна [100]:

$$U = \frac{4}{3} \cdot \frac{V_a}{\int_0^l \frac{\Pi}{A^2} dl} [\text{л} / \text{с}], \quad (\text{A1.2})$$

где V_a – среднеарифметическая скорость молекул, м/с; A – площадь отверстия, м²; Π – периметр сечения, м.

Выражение (A1.2) верно, если длина трубопровода много больше характеристического размера трубопровода.

Среднеарифметическая скорость молекул находится как:

$$V_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} [\text{л} / \text{с}], \quad (\text{A1.3})$$

где κ – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}/(\text{К} \cdot \text{с}^2)$; T – температура молекулы, К; m – масса молекулы, кг; R – универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \cdot 10^3$, $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; M – молярная масса молекулы, $\text{кг}/\text{кмоль}$.

Подставляя (A1.3) в (A1.2) получаем в общем виде:

$$U = 19,4 \cdot \frac{\sqrt{T/M}}{\int_0^l \frac{\Pi}{A^2} dl} [л / с], \quad (\text{A1.4})$$

Для трубопровода круглого сечения молекулярная проводимость равна при комнатной температуре ($T = 293$ К) для азота:

$$U = 12,3 \cdot \frac{d^3}{l} [л / с], \quad (\text{A1.5})$$

Для водорода молекулярная проводимость будет больше в 3,74 раза, а для аргона, наоборот, будет меньше в 0,84 раза.

Пропускная способность отверстия есть ничто иное как объем газа, падающий в единицу времени на поверхность площадью A , м^2 :

$$U = \frac{1}{4} \cdot V_a \cdot A [л / с], \quad (\text{A1.6})$$

Подставляя (A1.3) в (A1.6) получаем:

$$U = 3,64 \cdot A \cdot \sqrt{T/M} [л / с], \quad (\text{A1.7})$$

Формула (A1.7) справедлива в случае, когда площадь диафрагмы много меньше площади сечения объема, из которого газ выходит.

Для азота молекулярная проводимость отверстия равняется:

$$U = 11,6 \cdot A [л / с], \quad (\text{A1.8})$$

Молекулярная проводимость для водорода и аргона, как и в случае с трубопроводом круглого сечения будет больше в 3,74 раза и меньше в 0,84 раза, соответственно.

Частный случай для молекулярной проводимости узкого канала прямоугольного сечения с учетом, что $b \gg a$, где b – ширина канала, м; a – глубина канала, м; и $l/a > 10$, где l – длина канала, м:

$$U = 3,64 \cdot \frac{a^2 b}{l} \cdot \ln \frac{l}{a} \cdot \sqrt{T/M} [\text{л/с}], \quad (\text{A1.9})$$

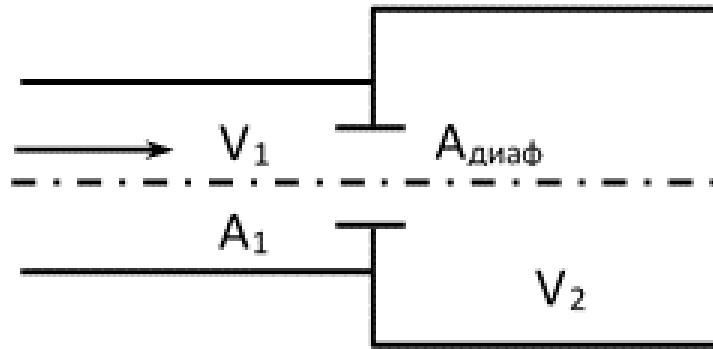


Рисунок А1.1. Течение газа через диафрагму из малого объема в больший [60], [101]

Когда газ выходит из меньшего объема V_1 в больший, как показано на рисунке А1.1. и при этом площадь сечения объема V_1 соизмерима с площадью диафрагмы, через которую выходит газ, то в формулу (А1.7) добавляется поправочный коэффициент:

$$U = \frac{3,64 \cdot A \cdot \sqrt{T/M}}{1 - \frac{A}{A_0}} [\text{л/с}], \quad (\text{A1.10})$$

Для коротких трубопроводов, т.е. когда $fl < 100$ необходимо ввести безразмерный поправочный коэффициент K [101], являющийся функцией отношения длины трубопровода к его диаметру, величина этой функции уменьшается с 1 (при $l/d = 0$) до $4d/3l$ при значениях $l/d > 500$.

$$U = 3,64 \cdot K \cdot A \cdot \sqrt{T/M} [\text{л/с}], \quad (\text{A1.11})$$

Значения поправочных коэффициентов Клаузинга можно найти в [101].

Приложение А2. Расчет эффективной быстроты откачки магниторазрядного насоса

Автор считает своим долгом привести вывод формулы расчета эффективной быстроты откачки насоса для лучшего понимания этого процесса. Динамика объемной плотности молекул остаточного газа в магниторазрядном насосе в общем виде может быть выражена одномерной дифференциальной моделью Кнудсена [59], [60]:

$$V \frac{\partial n_j}{\partial t} = u_j \frac{\partial^2 n_j}{\partial x^2} - s_j [n_j - n_{sj}], \quad (\text{A2.1})$$

где: индекс j обозначает компоненту остаточного газа; n_j – объемная плотность газа в насосе, молекул/м³; t – время, с; x – координата вдоль оси насоса, м; V – объем на единицу длины вакуумного насоса, м²; $u_j = V \cdot D_{Kj}$ – молекулярная проводимость щели между анодом и катодом на единицу длины, м⁴/с; D_{Kj} – коэффициент диффузии Кнудсена вдоль насоса, м²/с; s_j – быстрота действия всех ячеек насоса на единицу длины, м²/с; n_{sj} – предельный уровень разрежения, создаваемый насосом, молекул/м³.

Поскольку характерное время установления динамического равновесия в объеме определяется отношением объема к скорости откачки подсоединенных насосов и равняется минутам или секундам и даже долями секунд, то это позволяет рассматривать процесс как квази-динамическое равновесие, т.е. $V \frac{\partial n_j}{\partial t} \approx 0$.

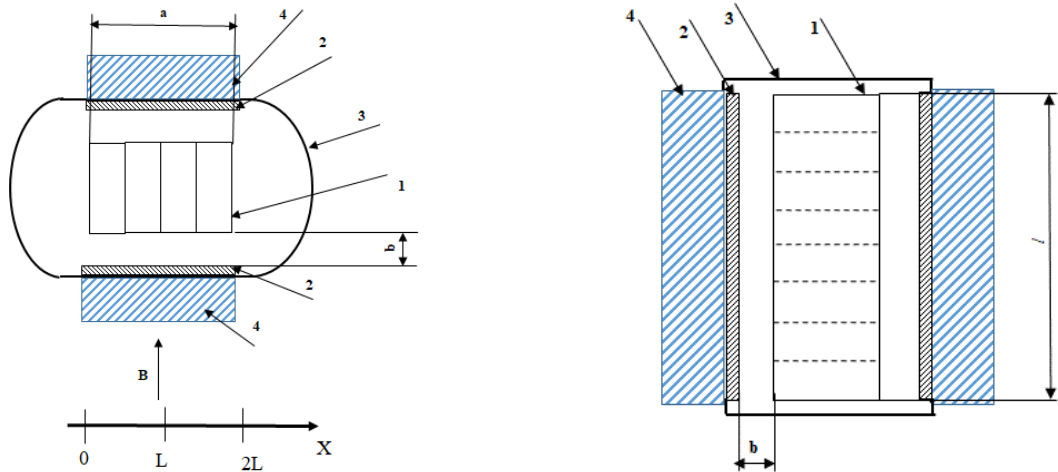
Решение в общем виде для уравнения А2.1 будет иметь вид:

$$n(x) = C_1 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{s_i}{u_i}} \cdot x\right) + C_2 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{s_i}{u_i}} \cdot x\right),$$

Применяя следующие граничные условия (см. рисунок А2.1) и учитывая, что предельный уровень разрежения, создаваемый насосом, бесконечно мал:

$$\begin{aligned}
 1) \frac{\partial n}{\partial x}(L) &= 0 \\
 2) n(0) &= n_0, \\
 3) -u_i \cdot \frac{\partial n}{\partial x}(0) &= S_{eff} \cdot n_0
 \end{aligned}$$

где n_0 – плотность газа на входе в насос, молекул/м³; S_{eff} – эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса на входе, м³/с.



а) Вид сверху

б) Вид сбоку

Рисунок А2.1. Схема насоса. 1 – анод, 2 – катоды, 3 – корпус насоса, 4 – магнит [75]

$$S_{eff} = \sqrt{s_i \cdot u_i} \cdot th\left(\sqrt{\frac{s_i}{u_i}} \cdot L\right), \quad (\text{A2.2})$$

Либо, если помнить, что $u_i = U_i \cdot L$ и $s_i = S_i/L$, тогда

$$S_{eff} = \sqrt{S_i \cdot U_i} \cdot th\left(\sqrt{\frac{S_i}{U_i}}\right), \quad (\text{A2.3})$$

где S_i – быстрота действия всех ячеек насоса, м³/с; U_i – молекулярная проводимость щели между анодом и катодом, м³/с, которая определяется как:

$$U = 97 \cdot K \cdot \frac{a \cdot b^2}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot n, \quad (\text{A2.4})$$

где K – коэффициент Клаузинга [101]; N – количество зазоров между анодом и катодами, которое равно двум; a – ширина анодного блока, м; b – зазор между

анодом и катодом, м; l – высота анодного блока, м; T – температура, при которой находится газ в данный момент, К; M – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

$$\text{Для азота } U = 308 \cdot K \cdot \frac{a \cdot b^2}{l} \cdot n \quad [60]$$

Рассмотрим пример расчета быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТ-К-0,04.

Согласно таблице 3.1 основные параметры насоса: $d = 20$ мм; $h = 25$ мм; $b = 5$ мм; $a = 185$ мм; $l = 80$ мм; $N = 33$ шт; $V = 0,12$ Тл; $U_a = 4000$ В; $P = 10^{-6}$ Торр, $n = 2$.

Поскольку $B_{\max} = \frac{15,26 \cdot 10^{-6}}{d \cdot P^{0,05}} \cdot \sqrt{U_a} = 0,096 \text{ Тл}$, то расчет быстроты откачки одной ячейки осуществляется по формуле:

$$S = 9,1 \cdot 10^{-2} \cdot \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot P}{1 + 4 \cdot 10^6 \cdot P} \right) \cdot P^{0,1} \cdot h \cdot U_a \cdot \left(1 - \frac{1,05 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{(B - B_{\max}) \cdot d \cdot P}}{U_a} \right) = 1,51 \text{ л / с.}$$

И полная быстрота откачки будет тогда равна:

$$S_{\text{total}} = S \cdot n \approx 50 \text{ л / с.}$$

Проводимость зазоров между катодами и анодом для азота при комнатной температуре определяется из выражения (A2.4):

$$U = 308 \cdot K \cdot \frac{a \cdot b^2}{l/2} \cdot n = 37 \text{ л / с,}$$

$$\text{где коэффициент Клаузинга равен: } K = \frac{3}{8} \cdot \ln\left(\frac{l}{b}\right) = 1,04$$

Тогда эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса S_{eff} находится по формуле (A2.3):

$$S_{\text{eff}} = \sqrt{S_i \cdot U_i} \cdot \text{th}\left(\sqrt{\frac{S_i}{U_i}}\right) = 35,2 \text{ л / с,}$$

Как видно из данного примера, наличие зазоров между катодами и анодом приводит к существенному уменьшению эффективной быстроты откачки.

Список литературы

- [1]. Properties of boron carbide ceramics made by various methods for use in ITER / A. Semenov, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy [et al]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part B. – P. 2007-2010. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.088>. – Дата публикации: 14.03.2019.
- [2]. Qualification of boron carbide ceramics for use in ITER ports / A. Semenov, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. – Vol. 48, Issue 6. – P. 1474-1478. – URL: <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>. – Дата публикации: 09.09.2019.
- [3]. Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection / A. Shoshin, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy, [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Vol. 168 – 112426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426> – Дата публикации: 08.03.2021.
- [4]. International Standard ISO/TS 3669 – Vacuum technology – Bakable flanges. – Дата публикации: 08.2017.
- [5]. Study on vacuum outgassing characteristics of hot-pressing Boron Carbide(B_4C) for ITER equatorial port / Xiaoyue Hu, Qingsheng Hu, Jiahong Li [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2025. – Vol. 215. – 114974. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114974>. – Дата обращения: 01.12.2025.
- [6]. Балицкий, А.В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры / А.В. Балицкий. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1974. – 312 с.
- [7]. Vacuum system of VEPP-2000 accelerator complex / A. Semenov, V. Anashin, D. Berkaev [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2019. – Vol. 14. – P10030. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/10/P10030>. – Дата публикации: 22.10.2019.
- [8]. Процесс изготовления вакуумных камер для проекта FAIR с использованием электронно-лучевой сварки / Медведев А.М., Семенов А.М.,

Семенов Ю.И. [et al.]. – Текст : электронный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, №3. – С.135-145. – URL: <https://doi.org/10.1559/2224-9877/2016.3.10>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[9]. Al-Dmour E., Einfeld D. ALBA storage ring vacuum system commissioning – Текст : электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2011, San Sebastián, Spain (4-9 of September 2011). – P. 1551-1553. Дата обращения: 01.12.2025.

[10]. Helleret N. Non-thermal outgassing – Текст : электронный // Proceedings of CERN Accelerator School, Vacuum in accelerators, 2007. – P. 87-116. Дата обращения: 01.12.2025.

[11]. Ion induced desorption coefficients for titanium alloy, pure aluminium and stainless steel: preprint CERN-ISR-VA/76-5 / Mathewson A.G. – Geneva: CERN, 1976 – P. 42. – Текст : электронный. Дата обращения: 01.12.2025.

[12]. Photon-stimulated desorption yields from stainless steel and copper plated beam tubes with various pretreatments / C.L. Foerster, H. Hallama, C. Lanni. – Текст : электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1990. – Vol. 8, Issue 3. – P. 2856-2859. – URL: <https://doi.org/10.1116/1.576638>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[13]. Photon stimulated desorption of an unbaked stainless steel chamber by 3.75 keV critical energy photons / C. Herbeaux, P. Marin, V. Baglin, O. Gröbner. – Текст : электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1999. – Vol. 17, Issue 2. – P. 635-643. – URL: <https://doi.org/10.1116/1.581630>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[14]. Secondary Electron Emission Studies / A. Shih, J. Yater, C. Hor, R. Abrams. – Текст : электронный // Applied Surface Science. – 1997. – Vol. 111. – P. 251-258. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(96\)00729-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(96)00729-5). – Дата публикации: 11.03.1999.

[15]. 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 / E. Mahner, J. Hansen, D. Kuchler, M. Malabaila, M. Taborelli. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – Vol. 8. – 053201. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.8.053201>. – Дата публикации: 18.05.2005.

[16]. Рот, А. Вакуумные уплотнения / А. Рот, под общ. ред. А.Н. Фигнера – Москва: Энергия, 1971. – 464 с.

[17]. Смирягин, А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургиздат, 1956. – 488 с.

[18]. Temperature dependence of the electron-induced gas desorption yields on stainless steel, copper, and aluminum / J. Gómez-Goñi, A.G. Mathewson. – Текст: электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1997. – Vol. 12, Issue 4. – P. 3093-3103. – URL: <https://doi.org/10.1116/1.580852> – Дата обращения: 01.12.2025.

[19]. Some results on the electron induced desorption yield of OFHC copper / F. Billard, N. Hilleret, G. Vorlauffer. – Текст : электронный // Vacuum Technical Note 00-32, LHC-VAC/FB/NH/GV, CERN, Geneva, 2000. – Дата публикации: December 2000.

[20]. АО «Полема», г. Тула. — URL: <http://www.polema.net/kontakty-cr-cu-w-cu.html>. Дата обращения: 01.12.2025.

[21]. Claudiano G.V., Volpe L.M., Fonseca E.B., Silva M.H.S. Friction Stir Welding and Copper-Chromium Zirconium: a New Concept for the Design of the Sirius' High-Power Absorbers – Текст : электронный // Proceeding of 10th International Conference MEDSI / Paris (25-29 of June 2018) – P. 39-42.

[22]. Quispe M., Campmany J., Gevorgyan A., Marcos J. Design of an Integrated Crotch Absorber for ALBA Synchrotron Light Source – Текст : электронный // Proceeding of 10th International Conference MEDSI / Paris (25-29 of June 2018) – P. 258-260.

[23]. Choi M., Gonczy J.D., Howell J.W. and Niemann R.C. ANL Advanced Photon Source Crotch Absorber Design // Proceeding of Particle Accelerator Conference

PAC'91 / San Francisco, California, USA (6-9 of May 1991) – P. 2301-2303.

[24]. Status and Description of the Vacuum System of the Technological Storage Ring Complex / Semenov A.M., Anashin V.V., Goncharova N.F., [et al.]. – Текст: электронный // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2011. – Vol. 5, № 6. – P. 1058-1062. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451011110188>. – Дата публикации: 12.01.2011.

[25]. Suetsugu Y., Shibata K., Ishibashi T., [et al.]. First commissioning of the SuperKEKB vacuum system – Текст : электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2016, Busan, Korea (8-13 of May 2016) – P. 1086-1088. – URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-TUOCB01>. – Дата публикации: 06.2016.

[26]. Hahn M., Biasci J.C., Marques H.P., Meunier A. Upgrade of the ESRF vacuum system – Текст : электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2011, San Sebastián, Spain (4-9 of September 2011) – P. 1515-1517. – Дата обращения: 01.12.2025.

[27]. Официальный сайт фирмы Vacom (<https://www.vacom.de/en/products/aluvac>)

[28]. A study of the gettering characteristics of getter pumps for different gases / A. Semenov, V. Anashin, and A. Krasnov. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, iss. 6. – P. 893–897. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441220050255>. – Дата публикации: 30.04.2020.

[29]. A new pumping approach for the large electron positron collider (LEP) / Benvenuti C. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1983. – Vol. 205, issue 3. – P. 391-401. – URL: [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90003-0). – Дата публикации: 30.10.2002.

[30]. Nonevaporable getter films for ultrahigh vacuum applications / Benvenuti C., Chiggiato P., Cicoira F., and L'Aminot Y. – Текст: электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1998. – Vol. 16, Issue 1. – P. 148-154. – URL: <https://doi.org/10.1116/1.580963> – Дата обращения: 01.12.2025.

[31]. Ultimate pressure achieved in TiZrV sputter-coated vacuum chamber /

Benvenuti C., Escudeiro Santana A., Ruzinov V – Текст: электронный // Vacuum. – 2001. – Vol. 60. – P. 279-284. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(00\)00389-4](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(00)00389-4) – Дата публикации: 30.10.2001.

[32]. Vacuum properties of TiZrV non-evaporable getter films / Benvenuti C., Chiggiato P., Costa Pinta P., [et al.]. – Текст: электронный // Vacuum. – 2001. – Vol. 60. – P. 57-65. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(00\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(00)00246-3) – Дата публикации: 30.10.2000.

[33]. А.А. Краснов. Исследование и прогнозирование динамической плотности остаточных газов в вакуумных камерах современных ускорительно-накопительных комплексах: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.20 / Краснов Александр Анатольевич. – Новосибирск, 2012. – 144 с.

[34]. The Secondary Electron Yield of the Non Evaporable Getter Alloys TiZr and TiZrV / Henrist B., Hilleret N., Scheuerlein C., Taborelli M. – Текст: электронный // Applied Surface Science. – 2001. – Vol. 172, issues 1-2. – P. 95-102. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00838-2](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00838-2) – Дата публикации: 05.02.2001.

[35]. Review of heavy-ion induced desorption studies for particle accelerators / E. Mahner. – Текст: электронный // Physical review special topics - accelerators and beams. – 2008. – Vol. 11. – 104801 – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.11.104801> – Дата публикации: 29.10.2008.

[36]. Optimization of non-evaporable getter coating for accelerator beam pipe / Malyshev O., Valizadeh R – Текст: электронный // Workshop (WS-63) Surface phenomena limiting ultimate pressures in Vacuum Systems / Ávila, Spain (14-19 September). – 2010.

[37]. Официальный сайт фирмы SAES Getters (<https://www.saesgetters.com>)

[38]. NEG Thin Film Coating Development for the MAX IV Vacuum System / Grabski M., Ahlback J., Al-Dmour E., [et al.]. – Текст: электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2013, Shanghai, China (12-17 of May 2013) – P. 3385-3387. – Дата обращения: 01.12.2025.

[39]. Performance of the vacuum system for the PETRA III damping wiggler section / Abakumova E., Anashin V., Balewski K., [et al.]. – Текст: электронный //

Vacuum. – 2012. – Vol. 86, Issues 7. – P. 822-826. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.01.019> – Дата публикации: 17.02.2011.

[40]. Вакуумная система секций охлаждения пучка PETRA III / Абакумова Е.В., Анашин В.В, Walewski K., [et al.]. – Текст: электронный // Вакуумная техника и технология. – 2011 – Том 21, №2. – С. 85-89. – Дата обращения: 01.12.2025

[41]. DPI-PT Mini Review of B4C Outgassing - Independent Reviewer Report, ITER_D_47TDJ4, 2020.

[42]. Интернет-ресурс <https://naked-science.ru/community/435787>

[43]. ITER Vacuum Handbook / Pearce R., Worth L. – Текст: электронный // Saint-Paul-lez-Durance, France: ITER. – 2019. – URL: https://www.iter.org/sites/default/files/media/2024-04/iter_vacuum_handbook.pdf – Дата публикации: 19.11.2019. – 46 с.

[44]. The thermal outgassing rate of materials used in high-vacuum systems / A.M. Semenov, A.V. Burdakov, A.V. Varand [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 65, iss. 3. – P. 519–523. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441222030137>. – Дата публикации: 20.01.2022.

[45]. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа. – 1990. – 320 с.

[46]. Investigation of the thermal outgassing from P43 phosphor and aerogel for use in the vacuum system of the SRF SKIF / A.M. Semenov, A.V. Smirnov. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2024. – Vol. 67, iss. 2. – P. 412–417. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441224700532>. – Дата публикации: 26.06.2023.

[47]. P43 for manufacturing of large area scintillating screens / A. Semenov, V. Balakin, O. Meshkov, V. Ulianitsky, ... A. Semenov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol.17. – P08020 – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/08/P08020>. – Дата публикации: 18.08.2022.

[48]. Катаев В.М. Справочник по пластическим массам / под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. – Москва: Химия. – 1975. – Т. 2. – 448 с.

[49]. Auslender V. L. ILU-type electron accelerator for industrial technologies –

Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B. – 1994. – Vol. 89. – P. 46–48. – URL: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(94\)95143-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(94)95143-8) – Дата публикации: 17.10.2002.

[50]. Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационнотехнологических процессах / Ауслендер В. Л., Безуглов В. В., Брызгин А. А. и др. – Текст: электронный // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. – 2004. – Вып. 58. – С. 78–85. Дата обращения: 01.12.2025.

[51]. Стандарт предприятия СТП.001-72 «Соединения вакуумные. Соединения фланцевые с индиевым уплотнителем», ИЯФ СО РАН. – 1972.

[52]. Scintillating Screen Applications in Accelerator Beam Diagnostics / Walasek-Höhne B., Kube G., Reiter A. [et. al]. – Текст: электронный // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2012. – Vol. 59, Issues 5. – P. 2307- 2312. – URL: <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2200696> – Дата публикации: 19.06.2012.

[53]. Shatunov P., Berkaev D., Kasaev A., [et.al]. Collector Ring Project at FAIR: Present Status – Текст: электронный // Proceedings of Russian Particle Accelerator Conference RuPAC'2016. – St. Petersburg, Russia (21-25 of November 2016). – P. 86-89. – URL: <https://proceedings.jacow.org/rupac2016/papers/wecbmh02.pdf> – Дата обращения: 01.12.2025.

[54]. Intrinsic conversion efficiency of X-rays to light in Gd O S : Tb powder phosphors / Morlotti R., Nikl M., Piazza M., and Boragno C. – Текст: электронный // Journal of Luminescence. – 1997. – Vol. 72–74. – P. 772–774. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(96\)00330-4](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(96)00330-4) – Дата публикации: 06.10.1999.

[55]. Lieberwirth A., Ensinger W., Forck P., Walasek-Höhne B. Response of Scintillating Screens to Fast and Slow Extracted Beams. – Текст: электронный // Proceedings of International Beam Instrumentation Conference IBIC'2013. – Oxford, UK (16-19 of September 2013). – P. 553- 556. – URL: <https://proceedings.jacow.org/IBIC2013/papers/tupf21.pdf> – Дата обращения: 01.12.2025.

[56]. Study of radiation hardness of Gd_2SiO_5 scintillator for heavy ion beam / Kawade K., Suzuki K., Suzuki T., [et al]. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2011. – Vol. 6. – T09004. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/09/t09004> – Дата публикации: 01.09.2011.

[57]. Silica aerogel radiators for bunch length measurements / Bahr J., Djordjadze V., Lipka D., [et al]. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2005. – Vol. 538, Issues 1-3. – P. 597-607. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.098> – Дата публикации: 11.02.2005.

[58]. Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б.З. Персов. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2004. – 348 с.

[59]. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа. – 1990. – 320 с.

[60]. Пипко А.И. Конструирование и расчет вакуумных систем / Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. – изд. 3 перераб. и доп. – Москва: Энергия. – 1979. – 504 с.

[61]. Официальный сайт фирмы HTMS: (<http://www.hightechmetalseals.com/catalogue>)

[62]. Обзор вакуумных соединений для получения сверхвысокого вакуума: Препринт / Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. – Текст : электронный // ИЯФ СО РАН 2017-14. – 2017. – URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/2017_014.pdf. – Дата обращения: 01.12.2025.

[63]. Vacuum-tight connections for obtaining ultrahigh vacuum in vacuum systems of accelerators with wide-aperture chambers / V. V. Anashin, A. A. Krasnov, A. M. Semenov, S. R. Sharafееva. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2019. – Vol. 62, No. 3. – P. 436–439. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441219030011>. – Дата публикации: 01.11.2018.

[64]. Детальная спецификация на дипольную камеру Detailed Specifications F-DS-VU-E_CR-Dipoles_Vacuum_Chamber_v2.17. / А. А. Краснов, А. М. Семенов – Текст : электронный // URL: <https://edms.cern.ch/document/1518019/2.17>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[65]. A. Tribendis, Y. Biryuchevsky, K. Chernov, [et al.]. Construction and first test results of the barrier and harmonic RF system for the NICA collider. – Текст: электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2021. – Campinas, Brazil (24-28 of May 2021). – P. 1136-1138. – URL: <https://proceedings.jacow.org/ipac2021/papers/mopab365.pdf> – Дата обращения: 01.12.2025.

[66]. Y. Suetsugua, K. Shibata, K. Kanazawa. Conceptual design of vacuum system for SUPER KEKB. – Текст : электронный // Proceedings of Particle Accelerator Conference PAC'2003. – Portland, USA (12-16 of May 2003). – P. 806-808. – URL: <https://proceedings.jacow.org/p03/PAPERS/MPPE029.PDF>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[67]. Development of copper-alloy Matsumoto–Ohtsuka-type vacuum flanges and its application to accelerator beam pipes / Y. Suetsugua, M. Shirai, M. Ohtsuka, [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2009. – Vol. 27. – P. 1303-1309 – URL: <https://doi.org/10.1116/1.3237149>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[68]. Электрический разряд с холодным катодом при низких давлениях в магнитном поле / Г.В. Смирницкая, Э.М. Рейхрудель – Текст : печатный // Журнал теоретической физики. – 1959. – Т. 29, № 2. – С. 153-159.

[69]. Характеристики разряда с осциллирующими электронами и его применение в магниторазрядных насосах (обзор) / Г.В. Смирницкая, Э.М. Рейхрудель – Текст: печатный // Электроника и ее применение. – 1976 – Т. 8. – С. 43-65.

[70]. Магниторазрядные насосы / Г.А. Васильев. – Москва: Энергия. – 1970. – 112 с.

[71]. Научные основы вакуумной техники / С. Дэшман. – изд. 2 перераб. и доп. – Москва: Мир. – 1964. – 716 с.

[72]. L. Schulz. Sputter-ion pumps. – Текст: электронный // Proceedings of CERN Accelerators School, Vacuum Technology. – Snekersten, Denmark (28 of May – 03 of June 1999). – P. 37-42. – URL: <https://cds.cern.ch/record/454179/files/p37.pdf> –

Дата обращения: 01.12.2025.

[73]. О.К. Курбатов, Физико-технические основы создания оптимизированных высоковакуумных магниторазрядных насосов, герметизирующих элементов и устройств вакуумного технологического и аналитического оборудования электронной техники: дис. д. тех. наук: 05.27.06 / Курбатов Олег Константинович. – Москва, 2005. – 360 с.

[74]. А.А. Краснов, А.М. Семенов. Отечественные высоковакуумные насосы для ЦКП «СКИФ». – Текст: электронный // Труды конференции ХХІХ научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». – Крым, Судак (16-21 сентября 2022). – С. 63-74. – URL: https://vacuum.org.ru/download/proceedings/vacuum-2022_fulltext.pdf – Дата обращения: 01.12.2025.

[75]. A. Semenov, V. Anashin, and A. Krasnov. Development of sputter ion pump with strong magnetic field for obtaining of ultrahigh vacuum. – Текст: электронный // Proceedings of Synchrotron and Free Electron Laser Radiation SFR'2020. – Novosibirsk, (13– 17 of July 2020). – AIP Conference Proceedings – Vol. 2299 – P. 020010. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0030428> – Дата публикации: 17.11.2020.

[76]. Built-in Getter Ion Pumps / M.D. Malev, E.M. Trachtenberg. – Текст : электронный // Vacuum. – 1973. – Vol. 23. Issues 11 – P. 403-409 – URL: [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(73\)92530-X](https://doi.org/10.1016/0042-207X(73)92530-X). – Дата публикации: 31.05.1973.

[77]. В.В. Анашин. Разработка и запуск вакуумных систем ускорительно-накопительных комплексов ВЭПП-3, ВЭПП-4 и НАП-М института: дис. канд. тех. наук: 01.04.20 / Анашин Вадим Васильевич. – Новосибирск, 1983. – 107 с.

[78]. A new approach for computing diode sputter-ion pump characteristics / H. Hartwig, J. S. Kouptsidis. – Текст : электронный // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1974. – Vol. 11, Issues 6. – P. 1154-1159 – URL: <https://doi.org/10.1116/1.1318701>. – Дата публикации: 28.08.1974.

[79]. ISO DIN 3556-1.2-1992. Sputter-ion pumps. Measurement of performance

characteristics. — Part 1: Pumps with a volume rate of flow greater than 10 l/s. — URL: https://www.gammavacuum.com/media/pdf/f6/15/43/ISO_DIS_3556-1_2.pdf (дата обращения: 01.12.2025).

[80]. Официальный сайт фирмы Agilent (<https://www.agilent.com/cs/library/usermanuals/public/VP20n.pdf>)

[81]. The review of modern domestic pumps for ultra-high vacuum in the beam accelerators and nuclear fusion devices / A. A. Krasnov, P. G. Nechaev, A. M. Semenov. — Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2025. — Vol. 89, № 9. — P. 1400-1407. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1062873825712590>. — Дата публикации: 07.10.2025.

[82]. Сорбционные явления в вакуумной технике / Н.В. Черепнин. — Москва: Советское радио. — 1973. — 384 с.

[83]. J. Crank. The Mathematics of Diffusion / J. Crank. — Second Edition. — Oxford: Clarendon Press. — Яз. Англ. — 1975. — 415 с.

[84]. A. Prodromides. Non-evaporable getter thin film coatings for vacuum applications: doctor of science / Alexandra Prodromides. — Laussane, 2002. — 180 p.

[85]. Decreasing Surface Outgassing by Thin Film Getter Coatings / C. Benvenuti, P. Chiggiato, F. Cicoira, V. Ruzinov — Текст : электронный // Vacuum. — 1998. — Vol. 50, Issues 1-2. — P. 57-63 — URL: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00017-7). — Дата публикации: 03.12.1998.

[86]. A Novel Route to Extreme Vacua: the Non-Evaporable Getter Thin Film Coatings / C. Benvenuti, J. M. Cazeneuve, P. Chiggiato, [et al]. — Текст : электронный // Vacuum. — 1999. — Vol. 53, Issues 1-2. — P. 219-225 — URL: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00377-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00377-7). — Дата публикации: 03.12.1998.

[87]. The lumped uhv pumps on based non-evaporable getters / A. A. Krasnov, A. M. Semenov. — Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2023. — Vol. 87, No. 5. — P. 568–572. — URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873822701726>. — Дата публикации: 25.01.2023.

[88]. А.А. Полунина. Экспериментальное определение тонких механизмов поглощения водорода титаном для расширения номенклатуры эксплуатационных

характеристик пористых геттеров: дис. канд. тех. наук: 05.27.06 / Полунина Алиса Александровна. – Москва, 2008. – 136 с.

[89]. Research of NEG for application in injectors of hydrogen atoms for installations of thermonuclear synthesisnull / A.N. Dranichnikov, A.A. Krasnov, A.M. Semenov // *Applied Physics*. – 2017. – № 2 – P. 73-78. – Дата публикации: 16.02.2016.

[90]. Semenov, A.M. Modern combined ultrahigh vacuum pump for the SRF "SKIF" / A. A. Krasnov, A. M. Semenov. – Текст : электронный // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2024. – Vol. 67, Suppl. 1. – P. S148–S153. – URL: <https://doi.org/10.1134/S002044122470132X>. – Дата публикации: 25.04.2024.

[91]. An Installation for Magnetron Deposition of Getter Coatings in Narrow Aperture Chambers / V. V. Anashin , A. A. Zhukov , A. A. Krasnov, and A. M. Semenov. – Текст : электронный // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2009. – Vol. 52, No. 6. – P. 882–885. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441209060232>. – Дата публикации: 09.12.2009.

[92]. Pumping properties of Ti-Zr-Hf-V non-evaporable getter coating / O. B. Malyshev, R. Valizadeh, and A. N. Hannah – Текст : электронный // *Vacuum*. – 2014. – Vol. 100. – P. 26-28 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.07.035>. – Дата обращения: 01.12.2025.

[93]. Investigation of properties of the non-evaporable titanium-tantalum getters / A.A. Krasnov, A.M. Semenov. – Текст : электронный // *Applied Physics*. – 2017. – № 4. – P. 94-101. – Дата публикации: 04.07.2017.

[94]. Comparison of Ti-Zr-V nonevaporable getter films deposited using alloy or twisted wire sputter-targets / Valizadeh R., Malyshev O. B., Colligon J. S., Hannah A., Vishnyakov V. M. – Текст : электронный // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2010 – Vol. 28. – P. 1404-1412. – URL: <https://doi.org/10.1116/1.3504600>. – Дата публикации: 27.09.2010.

[95]. NEG as the main pumpdown facility in a chamber of a helical undulator for coherent electron cooling / A.M. Semenov. – Текст : электронный // *Applied Physics*. – 2016. – № 5. – P. 65-69. – Дата публикации: 25.07.2016.

[96]. Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника

фотонов «СКИФ»: в 3 томах / под общ. ред.: К. И Шефер. – Новосибирск : Ин-т катализа СО РАН, 2022. Том 1 : Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс / сост. Я. В. Зубавичус. – 310 с.

[97]. Status and Description of the Vacuum System of the NSLS-II Booster / A.M. Semenov, V.V. Anashin, S.M. Gurov, and A. A. Krasnov. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2015. – Vol. 79, № 1. – P. 57-61. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873815010268>. – Дата обращения: 10.11.2015.

[98]. Семенов А.М. Разработка, исследование и запуск вакуумной системы бустера-синхротрона для источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II: дис. канд. тех. наук: 01.04.20 / Семенов Алексей Михайлович. – Новосибирск, 2015. – 111 с.

[99]. Малышев О.Б. Исследование фотодесорбционных процессов в прототипах вакуумных камер сверхпроводящих коллайдеров: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.20 / Малышев Олег Борисович. – Новосибирск, 1995. – 85 с.

[100]. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах / Г.Л. Саксаганский – Москва: Атомиздат. – 1980. – 216 с.

[101]. Демихов К.Е. Вакуумная техника: справочник / Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова – изд. 3 перераб. и доп. – Москва: Машиностроение. – 2009. – 590 с.