

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Семенова А.М. на тему:
«Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем ускорительных и плазменных установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертационная работа Семенова А.М. посвящена созданию научных основ создания и поддержания высокого вакуума как технологической среды для ускорительной техники. Специфическими особенностями этой техники являются ограничения по использованию конструкционных материалов, а большие габариты вакуумированных объемов требует нового подхода к выбору средств откачки и элементов высоковакуумных систем для обеспечения требуемых потоков газовыделений и поддержания заданного давления остаточных газов.

Актуальность темы диссертации связана с отсутствием в известной литературе данных по вакуумным характеристикам конструкционных материалов, необходимых для ускорительной техники. Обеспечение сверхвысоковакуумной технологической среды требуемыми для ускорительной техники характеристиками: протяженные до сотен метров вакуумные камеры, фотонно-стимулированная десорбция газов, ограничения по использованию конструкционных материалов является крупной научной задачей, имеющей важное значение для отечественной и мировой науки и техники.

Научную новизну выводов и рекомендаций характеризуют:

1. Впервые полученные данные по удельному потоку газовыделений из необходимых для ускорительной техники материалов: карбида бора, карбида кремния, сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата и люминофора Р43.
2. Разработанные и протестированные прогреваемые разъемные вакуумные соединения Ду 500 с упругими С-образными уплотнениями, необходимые для получения и поддержания высокого и сверхвысокого вакуума в ускорительных комплексах с большим проходным сечением.
3. Разработанные и исследованные конструкции диодных и триодных магниторазрядных насосов с увеличенной, по сравнению с имеющимися аналогами, быстротой действия, предназначенные для эффективной откачки, включая откачку инертных газов, вакуумных камер ускорителей заряженных частиц.
4. Научно обоснованные прототипы высоковакуумных насосов на базе нераспыляемых газопоглотителей Ti-Zr-Al с быстротой откачки 300 л/с, 600 л/с, 800 л/с, 900 л/с и 1300 л/с по водороду.
5. Исследованные газопоглощающие и активационные свойства нераспыляемых геттеров на базе тантал-титан, нанесенных на внутреннюю поверхность вакуумных камер.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается корректным использованием положений фундаментальных наук, большим объемом хорошо воспроизводимых и непротиворечивых между собой экспериментальных данных. Анализ результатов исследования показывает хорошее соответствие с теоретическими и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Ценность для науки и практики проведенной соискателем работы заключается в существенном вкладе в вакуумную науку и технику в виде усовершенствования магниторазрядных насосов, способных эффективно откачивать инертные газы, а также в разработке и исследовании насосов на основе нераспыляемых газопоглотителей, включая покрытие ими стенок вакуумной камеры.

Аргоновая нестабильность магниторазрядных насосов отрицательно влияет на время жизни пучка ускоренных частиц, поэтому были предложены и реализованы методы откачки диодным (Noble diode pump) и триодным насосами, в которых пленка титана с «замурованным» аргоном не бомбардируется ионами.

Прогреваемые разборные фланцевые соединения для оборудования ускорительной техники с $D_y > 400$ мм серийно не выпускаются, в работе были предложены к использованию в ускорительной технике и исследованы разборные фланцевые соединения с С-образными уплотнительными элементами.

Практическая значимость диссертации заключается в реализации вакуумных условий для получения пучка электронов с энергией более 200 МэВ в отечественном ускорителе ЦКП «СКИФ», в котором количество фланцев достигает 1000 шт., а малейшая негерметичность приводит к срыву пучка.

Основные положения диссертации прошли апробацию на 13 российских и 5 международных научно-технических конференциях.

Работа Семенова А.М. носит экспериментальный характер, в которой поставленная цель достигается с помощью разработанных автором оригинальных методов исследования, включая создание несколько уникальных экспериментальных стендов.

Оценка содержания диссертации: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложена на 214 страницах, включает 91 рисунок, 23 таблицы, 2 приложения и список цитируемой литературы из 101 наименования.

Главными достоинствами работы являются:

1. Впервые исследованы вакуумные характеристики конструкционных материалов ускорителей, таких как: карбид бора B_4C , который используется для защиты от интенсивных потоков нейтронов, диоксид кремния SiO_2 и люминофор Р43, используемые в диагностическом оборудовании, высокомолекулярный полиметилметакрилат для изготовления специальных вакуумных камер.

2. Впервые предложена конструкция комбинированного вакуумного насоса с последовательно соединенными магниторазрядным насосом и насосом на базе нераспыляемого геттера для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

Во введении обоснована актуальность поставленных задач и предложены пути их решения, сформулированы цель и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу и выбору материалов для использования в высоковакуумной ускорительной технике. Приведены требования к газовыделению из конструкционных материалов, предъявляемые в международных высоковакуумных установках, например, в ITER, и составляющих менее 10^{-10} л·мбар/с/см² для водорода и 10^{-12} л·мбар/с/см² для остальных остаточных газов.

Во второй главе рассматриваются вакуумные соединения для высоко- и сверхвысоковакуумного оборудования, с акцентом на большие габариты присоединительных фланцев. Проанализированы причины нарушения их герметичности, достоинства и недостатки существующих типов прогреваемых соединений, к которым относится и стоимость фланцев и уплотнительных элементов. Изучен опыт применения того или иного типа соединения на различных установках, результатом чего явилось предложение использования упругого С-образного уплотнения с нанесенным мягким гальваническим покрытием с проходным диаметром до 7600 мм.

Третья глава посвящена описанию и выбору откачных средств для получения высокого и сверхвысокого вакуума в ускорительной технике. Рассмотрены конструкции и принцип действия магниторазрядных насосов с сильным магнитным полем диодного и триодного типа. Автор утверждает, что в настоящее время нет ясной картины явлений, происходящих в разряде, и общей теории разряда, с помощью которой можно было бы рассчитывать характеристики насоса в широком диапазоне давлений. Поэтому, в работе сделаны оценочные расчеты, подтвержденные экспериментальным путем. Было предложено использовать в инжекционной части ЦКП «СКИФ» триодные магниторазрядные насосы с быстротой откачки 40 л/с по азоту.

В четвертой главе описаны вакуумные насосы на основе нераспыляемых газопоглотителей. Показан механизм активации материала геттера, приводятся значения коэффициента диффузии и пределов растворимости разных газов для различных металлов. Предложен нераспыляемый газопоглотитель с химическим составом Ti-Zr-Al с температурой активации 650 °С, экспериментально определена сорбционная емкость газопоглотителя. Для эффективной откачки инертных газов и метана предложен комбинированный насос, состоящий из насоса на основе нераспыляемых газопоглотителей и магниторазрядного насоса триодного типа с малыми массогабаритными размерами. Для увеличения быстроты откачки, геттерное покрытие было нанесено непосредственно на внутреннюю поверхность стенки вакуумной камеры.

Пятая глава посвящена описанию вакуумной системы инжекционной части ЦКП «СКИФ». Откачка линейного ускорителя осуществляется магнитоэлектрическими насосами триодного типа с быстротой откачки, равной 40 л/с по азоту, полная длина канала транспортировки пучка составляет порядка 250 м, насосы располагаются на расстоянии 8 метров друг от друга, каждый вакуумный объем отсекается цельнометаллическим вакуумным затвором. Для форвакуумной откачки используются откачные станции, включающие в себя спиральный и турбомолекулярный насосы. В клистронах предусмотрены магнитоэлектрические насосы диодного типа и насос на основе нераспыляемых газопоглотителей с быстротой откачки 300 л/с по водороду.

Замечания по диссертации:

1. На рисунках с изображением спектров остаточных газов (стр. 45, 49, 50, 62, 67, 68, 74 и т.д.) нет обозначений имеющихся в спектре газов и комментариев к ним, что затрудняет сравнение спектров;
2. На стр. 107 диссертации говорится о неустойчивом характере работы магнитоэлектрических насосов при давлении $10^{-6} - 10^{-5}$ Торр, однако из рис. 3.12 этого не следует;
3. На стр. 114 диссертации результаты калибровки датчиков давления и масс-спектрометра (рис. 3.16 и 3.17) представлены без статистической обработки, что может негативно сказаться на точности измерений;
4. На стр. 136 диссертации в формуле (4.2) если $|\Delta H_{ss}| < |\Delta H_{ox}|$, то разность $\Delta H_{ox} - \Delta H_{ss}$ положительна, а не отрицательна;
5. На стр. 152 диссертации говорится о зависимости быстроты откачки от сорбционной емкости, хотя по определению сорбционная емкость – это количество молекул газа, которое может поглотить конкретный геттер: на стр. 153 на рис. 4.6 правильно указана зависимость быстроты откачки от количества поглощенного газа, а на стр. 159 на рис. 4.10 – ошибочно записана сорбционная емкость вместо количества поглощенного газа;
6. Для высокого и сверхвысокого вакуума важное значение имеют условия поли- или мономолекулярной адсорбции газов, а также время жизни адатомов, поэтому не понятно, что понимается под коэффициентом прилипания молекул на стр. 168? Если это коэффициент аккомодации, то он определяется соотношением энергий падающей на стенку частицы, энергией десорбированной частицы и энергией (температурой) поверхности.
7. В тексте диссертации имеется ряд неточностей:
 - в формуле (1.1) на стр. 24 перепутаны индексы i и j ;
 - на стр. 48 на рис. 1.7 не показан bypass и исследуемый образец;
 - на стр. 107 не сказано, что подразумевается под «величиной» магнитного поля – напряженность, индукция или другое;
 - на стр. 107 рисунок 3.12 назван расчетом;
 - на стр. 115 селективность откачки неудачно названа влиянием спектра остаточных газов на быстроту откачки;

- на стр. 136 формула обозначена (5.2) вместо (4.2).

Сделанные замечания не снижают положительную оценку диссертации.

В заключении следует отметить, что представленная диссертация актуальна, в ней есть научная новизна и практическая значимость, а полученные результаты демонстрируют возможность создания высоковакуумных и сверхвысоковакуумных элементов современной ускорительной техники. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых изданиях и неоднократно докладывались на научно-технических конференциях. Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации, которая является завершенной научно-квалификационной работой, в которой автор сформулировал и обосновал научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной задачи создания сверхвысоковакуумной технологической среды с требуемыми для современной ускорительной техники характеристиками.

Результаты диссертации представляют интерес для областей науки и техники, в которых требуется высокий и сверхвысокий вакуум: энергетика, электроника, машиностроение, авиационная и космическая техника.

На основании вышеизложенного считаю, что представленная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Семенов Алексей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Я, Панфилов Юрий Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Семенова Алексея Михайловича, и их дальнейшую обработку.

Заведующий кафедрой «Электронные
технологии в машиностроении»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Доктор технических наук, профессор



Панфилов Юрий Васильевич

105005, Российская Федерация, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, каф. МТ-11 panfilov@bmstu.ru, +7 499 267-0213

« 7 » 09 2026 г.

Подпись профессора Панфилова Ю.В. заверяю



« ВЕРНО »

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА

 КИНЯПИНА А.Н.
ОТДЕЛ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЕМНОЙ УКСИ
МГТУ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА