



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, <https://tpu.ru>
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations): 02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-606444, <https://tpu.ru>
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

06.10.2026 № 03/11446
на № _____ от _____

О направлении отзыва ведущей организации

Председателю диссертационного
совета 24.1.162.01

доктору физико-математических наук
Мешкову О.И.

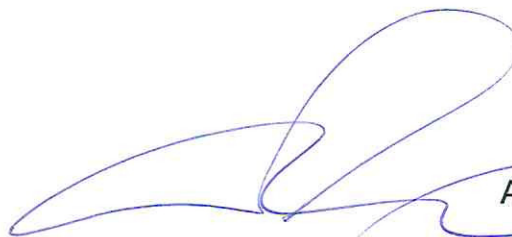
630090, г. Новосибирск, ИЯФ СО РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 11

Уважаемый Олег Игоревич!

От лица федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» направляем Вам отзыв ведущей организации по диссертации Семенова Алексея Михайловича «Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем ускорительных и плазменных установок», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Отзыв подготовлен заведующим научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий», профессором, доктором технических наук Ремнёвым Геннадием Ефимовичем.

Приложение: на 6 л. в 1 экз.

Проректор по науке
и стратегическим проектам



А.С. Гоголев

Баранова Александра Александровна
+7 (3822) 701777, доп. 2580
bal@tpu.ru



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и
стратегическим проектам
А.С. Гоголев
» _____ 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

на диссертацию

**Семенова Алексея Михайловича «Разработка и исследование
элементов высоковакуумных систем ускорительных и плазменных
установок»,**

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника.

Актуальность исследования. Вакуумные технологии неразрывно
связаны с фундаментальными науками (химия, биология, молекулярная
физика, термодинамика). Вакуум служит средой для исследований
в электронике, термоядерном синтезе и ускорительной технике, где требуется
высокий и сверхвысокий вакуум. Создание таких систем требует учета выбора
материалов, конструкторской проработки соединений и разработки методов
подготовительных операций.

На данный момент хорошо изучены и широко используются во всем
мире для получения вакуума такие материалы как нержавеющие стали, медь,
алюминий и их сплавы. Но возникает потребность и в использовании новых
материалов в вакуумных системах: карбид бора (радиационная защита),
карбид кремния (вакуумные камеры), люминофоры (диагностика пучков),
органические стекла. Требуется изучение их вакуумных свойств, таких как
газовыделение со стенок, проницаемость для различных газов и других.
Существует также проблема выбора разборных вакуумных соединений, в том
числе для ускорительных комплексов с большой апертурой вакуумных камер
400 мм и более.

Становится актуальным поиск новых материалов, изучение
их вакуумных свойств для применения в высоком и сверхвысоком вакууме,
а также разработка современных отечественных вакуумных насосов.

Научная новизна.

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. Проведены измерения
коэффициента термического газовыделения из этого материала, изучен
спектр остаточных газов. 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. Впервые измерен коэффициент термического газовыделения сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата – перспективного материала для создания вакуумных камер, полученного методами объемной либо фронтальной полимеризации и обладающего механическими свойствами, сравнимыми с некоторыми марками стали (Ст3). Впервые измерены коэффициенты термического газовыделения люминофора Р43, нанесенного ультразвуковым распылением и методом осаждения на подложки размерами больше, чем 100 мм × 100 мм для диагностики пучков ионов и протонов/антипротонов в ионных ускорителях, а также аэрогеля, изготовленного из аморфного диоксида кремния. Определена зависимость коэффициента термического газовыделения этих веществ от температуры прогрева, длительности обезгаживания и влияния напуска воздуха до атмосферного давления. 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. Создание магнитоэлектрических насосов с сильным магнитным полем (до 0,3 Тл) является перспективным решением для получения высокого вакуума, поскольку позволяют уменьшить габариты насоса за счет меньших размеров диаметра и длины анодных ячеек, а также их количества при сохранении быстроты откачки. В то же время при сохранении размеров электродного блока возможно увеличение быстроты откачки насоса за счет увеличения количества анодных ячеек. В работе представлены конструкции диодных магнитоэлектрических насосов при различных размерах анодных ячеек, их количества, а также зазора между анодом и катодами и величиной магнитного поля. Были выполнены расчеты и проведены измерения быстроты откачки насосов. Разработка малогабаритных однопотенциальных неохлаждаемых триодных насосов с быстротой откачки 20 л/с и 40 л/с и Noble диодные с быстротой откачки 20 л/с. Изготовление прототипов высоковакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров Ti-Zr-Al с быстротой откачки 300 л/с, 600 л/с, 800 л/с, 900 л/с и 1300 л/с по водороду. Впервые в России в целях импортозамещения предложена конструкция комбинированного вакуумного насоса с последовательно соединенными насосом на базе нераспыляемого геттера и магнитоэлектрического насоса из отечественных материалов. Разработанные насосы запущены в серийное производство на заводе АО «Катод» (г. Новосибирск, Россия) для синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ».

Содержание работы. 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.

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. Рассчитан коэффициент термического газовыделения для карбида бора при комнатной температуре и при нагреве до 100 °С. Представлен расчет газовыделения материалов в одном порту ИТЭР через 24 часа и 12 месяцев непрерывной откачки при температуре 100 °С. Проведена оценка газовой нагрузки в экваториальном порт-плэге №11. Рассмотрено применение карбида кремния в качестве перспективного материала для вакуумных камер ускорителей заряженных частиц. Измерен коэффициент термического газовыделения из карбида кремния. Приведены результаты термического газовыделения из карбида кремния от времени непрерывной откачки при различных условиях обработки образцов. Изготовлен сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА). Выполненные исследования вакуумных свойств сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов, изготовленных фронтальной полимеризацией, позволили утверждать, что данный материал может быть использован для изготовления вакуумных камер для получения вакуума до 10^{-7} Торр.

Вторая глава посвящена вакуумным соединениям для получения высокого и сверхвысокого вакуума. Проведен ряд экспериментов для изучения поведения фланцев ISO-K с использованием С-образных уплотнений при различных нагрузках, для этого были протестированы различные типы С-образных уплотнений: с и без внутренней пружины, с различными покрытиями.

В третьей главе описаны вакуумные насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума. Рассмотрены конструкции магнитоэрозийных насосов с сильным магнитным полем. Были изучены малогабаритные однопотенциальные неохлаждаемые магнитоэрозийные насосы (диодного, Noble диодного и триодного типов). Получены хорошо согласованные теоретические и экспериментальные данные.

Четвертая глава посвящена вакуумным насосам на основе нераспыляемых геттеров. Кратко описывается механизм активации, приводятся значения коэффициента диффузии и пределов растворимости разных газов в различных металлах и сплавах. Получены зависимости скорости откачки от количества поглощенного газа для комбинированного насоса для различных газов. Определено, что наилучшими газопоглощающими и активационными свойствами обладает геттер с химическим составом Ta-Ti-Zr-V.

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

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

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

1. Обоснована 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. Разработаны и протестированы разъемные фланцевые соединения с упругими С-образными уплотнениями для использования 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. Научные и инженерные результаты работы обеспечили получение требуемого уровня вакуума в инжекторе ЦКП «СКИФ», что способствовало достижению проектных параметров пучка на Линаке и бустере.

Научная и практическая значимость результатов.

Исследованы вакуумные свойства люминофорных материалов (сцинтиллятор Р43, аэрогель из аморфного диоксида кремния) в зависимости от длительности обезгаживания, условий подготовки и способа изготовления. Исследованы вакуумные свойства сверхвысокомолекулярных полиметилметакрилатов, изготовленных объемной и фронтальной полимеризацией в зависимости от длительности обезгаживания, условий подготовки и способа изготовления. Изучено термическое газовыделение для карбидных керамических материалов (карбида бора и карбида кремния) в зависимости от длительности обезгаживания и при различных температурах. Разработаны и испытаны разъемные вакуумные соединения больших диаметров (до 2000 мм) для получения сверхвысокого вакуума. Измерены газопоглощающие и активационные свойства нераспыляемых геттеров на базе тантал-титан, нанесенных на внутреннюю поверхность вакуумных камер, с возможностью применения в узкоапертурных вакуумных камерах встроенных источников синхротронного излучения (ондуляторов и вигглеров) ЦКП «СКИФ».

Практическая значимость обусловлена разработкой и созданием малогабаритных однопотенциальных неохлаждаемых триодных и Noble диодных насосов, высоковакуумных насосов на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al; комбинированного высоковакуумного насоса с последовательно соединенными в одном корпусе насоса на базе нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al и триодного магниторазрядного насоса. Насосы запущены серийно в производство. Разработана вакуумная система инжекционной части синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ», включающей линейный ускоритель на энергию 200 МэВ, бустер и два канала перепуска. Спроектирована,

изготовлена, собрана и запущена вакуумная система инжекционной части синхротрона 4+ поколения ЦКП «СКИФ» с получением требуемых параметров.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается 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. 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. Он достаточно подробно обоснован в работе.

Работа не лишена ряда недостатков:

1. Содержание глав в диссертации и описание их содержания в автореферате по большей части носят описательный характер и отражают инженерные решения, а не содержание научных исследований и получение новых результатов, которые обосновывают эти решения.

2. На наш взгляд, формулировки теоретической и практической значимости не совсем удачны. Так в пункте 1 следовало бы более четко указать, что именно в результате работы теоретически или практически обосновано использование новых материалов. В пункте 2 нет пояснения, какие именно преимущества дает применение С-образных уплотнений.

3. В изложении разделов (параграфов) глав диссертации (например, 4,5), да и автореферата сложно найти конкретную научную проблему, на решение которой направлено было исследование, состояние вопроса по этой проблеме.

4. Конкретное замечание по параграфу 4.6.3 – нет обоснования требуемой толщины покрытия.

Отмеченные замечания не снижают общей ценности работы.

Заключение.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации. Основные публикации автора по теме диссертации, список

которых приведен в автореферате, корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Диссертация Семенова Алексея Михайловича представляет собой законченную научную работу, направленную инженерно-техническое обоснование возможности применения перспективных материалов для использования в высоковакуумных установках и разработку современных отечественных вакуумных насосов, не уступающих по техническим характеристикам лучшим зарубежным аналогам.

По актуальности, новизне, практической значимости полученных результатов диссертационная работа Семенова Алексея Михайловича «Разработка и исследование элементов высоковакуумных систем ускорительных и плазменных установок» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, 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.

Отзыв составил:

Заведующий научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Доктор технических наук, профессор,

Тел. (3822) 70-17-77 доб. 2341

e-mail: remnev@tpu.ru



Ремнёв Геннадий Ефимович

Диссертация А.М. Семенова рассмотрена на открытом заседании научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д. 30., тел: +7 (3822) 70-17-77, tpu@tpu.ru) 25 сентября 2026 г.

Отзыв согласован на заседании НТС научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», протокол №107 от 25 сентября 2026 г.

Подпись Ремнёва Г.Е.
удостоверяю



ученый секретарь НИ ТПУ
Новикова Валерия Дмитриевна

«15» октября 2026 г.