

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2026

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, академик РАН Логачев Павел Владимирович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОВАЛЬ Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук;

КРАВЧУК Леонид Владимирович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, главный научный сотрудник;

ПАНФИЛОВ Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский Государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)";

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Защита диссертации состоится «28» октября 2026 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-01>.

Автореферат разослан «22» июля 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Шехтман Лев Исаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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; 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. 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 безмаслянные 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 нужную степень 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 и были приняты научным сообществом ИТЭР [A13], [A14], [1].

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).

Цели и задачи

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Были разработаны высоковакуумные стенды для изучения газовой выделенности с поверхности материалов, либо для измерения параметров вакуумных насосов;
2. После изучения влияния и диаметра анодных ячеек, величины магнитного поля была предложена конструкция магнитоэлектрического насоса с сильным магнитным полем до 0,3 Тл, измерены быстрота откачки насоса по азоту.
3. Были выполнены теоретические расчеты быстроты откачки магнитоэлектрических насосов;
4. Разработаны и изучены параметры диодных, Noble диодных и триодных магнитоэлектрических 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 [2]. 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 скорости откачки. В то же время при сохранении размеров электродного блока возможно увеличение скорости 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 скорости откачки насосов.

7. Создание магниторазрядных насосов триодного типа было обусловлено необходимостью увеличением скорости 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 скоростью откачки 20 л/с и 40 л/с и Noble диодные с скоростью 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 скоростью 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 скоростью 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: IV Международной научно-технической конференции, г. Москва, Россия, 2009; Международной конференции по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-18, Новосибирск, Россия, 2018; 30th Symposium on Fusion Technology SOFT-2018, Giardini Naxos, Сицилия, Италия, 2018; XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2019; International Vacuum Congress IVC'21, г. Мальмо, Швеция, 2019; 28th IEEE Symposium on Fusion Engineering, Jacksonville, Флорида, США, 2019; Международной конференции по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-20, Новосибирск, Россия, 2020; XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2020; 31th Symposium on Fusion Technology SOFT-2020 (on-line); XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2021; International Particle Accelerator Conference IPAC-2021 (on-line); Международной конференции по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах SFR-22, Новосибирск, Россия, 2022; 29 Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», г. Судак, Россия, 2022; 30 Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», г. Махачкала, Россия, 2023; Russian Particle Accelerator Conference RuPAC'23, Novosibirsk, Russia, 2023; 30-й Научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии», г. Санкт-Петербург, Россия, 2023; Международной конференции по использованию синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах

SFR-24, Новосибирск, Россия, 2024; 32-й Научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии», г. Санкт-Петербург, Россия, 2025;

По теме диссертации опубликовано 32 печатные работы, из них 15 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 7 статей в сборниках трудов конференций и 10 тезисов докладов.

Личный вклад автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автор лично участвовал в сборке, прогреве и получении вакуума в Большом накопительном кольце, в снятии и анализе спектра остаточных газов [A1]. Автором лично проведены разработка, изготовление, сборка и запуск вакуумной системы бустера источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II [A2]. При непосредственном участии автора был разработан концептуальный дизайн и выполнено изготовление вакуумной камеры спиралевидного ондулятора, принимал участие в выборе геттерного материала, в отладке режима напыления и в измерении химического состава и коэффициента прилипания геттера [A3]. Принимал личное участие в выборе геттерного материала, в поиске режима напыления, в создании стенда для проведения вакуумных измерений и в измерении химического состава, коэффициента прилипания геттера [A4]. Автор внес существенный личный вклад в разработку конструкции геттерного насоса, в создание стенда для проведения вакуумных измерений, в выбор методики проведения вакуумных испытаний, в измерение вакуумных свойств насоса, в испытания геттерных насосов в инжекторе атомов водорода H⁺ [A5]. Автор принимал непосредственное участие 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 [A6]. Автором лично создан стенд и разработана методика для измерения газопоглощающих характеристик геттерных насосов, проведена калибровка датчиков давления, измерены параметры геттерных насосов, проведен анализ полученных результатов на основании которых было принято решение о создании геттерных насосов с внутренним нагревателем для накопительного кольца ЦКП «СКИФ» [A7]. Автор лично принимал участие 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 [A8]. Автором лично создан стенд и методика для измерения газопоглощающих характеристик геттерных насосов, проведена калибровка датчиков давления, измерены быстрота откачки и сорбционная емкость прототипов геттерных насосов для ЦКП «СКИФ», измерены быстрота откачки в зависимости от температуры активации,

проведен анализ полученных результатов, в сравнении отечественных геттерных насосов и зарубежных аналогов [A9]. Автор лично участвовал 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 [A10]. Автор принимал непосредственное участие в анализе спектров остаточных газов, в измерении термического газовыделения из люминофора P43 и аэрогеля, в зависимости от длительности откачки [A11]. Автором лично участвовал в исследовании вакуумных свойств серийных геттерных насосов для ЦКП «СКИФ» фирмы ООО «Катод» по водороду, монооксиду углерода и дейтерию [A12]. Автор лично участвовал 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 [A13]. При непосредственном участии автора была предложена финальная методика очистки керамики, измерено термическое газовыделение для керамических блоков из карбида бора производства ООО «Вириал» и снят спектр остаточных газов, оценена газовая нагрузка из экваториального порта №11 [A14]. При непосредственном участии автора была проведена проверка структуры и химического состава чистого порошка P43 и образцов сцинтилляционных экранов, приготовленных методами детонационного напыления и электрофореза, измерение светового выхода из люминофора P43 с применением электронно-лучевой сварки, вакуумные испытания по измерению газовыделения из образцов сцинтилляционных экранов [A15].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти 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 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена материалам, используемым в высоковакуумной технике.

Выбор материала для применения в вакуумной технике зависит от множества требований. К числу основных требований относится высокая вакуумная плотность материалов даже при толщинах (десятых миллиметра) 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 [3].

Такие материалы как нержавеющая сталь, медь и алюминий и их сплавы, с точки зрения вакуумных свойств, изучены досконально. Но имеются материалы, которые малоизучены или применяются впервые.

К плохо изученным материалам можно отнести керамические материалы на основе карбидов, которые применяются внутри порт-плаггов в ИТЭР. Одним из предназначений диагностических порт-плаггов 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. 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. Из-за ограничения скорости действия насосов и увеличения количества дополнительных материалов в вакуумной части порт-плаггов, 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 [4].

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.

В соответствии с требованиями ITER Vacuum Handbook термический коэффициент газовыделения должен быть меньше 10^{-10} л·мбар/с/см² для водорода и меньше 10^{-12} л·мбар/с/см² для каждого из остальных газов [4].

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%).

Измерения проводились автором как при температуре 100 °С через каждые 3 месяца, так и при комнатной температуре в течение 2,5 лет. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент термического газовыделения для карбида бора при комнатной температуре и при нагреве до 100 °С [A14]

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	$1,55 \cdot 10^{-12}$	-

В таблице 2 представлен расчет газовыделения материалов в одном порту ИТЭР через 24 часа и 12 месяцев непрерывной откачки при температуре 100 °С. Из таблицы 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 ITER Vacuum Handbook.

Таблица 2 – Оценка газовой нагрузки в Экваториальном порт-плаге №11 [A14]

Материал	Площадь, см ²	24 часа		12 месяцев	
		Кэф. термич. газовыдел., л·Торр/с/см ²	Поток газа, л·Торр/с	Кэф. термич. газовыдел., л·Торр/с/см ²	Поток газа, л·Торр/с
В ₄ С	$4,07 \cdot 10^6$	$7,52 \cdot 10^{-12}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$	$9,04 \cdot 10^{-6}$
316LN-IG	$3,7 \cdot 10^6$	$7,52 \cdot 10^{-12}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$
Всего	$7,77 \cdot 10^6$	-	$5,84 \cdot 10^{-5}$	-	$2,01 \cdot 10^{-5}$

Карбид кремния – бинарное неорганическое химическое соединение кремния с углеродом. 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 - $50 \text{ мм} \times 50 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$. Количество образцов - 21 шт. Суммарная площадь - 1470 см^2 . Химический состав карбида кремния: SiC – 99,2%, примеси (кислород) – 0,8%. Результаты коэффициента термического газовыделения от времени приведены на рисунке 1.

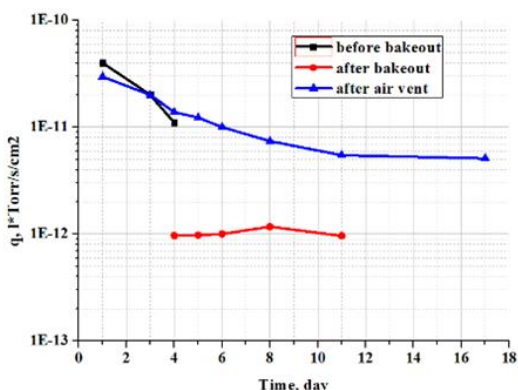


Рисунок 1 – Результаты термического газовыделения из карбида кремния от времени непрерывной откачки при различных условиях обработки образцов

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.

Был изготовлен сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА). В отличие от общепринятых способов изготовления ПММА (литье под давлением, прессование и экструзия) в экспериментах использовался метилметакрилат, который подвергался очистке методом пленочного испарения под пониженным давлением с использованием ротационного испарителя. Инициирование процесса полимеризации осуществлялось потоком ускоренных электронов с использованием импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6. Образцы СВМ-ПММА были получены методом фронтальной полимеризации при температуре 60 °С в течение 5 суток. $M_w \sim 10^7$ г/моль. Степень полидисперсности примерно равна 3÷3,5. Для сравнения у обычного полиметилметакрилата молярная масса равна 10^6 г/моль [A8].

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. После прогрева термическое газовыделение из СВМ-ПММА больше на два порядка, чем из нержавеющей стали без прогрева. Выполненные исследования вакуумных свойств сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов, изготовленных фронтальной полимеризацией позволяют утверждать, что данный материал может быть использован для изготовления вакуумных камер для получения вакуума до 10^{-7} Торр.

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. 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. Был изготовлен образец сцинтилляционного экрана размерами 270 мм x 480 мм (коммерчески изготавливаются размерами порядка 100 мм x 100 мм). Экран изготавливался нанесением люминофора Р43 на металлическую подложку (сталь 12Х18Н9Т) методом электрофоретического осаждения. Этот метод дает повышенную термическую стойкость экранов, повышенную плотность упаковки зерен люминофора и лучшую их адгезию к подложке [A8], [A15].

Измерение коэффициента термического газовыделения выполнялось до и после каждого прогрева при 140 °С в течение 24 часов, а также после воздействия атмосферного давления. Каждый прогрев уменьшает газовыделение из сцинтиллятора примерно на два порядка по сравнению с

газовыделением без прогрева, а напуск атмосферы воздуха увеличивает более, чем на порядок по сравнению с газовыделением после прогрева.

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.

Поскольку аэрогель имеет низкую плотность, но высокую пористость (90 ÷ 99,9%), то его площадь внутренней поверхности достигает 100 - 2000 м²/г. Поэтому важно определить коэффициент термического газовыделения и спектр остаточных газов для этого материала в зависимости от длительности откачки и предварительных условий подготовки образцов. 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 [А11].

Вторая глава посвящена вакуумным соединениям 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 конце XX – начале XXI веков появились упругие С-образные уплотнения с нанесенным мягким гальваническим покрытием. 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. 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 [5]. 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.

В ИЯФ СО РАН было принято решение применять данные уплотнения при размерах вакуумных камер больше 350 мм (для сечений меньше 350 мм - фланцы типа Conflat) для вакуумных камер для Collector Ring (FAIR, Германия). 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. Были протестированы различные типы С-образных уплотнений: с и без внутренней пружины, различными покрытиями. Наилучшими результатами испытаний обладают уплотнения типа CE (без внутренней пружины) и CSE (с внутренней пружиной), покрытые оловом или серебром. Достоинством С-образных уплотнений CE 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. 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 [А6].

В третьей главе описаны вакуумные насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума. Принцип действия магниторазрядных насосов. Рассмотрены конструкции магниторазрядных насосов с сильным магнитным полем.

В магниторазрядных (или ионно-геттерных) насосах 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 ячейка 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. Модификация первоначальной конструкции магниторазрядных насосов с целью увеличения эффективной откачки инертных газов затронули электродную систему. Так появились «Noble» диодный и триодные магниторазрядные насосы.

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 [6], к сожалению, не существует, поэтому можно сделать оценочные расчеты и подтверждать экспериментальным путем. Быстрота откачки магниторазрядных насосов зависит от длины и диаметра анодной ячейки, зазора между анодом и катодом, величиной магнитного поля и т.д.

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 скорости откачки по азоту. 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, 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) скорости откачки.

Были изучены малогабаритные однопотенциальные неохлаждаемые магниторазрядные насосы (диодного, Noble диодного и триодного типов). Теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой. Как было обнаружено, насосы с сильным магнитным полем обладают

существенным недостатком: не удалось получить предельное давление ниже 10^{-9} Торр [7]. В инжекционной части ЦКП «СКИФ» используются триодные магниторазрядные насосы с быстротой откачки 40 л/с по азоту. В к्लитронах (вакуумно-изолированных устройствах) производства ИЯФ СО РАН поддержание сверхвысокого вакуума достигается параллельно подсоединенными магниторазрядным диодным насосом с быстротой откачки 20 л/с по азоту 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 с быстротой откачки 20 л/с по азоту. 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.

Четвертая глава посвящена вакуумным насосам на основе нераспыляемых геттеров.

Кратко описывается механизм активации, приводятся значения коэффициента диффузии и пределов растворимости разных газов для различных металлов.

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. 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. 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. Температура активации геттеров – 650 °С. Диски установлены последовательно в ряд с зазором 1,5 мм в количестве 31 шт в каждой «колонне». Были изготовлены насосы с одной, двумя, тремя, четырьмя и шестью «колоннами». По своим газопоглощающим и активационным характеристикам отечественные вакуумные насосы на основе нераспыляемых геттеров соответствуют импортным аналогам.

Поскольку геттерные насосы, обладающие даже большой скоростью 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. 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 запущен в производство. В комбинированном насосе применяется магниторазрядный насос триодного типа с ячейкой «StarCell» и быстротой действия 40 л/с по азоту. Геттерная часть насоса изготовлена из аналогичных геттерных дисков, что и описанные выше сосредоточенные насосы на базе нераспыляемых геттеров [A10]. Измерения сорбционной емкости по каждому газу представлены на рисунке 2.

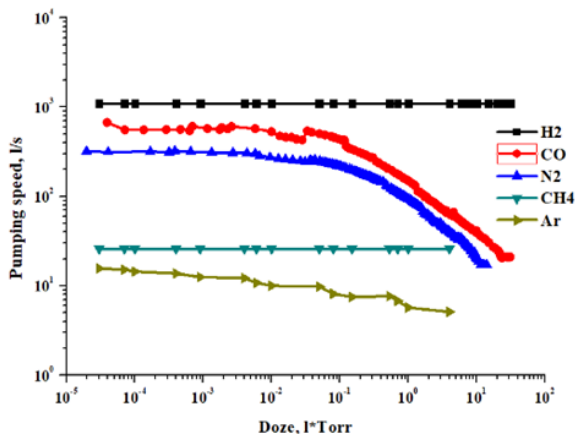


Рисунок 2 – Зависимости быстроты откачки от количества поглощенного газа для комбинированного насоса для различных газов

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. Проведенные эксперименты показали, 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.

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.

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 [8]. Поиск покрытия с температурой активации в диапазоне $140 \div 160$ °C не прекращается и по настоящее время, например, геттерное покрытие Ti-Zr-Hf-V начинает активироваться уже при температуре $150 \div 160$ °C [9], 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.

Были напылены и исследованы геттерные покрытия на основе тантал-титана (Ta-Ti, Ta-Ti-Zr, Ta-Ti-Zr-V) и в качестве эталона Ti-Zr-V [A4].

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, что может стать причиной ухудшения вакуумных условий при увеличении температуры активации для продления срока эксплуатации геттерного покрытия.

Пятая глава посвящена описанию вакуумной системы инжекционной части ЦКП «СКИФ».

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 витонвым уплотнением.

Поскольку клистроны 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 клистронов или активации геттера.

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.

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). 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.

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.

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.

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 см². 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.

Выбор материала для большинства вакуумных камер бустера обуславливается импульсным режимом работы магнитов. Необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например, нержавеющие марки стали аустенитного класса. В таком случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения варьируется в диапазоне от десятых долей до нескольких процентов, для различных магнитов).

Вакуумная камера в поворотных магнитах, изготовленная из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L, представляет собой в поперечном сечении эллипс 41 мм × 24 мм с молекулярной проводимостью 3,2 л·м/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 аргоно-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 мм × 22 мм с молекулярной проводимостью 4 л·м/с. Толщина стенки камеры 1 мм.

Вакуумная камера впускных/выпускных ВУМР магнитов имеет форму эллипса с внутренней апертурой 60,3 мм × 21 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 °С. 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 мм × 24 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 17×15 мм² (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. 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.

В заключении представлены основные результаты работы и даны рекомендации по дальнейшей разработке темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- Исследованы вакуумные свойства люминофорных материалов (сцинтиллятор P43, 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.

Цитированная литература

1. 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.
2. International Standard ISO/TS 3669 – Vacuum technology – Bakable flanges. – Дата публикации: 08.2017.
3. Балицкий, А.В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры / А.В. Балицкий. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1974. – 312 с.
4. 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
5. Официальный сайт фирмы HTMS: (<http://www.hightechmetalseals.com/catalogue>)
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

- A1. 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.

A2. 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.

A3. 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.

A4. 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.

A5. Dranichnikov, A.N. 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.

A6. 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. Sharafeeva. – 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.

A7. 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.

A8. 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.

A9. 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.

A10. 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.

A11. 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.

A12. 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:

A13. 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.

A14. 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.

A15. 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.

Семенов Алексей Михайлович

**Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем
ускорительных и плазменных установок**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Сдано в набор 22.06.2026.
Подписано в печать 23.06.2026.
Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 15

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11