**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ДС.ТПУ.11,**
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ **НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

решение диссертационного совета от 27 мая 2019 года № 2

О присуждении Никитину Дмитрию Сергеевичу, гражданину Российской Федерации (РФ), ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Плазмодинамический синтез ультрадисперсного карбида кремния»**
по специальности 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия принята к защите 19 марта 2019 г., протокол № 1, диссертационным советом ДС.ТПУ.11, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования (ФГАОУ ВО) «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30, утвержденным приказом ректора Национального исследовательского Томского политехнического университета № 15895 от 06.12.2018 г.

**Соискатель Никитин Дмитрий Сергеевич** 1991 года рождения,
в 2014 году окончил ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Минобрнауки России,
в 2018 году соискатель окончил очную аспирантуру ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Минобрнауки России,
работает ассистентом Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

Диссертация выполнена в Отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, с.н.с. Сивков Александр Анатольевич, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор.

**Дополнительно введенные члены диссертационного совета ДС.ТПУ.11:**

**Гынгазов Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов;

**Лебедев Сергей Михайлович,** доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Технологии космического материаловедения» Инженерной школы новых производственных технологий.

**Официальные оппоненты:**

**Желтухин Виктор Семенович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (г. Казань), профессор кафедры «Плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов»;

**Бакланова Наталья Ивановна,** доктор химических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) (г. Новосибирск), ведущий научный сотрудник лаборатории химического материаловедения,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов и дополнительно введенных членов диссертационного совета обосновывается высокой профессиональной компетенцией в электротехнических материалах и изделиях, достижениями и наличием публикаций в данной области науки и практики.

Соискатель имеет 85 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 30 работ (также один патент РФ на изобретение), из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 14 работ, 1 из которых относятся к первому квартилю. Общий объём публикаций составляет 30,125 печатных листов с долей авторского участия соискателя не менее 60 %. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Никитин Д.С.** Прямой плазмодинамический синтез ультрадисперсного карбида кремния / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, Вып. 2. – С. 15-20.

2. **Никитин Д.С.** Влияние энергетики плазмодинамического синтеза в системе Si-C на фазовый состав и дисперсность продукта / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // Российские нанотехнологии. – 2015. – Т. 10, № 1-2. – С . 34-39.

3. **Nikitin D.** Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis / A. Sivkov, D. Nikitin, I. Shanenkov, A. Ivashutenko, I. Rakhmatullin, A. Nassyrbayev // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – V. 79. – P. 123-130.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) Отзыв на автореферат от к.т.н. **Крутского Юрия Леонидовича**, доцента кафедры химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск (с замечанием); 2) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., доцента **Нещименко Виталия Владимировия**, заведующего лабораторией космического материаловедения ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», г. Благовещенск (с замечаниями); 3) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., профессора **Минаковой**

**Натальи Николаевны**, профессора кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул (с замечаниями); 4) Отзыв на автореферат от к.х.н., доцента **Истомина Павла Валентиновича**, старшего научного сотрудника лаборатории керамического материаловедения ФГБУН «Институт химии Федерального исследовательского центра "Коми научный центр УО РАН"», г. Сыктывкар (с замечаниями); 5) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н. **Рыжкова Сергея Витальевича**, профессора кафедры теплофизики ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва (с замечаниями); 6) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., члена-корреспондента НАН Беларуси **Асташинского Валентина Мироновича**, заместителя директора по научной работе и инновационной деятельности, заведующего отделением физики плазмы и плазменных технологий, заведующего лабораторией физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск (без замечаний); 7) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н. **Голованова Виктора Николаевича**, проректора по научной работе и информационным технологиям, заведующего кафедрой Физического материаловедения и к.ф.-м.н. **Махмуд-Ахунова Марата Юсуповича**, доцента кафедры Физического материаловедения ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск (с замечаниями); 8) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., профессора **Михайлова Михаила Михайловича**, заведующего лабораторией радиационного и космического материаловедения ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск (с замечанием); 9) Отзыв на автореферат от к.ф.-м.н., доцента **Кирко Дмитрия Леонидовича** доцента кафедры Физика плазмы ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва (без замечаний); 10) Отзыв на автореферат от д.т.н., **Перевислова Сергея Николаевича**, и.о. старшего научного сотрудника лаборатории кремнийорганических соединений и материалов ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН», г. Санкт-Петербург (с замечаниями); 11) Отзыв на автореферат от д.т.н., **Дудиной Дины Владимировны**, заведующей лабораторией синтеза

композиционных материалов ФГБУН «Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН», г. Новосибирск (с замечаниями); 12) Отзыв на автореферат от к.т.н. **Корниенко Елены Евгеньевны**, доцента кафедры материаловедения в машиностроении ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск (без замечаний).

Все отзывы положительные, замечания являются рекомендательными и дискуссионными и касаются фиксированности некоторых приводимых экспериментальных параметров, отсутствия данных о влиянии параметров спекания на структуру керамики, объяснения полученных результатов по свойствам и структуре керамики, недостаточности информации о прекурсорах синтеза и спекающих добавках, использования ряда неудачных выражений и терминов, отсутствия оценки производительности метода и экономических основ получения нанопорошков предлагаемым методом.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработан** метод прямого плазмодинамического синтеза карбида кремния на основе импульсного высоковольтного коаксиального магнитоплазменного ускорителя с графитовыми электродами, обеспечивающего получение в гиперскоростной струе электроразрядной плазмы ультрадисперсного продукта, что подтверждается авторскими публикациями и патентом на изобретение «Способ синтеза нанокристаллического карбида кремния»;

**предложены** новые подходы и технические решения по инициированию дугового разряда с помощью графитизации поверхности изолятора, параметрам состояния газа в окружающем пространстве, обеспечивающие плазмодинамический синтез в сверхзвуковой струе углерод-кремниевой электроразрядной плазмы продукта с высоким содержанием кубической β-фазы карбида кремния и монокристаллическим строением частиц с возможностью регулирования фазового состава, гранулометрического состава и полупроводниковых свойств;

**доказано** утверждение о перспективности использования плазмодинамического метода синтеза ультрадисперсного монокристаллического карбида кремния, пригодного для создания устройств наноэлектроники и субмикронной керамики с

высокой микротвердостью ~26,0 ГПа и коэффициентом теплопроводности более 70 Вт/м·К;

**введено** необходимое условие обеспечения возгонки и ионизации твердых порошкообразных прекурсоров в межэлектродном промежутке на преддуговом этапе процесса плазмодинамического синтеза.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** целесообразность использования свободной и импактной струй кремний-углеродной электроразрядной плазмы, генерируемых магнитоплазменным ускорителем с графитовыми электродами, перемычкой и ускорительным каналом, для возгонки и перевода в ионизированное состояние прекурсоров углерода и кремния, реализации плазмохимического синтеза карбида кремния, ускорения до сверхзвуковых скоростей и распыления в инертной атмосфере с последующим формированием ультрадисперсных монокристаллов кубической сингонии;

**применительно к проблематике** диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы регистрации импульсных напряжений и токов (порядка $10^5$ А); высокоскоростной фоторегистрации быстропротекающих процессов развития ударно-волновой структуры сверхзвуковых струй; количественного рентгеноструктурного анализа порошковых материалов; просвечивающей электронной микроскопии; сканирующей электронной микроскопии; энергодисперсионной спектроскопии; спектроскопии диффузного отражения; определения микротвердости методом Виккерса; измерения теплопроводности методом лазерной вспышки;

**изложены** гипотезы протекания процесса на преддуговом этапе в плазмодинамической системе и формирования монокристаллических частиц карбида кремния в разных условиях истечения сверхзвуковой струи в газообразную атмосферу аргона;

**раскрыты** особенности процесса формирования монокристаллических частиц кубического карбида кремния при различных параметрах состояния окружающей инертной атмосферы и условиях истечения сверхзвуковой струи синтезированного материала;

**изучено** влияние и выявлены закономерности, связывающие энергетические параметры импульсного электропитания ускорителя, соотношения масс прекурсоров синтеза, параметры внешней газообразной атмосферы с качественными характеристиками продукта плазмодинамического синтеза (фазовым составом, гранулометрическим составом, параметрами и дефектами кристаллической структуры);

**проведена модернизация** метода плазмодинамического синтеза для получения кубического карбида кремния в высокодисперсном состоянии с монокристаллическим строением частиц и классической формой роста.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработан и внедрен** метод прямого плазмодинамического синтеза ультрадисперсного карбида кремния для использования в качестве сырьевой основы и наполнителя при изготовлении опытной партии высокотеплопроводящих и высокотемпературных компаундов, применяемых для обеспечения тепловых режимов функционирования энергопреобразующей аппаратуры специального назначения, что подтверждается актом о внедрении материалов диссертационного исследования в АО «НПЦ «Полюс»;

**определены** оптимальные параметры всех элементов экспериментальной системы плазмодинамического синтеза, позволяющие проводить процесс с максимальным выходом высокодисперсного карбида кремния до 99 % с регулированием гранулометрического состава в пределах 20÷500 нм при разных условиях струйного течения, что дает возможность использования продукта для получения сверхтвердой керамики и для создания устройств наноэлектроники;

**созданы** конструкция коаксиального магнитоплазменного ускорителя с графитовыми электродами и экспериментальная установка на его основе с током до 150 кА и потребляемой энергией до 100 кДж;

**представлены** рекомендации по способам, условиям и параметрам получения электротехнической керамики с субмикронным размером зерна, высокими физико-механическими свойствами и теплопроводностью методом искрового плазменного спекания.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** результаты **получены** с использованием комплекса современного аналитического аттестованного оборудования, достигнута повторяемость и воспроизводимость экспериментов;

**теория** построена на проверяемых экспериментальных и аналитических данных и не противоречит ранее опубликованным работам по теме диссертации;

**идея базируется** на обобщении передового опыта и результатов экспериментальных исследований, изложенных в современной литературе, по получению и исследованию свойств ультрадисперсного карбида кремния;

**использовано** сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

**установлено** качественное соответствие результатов, полученных автором с результатами, представленными в опубликованных работах по данной тематике;

**использованы** современное оборудование и методы анализа порошковых материалов, а также современная аппаратура для регистрации параметров быстропротекающих электромагнитных и газодинамических процессов.

**Личный вклад соискателя состоит в** анализе литературных данных по теме диссертационной работы, планировании, постановке и проведении экспериментов по разработке, оптимизации параметров коаксиального магнитоплазменного ускорителя с графитовыми электродами и получению порошковых материалов, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных, получению и исследованию свойств керамических образцов. При непосредственном участии автора сформулированы научные положения и основные выводы диссертации, выполнены и опубликованы научные работы.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи получения ультрадисперсного продукта с высоким содержанием карбида кремния и монокристаллическим строением частиц, что имеет существенное значение для области наноэлектроники и электротехнических материалов (соответствие требованию п. 8 абз. 2 Порядка присуждения ученых степеней в НИ ТПУ приказ №93/од от 06.12.2018 г.).

На заседании 27 мая 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Никитину Д.С. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 7 человек (из них 6 докторов наук по научной специальности 05.09.02 – «Электротехнические материалы и изделия»), участвовавших в заседании, из 3 человек, входящих в состав совета, и дополнительно введенных на защиту 4 человек проголосовали: за – 7, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета ДС.ТПУ.11 — Завьялов Валерий Михайлович

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.11 — Леонов Андрей Петрович

27 мая 2019 г.