

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, член-корреспондента РАН
Кравчука Леонида Владимировича
на диссертационную работу
Семенова Алексея Михайловича
**«Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем ускорительных и
плазменных установок»,**
представленную в диссертационный совет 24.1.162.01 на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им.
Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук на соискание ученой
степени доктора технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Актуальность работы

Диссертационная работа А.М.Семенова посвящена разработке и исследованию вакуумных систем ускорителей заряженных частиц и плазменных установок для термоядерного синтеза. В большинстве таких современных установок требуется получение высокого и даже сверхвысокого вакуума, а вакуумная система является одной из основных систем установки. Исследование вакуумных свойств различных новых материалов, разработка и обоснование применимости тех или иных разборных соединений, разработка и определение критериев выбора современных насосов для получения высокого и сверхвысокого вакуума определяют **важность и актуальность** данной работы. Следует отметить, что выводы по различным разделам диссертации сделаны на основании исследований, проводимых автором в течение большого- почти двадцатилетнего периода времени, и накопленного им опыта разработки вакуумных систем реально действующих ускорительных и плазменных установок.

Практическая значимость полученных автором результатов

Результаты диссертационной работы не только могут быть, но уже использованы при разработке и создании различных ускорителей заряженных частиц и плазменных установок.

В частности, можно выделить обоснование использования различных материалов в вакуумных системах таких физических установок, как ИТЭР (Франция), FAIR (Германия), NICA (Дубна, Россия) и линейный ускоритель ЦКП «СКИФ» (Россия). Исследования, обоснованы и выбраны для NICA и Collector Ring FAIR разъемные фланцевые соединения с упругими С-образными уплотнениями. Проведенные автором расчеты и исследования магниторазрядных насосов и насосов на базе нераспыляемых геттеров легли в основу создания серийных насосов, используемых в синхротроне ЦКП «СКИФ». Получен рабочий уровень вакуума в линейном ускорителе и бустере ЦКП «СКИФ», что позволило достичь проектных параметров пучка в инжекторе. Главным достижением можно безусловно назвать разработку, создание и ввод в эксплуатацию вакуумной системы инжекционной части ускорительного комплекса СКИФ.

Таким образом, **практическая значимость** диссертации не вызывает сомнений. Результаты работы используются в различных отечественных и зарубежных ускорителях электронов и ионов, а также в плазменных установках.

Научная новизна диссертационной работы

Впервые проведены измерения коэффициентов термического газовыделения и получены спектры остаточных газов различных материалов, таких как карбид бора, карбид кремния, сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат, люминофор Р43, аэрогель из аморфного диоксида кремния, используемых для различных применений в различных

системах электронных и ионных ускорительных и плазменных установок. Определена зависимость термического газовыделения этих материалов от температуры прогрева, длительности обезгаживания и влияния напуска воздуха до атмосферного давления. Разработаны и протестированы новые разъемные вакуумные соединения, нашедшие применения в различных ускорительных установках.

Впервые в России разработаны, исследованы и запущены в производство на заводе АО «Катод» малогабаритные неохлаждаемые магниторазрядные насосы триодного типа и компактные высоковакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров с быстротой откачки от 300 л/с до 1300 л/с для синхротрона ЦКП «СКИФ».

Впервые измерены газопоглощающие и активационные свойства нераспыляемых геттеров, нанесенных на внутреннюю поверхность узкоапертурных вакуумных камер ондуляторов и вигглеров.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается большим объемом полученных автором экспериментальных данных, хорошим соответствием с теоретическими исследованиями и результатами, полученными другими исследователями. Обсуждение полученных данных на специализированных конференциях и публикации в ведущих научных журналах не вызывают сомнения в **обоснованности и достоверности научных положений и выводов**. Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 32 печатных работах, из которых 15 научных статей в журналах из списка ВАК, 7 статей в сборниках трудов конференций и 10 тезисов докладов на конференциях.

Личный вклад А.М.Семенова в результаты, выносимые на защиту, является определяющим.

Структура и основное содержание работы

Диссертация является законченным научным трудом и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 214 страницах и включает в себя 91 рисунок, 23 таблицы, 2 приложения и список литературы из 101 наименования.

Во введении обоснована актуальность исследований и разработок и определена цель работы. Сформулированы задачи исследований; положения, выносимые на защиту; научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указан личный вклад автора.

Первая глава посвящена обзору используемых и исследованиям новых или малоизученных или впервые применяемых материалов, используемых в высоковакуумной технике. Определяются требования и области применения различных материалов.

Во второй главе решаются вопросы вакуумных соединений для получения высокого и сверхвысокого вакуума. Приводятся результаты исследований и обоснования применения С-образных уплотнений для вакуумных камер большого диаметра.

В третьей главе описаны вакуумные насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума. Рассмотрены принцип действия и различные конструкции магниторазрядных насосов с сильным магнитным полем. Приведены результаты исследования малогабаритных однопотенциальных неохлаждаемых магниторазрядных насосов различного типа.

Четвертая глава посвящена вакуумным насосам на основе нераспыляемых геттеров. Описывается механизм активации, приводятся значения коэффициента диффузии и пределов растворимости разных газов для различных металлов. Обосновывается решение создания насосов из геттерных дисков с внутренним нагревателем. Приведены результаты исследований геттерных покрытий с целью определения их оптимального применения.

В пятой главе дано описание разработанной вакуумной системы инжекционной части ЦКП «СКИФ». Линейный ускоритель-инжектор с помощью шиберов разделяется на три вакуумных объема: СВЧ-пушка, система группирования и предускорения, регулярные ускоряющие секции. Откачка осуществляется магниторазрядными насосами триодного типа. Затем идет 24 м канал из Линейного ускорителя в Бустер, представляющий собой вакуумную камеру из бесшовной трубы из нержавеющей стали. Канал транспортировки из Бустера до Накопителя длиной 250 м также разделен на три части, откачиваемых магниторазрядными насосами триодного типа. Вакуумная система Бустера состоит из четырех суперпериодов, изолированных друг от друга клапанами с ВЧ контактами и откачиваемых также магниторазрядными насосами. Приводится описание и обоснование выбора материала и конструкции вакуумных камер на всех участках инжекционной части.

В заключении представлены основные результаты работы и даны рекомендации по проведению дальнейших разработок и исследований.

В двух приложениях приведены формулы и алгоритмы расчета проводимости и эффективной скорости откачки магниторазрядного насоса.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке и создании вакуумных систем линейных и кольцевых ускорителей заряженных частиц для проведения фундаментальных и прикладных исследований, а также плазменных установок.

В качестве замечаний и недостатков можно отметить следующие:

1. Автор утверждает, что комбинированный насос наберет дозу 1 л*тор по аргону при натекании воздуха $1\text{E-}7 \text{ л*тор}$ за 30 лет. При этом не приводится расчет, откуда это следует.
2. Зачем в Бустере использовать насосы со скоростью откачки 40 л/с , если эффективная скорость откачки определяется пазами под откачку в откачных портах? Если использовать насосы со скоростью откачки вдвое меньше, эффективная скорость откачки уменьшится на 30%, а экономическая выгода может быть большой.
3. В диссертации приведены результаты большой работы по измерениям тепловых газовыделений различных материалов, однако не приводятся данные по парциальным тепловым газовыделениям, необходимым для расчетов вакуумной системы.
4. В разделе 3.4 не приведены данные измерения быстроты действия насосов по водороду – важному параметру для расчета вакуумной системы.
5. В диссертации чрезмерно большой объем занимают обзоры материалов вакуумных систем, вакуумных соединений, принципа действия вакуумных насосов.
6. Представляется, что термин «быстрота откачки» является профессиональным жаргонизмом, физическим параметром является «скорость откачки», тем более, что в главе 5 автор использует именно его.
7. Работа в целом написана хорошим языком и достаточно полно иллюстрирована, однако имеется достаточно много опечаток и небрежностей. Например, опечатки на стр.4,14,23,27 (значение O2), 34 (величина тока нагревала геттер),37,72 (формулы 1.1 и 2.1 одинаковы),77,80,89,90,115. Качество некоторых рисунков оставляет желать лучшего, по некоторым нет ссылок на публикации (3.11-3.16), рис.2.2-нет обозначений, рис.3.16-3.19 не указаны погрешности измерения.

Данные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой оценки результатов автора диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация А.М.Семенова представляет собой законченную научную работу, решающую в том числе важнейшую задачу разработки, создания и ввода в эксплуатацию инжекционной части (Линейный ускоритель-Бустер) первого отечественного источника синхротронного излучения четвертого поколения, включающую в себя также разработку и запуск в производство новых отечественных магниторазрядных насосов.

Диссертационная работа «Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем ускорительных и плазменных установок» полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор **Семенов Алексей Михайлович**, безусловно, **заслуживает присуждения степени доктора технических наук** по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кравчук Леонид Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Семенова Алексея Михайловича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Член-корр. РАН, доктор технических наук

по специальности 01.04.20- «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Главный научный сотрудник Института ядерных исследований РАН

31 августа 2026 г.

Кравчук Леонид Владимирович

тел. +7 9037904680

e-mail: kravchuk@inr.ru

Подпись Кравчука Л.В. заверяю

Зам. директора ИЯИ РАН по научной работе

кандидат физико-математических наук



А.Г.Панин