

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 27 декабря 2018 года публичной защиты диссертации Ляхова Анатолия Александровича «Моделирование кинетических процессов в аргон-силановой высокочастотной плазме пониженного давления» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Присутствовали 18 из 26 членов диссертационного совета, из них 5 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Пикушак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
5.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
7.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
8.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
9.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
10.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
11.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
12.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
13.	Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
14.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
15.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
16.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
17.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
18.	Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

В связи с кончиной председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича заседание провел заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А. А. Ляхову учёную степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 27.12.2018 № 362

О присуждении **Ляхову Анатолию Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Моделирование кинетических процессов в аргон-силановой высокочастотной плазме пониженного давления»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 23.10.2018 (протокол заседания № 353) диссертационным советом **Д 212.267.13**, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Ляхов Анатолий Александрович**, 1979 года рождения.

В 2001 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение «Омский государственный университет».

В 2004 году соискатель очно окончил аспирантуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет».

Работает в должности заведующего лабораторией вычислительной техники, по совместительству – в должности старшего преподавателя кафедры экспериментальной физики и радиофизики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре экспериментальной физики и радиофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Струнин Владимир Иванович**, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского», кафедра экспериментальной физики и радиофизики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Тимеркаев Борис Ахунович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», кафедра общей физики, заведующий кафедрой

Ижойкин Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Управление информационной политики и работы с выпускниками, начальник управления

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном **Аньшаковым Анатолием Степановичем** (доктор технических наук, профессор, лаборатория экологических проблем теплоэнергетики, главный научный сотрудник), указала, что для решения важной научно-технической задачи производства возобновляемых источников энергии на основе фотоэлектрических преобразователей большое значение имеют технологичные способы получения тонких пленок водородированного аморфного (a-Si:H) и микрокристаллического (μc-Si) кремния, среди которых одно из ведущих мест плазмохимический способ,

закрывающийся в разложении моносилана в плазме газового разряда. Работа А. А. Ляхова является актуальной, так как, во-первых, её результаты непосредственно направлены на оптимизацию плазмохимического способа осаждения пленок кремния, востребованных в производстве возобновляемых источников энергии; во-вторых, в ней (в части исследования кинетики электронов) рассматриваются вопросы, примыкающие к проблематике пылевой плазмы – направления, которое интенсивно разрабатывается в настоящее время. А. А. Ляховым определена функция распределения электронов по энергии для плазмы силансодержащих смесей при наличии пылевых частиц; произведен расчет электронных кинетических коэффициентов для ВЧ плазмы $\text{Ar}+\text{SiH}_4$ с учетом частиц пыли; разработана модель переноса нейтральных частиц химически-активной плазмы в диффузионном приближении и выполнен расчет химического состава силановой плазмы для условий соответствующих осаждению пленок кремния; установлены основные механизмы плазмохимического разложения моносилана в ВЧ-плазме на основе численного анализа кинетики химических реакций. Для каждого из рассмотренных вопросов получены новые и научно значимые результаты. Решение рассмотренных в работе задач имеет существенное значение для дальнейшего развития газовых разрядов, которые применяются для осаждения кремниевых пленок.

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 26 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 9 работ (из них в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, опубликовано 3 работы; в российском научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа), в сборниках материалов международных конференций, входящих в Web of Science, опубликовано 2 работы, монография (в соавторстве) опубликована 1, в сборнике научных трудов опубликовано 2 работы, в сборниках материалов международного технологического конгресса, 3-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии и всероссийских научных и научно-практических конференций (из них 1 электронный сборник) опубликовано 10 работ, свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ получено 2. Общий объем публикаций – 5 а.л., авторский вклад – 1,64 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Струнин В. И. Моделирование процесса разложения силана в высокочастотной плазме / В. И. Струнин, **А. А. Ляхов**, Г. Ж. Худайбергеннов, В. В. Шкуркин // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, вып. 6. – С. 109–114. – 0,4 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Strunin V. I. Numerical simulation of silane decomposition in an RF plasma / V. I. Strunin, **A. A. Lyakhov**, G. Zh. Khudaibergenov, V. V. Shkurkin // Technical Physics. – 2002. – Vol. 47, is. 6. – P. 760–766. – DOI: 10.1134/1.1486201.

2. Струнин В. И. Кинетика высокочастотного разряда низкого давления с конденсированной фазой / В. И. Струнин, **А. А. Ляхов**, Г. Ж. Худайбергеннов, В. В. Шкуркин // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, вып. 4. – С. 126–128. – 0,16 / 0,04 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Strunin V. I. Kinetics of an RF low-pressure discharge with a condensed phase / V. I. Strunin, **A. A. Lyakhov**, G. Zh. Khudaibergenov, V. V. Shkurkin // Technical Physics. – 2004. – Vol. 49, is. 4. – P. 502–504. – DOI: 10.1134/1.1736923.

3. **Ляхов А. А.** Численный анализ кинетики химических реакций в аргон-силановой плазме тлеющего разряда / А. А. Ляхов, В. И. Струнин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 50. – С. 79–89. – DOI: 10.17223/19988621/50/7. – 0,7 / 0,45 а.л.

Web of Science:

Lyakhov A. A. Numerical analysis of the kinetics of chemical reactions in an argon-silane plasma of the glow discharge / A. A. Lyakhov, V. I. Strunin // Vestnik

Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk state university journal of mathematics and mechanics. – 2017. – Vol. 50. – P. 79–89.

На автореферат поступило 10 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **А. И. Сайфутдинов**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Вакуумно-плазменные технологии» Казанского (Приволжского) федерального университета, *с замечанием:* непонятно, учитывались ли в кинетическом уравнении Больцмана, записанном в двучленном приближении, градиенты по пространственной производной (если нет, то приведен ли обоснованный «отказ» от этих членов?) и реакции пеннинговской ионизации.
2. **В. Ф. Мышкин**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями:* на с. 9 приводятся расчетные графики, а расчетные уравнения, начальные и граничные условия не приводятся, поэтому приводимые в 3 главе графики ничем не подкреплены, а сопровождаемый анализ, скорее всего, является ошибочным представлением соискателя; из таблицы на с. 15 невозможно получить графики на с. 18, отсутствуют уравнения химической кинетики и величины констант скоростей.
3. **В. А. Гридчин**, д-р техн. наук, профессор кафедры Полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета, *с замечаниями:* в тексте автореферата не отражена математическая формулировка модели, особенно это относится к изложению результатов главы 3; в автореферате не отражен вопрос о дисперсии размеров частиц пылевой фазы и способ учета этой дисперсии; полученные результаты в автореферате не сравниваются даже в асимптотическом приближении с результатами других авторов, например, упоминаемых в главе 1.
4. **Л. И. Лисицина**, д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета, *с замечаниями:* в автореферате не указано, из каких соображений были выбраны параметры пылевых частиц, которые учитывались в кинетическом расчете для электронов; в автореферате на с. 4 отмечено, что параметр $\xi_d = an_d$, а на с. 5 – $\xi_d = a^2 n_d$, неясно, что является верным.
5. **В. В. Рыбкин**, д-р хим. наук,

проф., главный научный сотрудник кафедры технологии приборов и материалов электронной техники Ивановского государственного химико-технологического университета, *с вопросами:* чем обусловлен выбор диапазона E/N ($5 \cdot 10^{-18}$ - $1 \cdot 10^{-15}$ В·см²), для которого проводились расчеты? влияют ли продукты диссоциации SiH_4 на ФРЭЭ?, и *с замечанием:* в работе приводятся данные о влиянии запыленности на транспортные характеристики электронов, но интерес представляет также влияние на константы скоростей процессов с участием электронов.

6. **В. П. Демкин**, д-р физ.-мат. наук, проф., начальник управления – проректор по сетевой информационной деятельности, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Национального исследовательского Томского государственного университета, *с замечаниями:* в изложении результатов исследования кинетики электронов в автореферате не указаны важные детали, касающиеся определяющих уравнений и используемых приближений: каким образом вычислялся ионный ток на пылевую частицу, как задавалась энергия плазменных ионов, если расчет выполнялся для приведенного поля, значения которого изменяются в пределах трех порядков; в приведенной на стр. 4 формуле для параметра $\xi_d = an_d$ радиус частиц указан в первой степени. 7. **А. С. Шатохин**, канд. техн. наук, доц., директор Центра электронных образовательных ресурсов, доцент кафедры «Информатики, вычислительной техники и информационной безопасности» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, *с замечаниями:* из автореферата следует, что при решении задачи переноса в двумерной геометрии привлекались значения констант скоростей электронного удара, но не ясно, каким образом определялись их скалярные поля; в автореферате приводятся весьма точные оценки долей вкладов различных реакций в процессы (50 %, 33 %, 13 %, 99 % и т.п.), но не ясно, за счет чего получена такая точность оценок. 8. **А. Г. Козлов**, д-р техн. наук, декан Радиотехнического факультета Омского государственного технического университета, *с замечаниями:* в автореферате в пункте 1 научной новизны предлагается характеризовать влияние монодисперсных пылевых частиц на энергетическое распределение электронов параметром, равным an_d , а в пункте 1

положений, выносимых на защиту, в задаче определения функции распределения по энергии в слабоионизованной запыленной плазме объемное пылесодержание характеризуется параметром $a^2 n_d$ – непонятно, это ошибка оформления или два разных параметра; при моделировании диффузионного переноса нейтральных частиц аргон-силановой плазмы в реакторе с радиусом 6 см и длиной 3 см поток газа считался ламинарным, чем обосновано это утверждение?

9. **В. П. Кривобоков**, д-р физ.-мат. наук, проф., руководитель научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: при расчётах электронной кинетики не дано объяснений по выбору значений концентрации пылевых частиц n_d и их радиуса a ; не объяснено поведение коэффициентов диффузии и подвижности электронов при повышении приведённого поля (рис. 7, 6, с. 12); при моделировании процесса разложения моносилана в высокочастотной плазме исследуемый интервал времени ограничивался 0,1 сек., такой диапазон не позволил определить установившиеся концентрации ряда газовых компонент (Si_2H_6 , Si_2H_5 , Si_2H_4) в аргон-силановой плазме (рис. 10, 6). 10. **А. В. Татарин**ов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, *без замечаний*.

В отзывах отмечается, что актуальность диссертационной работы А. А. Ляхова связана с задачей оптимизации плазмохимического способа осаждения пленок a-Si:H и $\mu\text{c-Si}$, решение которой, в свою очередь, предполагает установление взаимосвязи между свойствами получаемых покрытий и характеристиками газоразрядной силановой плазмы, которая используется в качестве рабочей среды. Большую роль при разработке и оптимизации плазмохимических процессов играют методы моделирования, существенно дополняющие экспериментальные методы диагностики. Для химически активной плазмы модельный подход особенно актуален, так как позволяет определить многие важные характеристики, трудно поддающиеся измерению. А. А. Ляховым в виде отдельной подзадачи проведено исследование кинетики электронов

в плазме инертных газов и аргон-силановой смеси с учетом наличия пылевых частиц, в рамках решения которой определено влияние пылесодержания на процессы формирования функции распределения электронов по энергиям и транспортные характеристики электронов в широком диапазоне изменений приведенной напряженности электрического поля (E/N); установлено, что коэффициенты переноса электронов в аргонной плазме при добавлении пыли увеличиваются в области малых значений приведенного поля; разработана двумерная модель переноса активных частиц плазмы, учитывающая многообразные химические реакции в рассматриваемой плазме, и на ее основе выполнены расчеты состава аргон-силановой плазмы пониженного давления; определены времена выхода на стационарные значения концентраций для основных продуктов разложения моносилана и проанализирована кинетика наиболее важных химических реакций в разрядном объеме. В контексте решения проблемы получения кремниевых пленок проведенное автором исследование может быть использовано для поиска оптимальных режимов работы установок по плазмохимическому осаждению пленок аморфного кремния.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **Б. А. Тимеркаев** – известный специалист в области изучения тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа, газовых разрядов с утопленным в жидкость электродами, плазмохимического разложения углеводородов, получения кремниевых и углеродных наноструктур плазмохимическими методами, процессов самоорганизации в газовом разряде; **Д. А. Ижойкин** – известный специалист в области плазменных технологий и оптических методов диагностики низкотемпературной плазмы, в том числе исследования процессов в плазме с мелкодисперсной конденсированной фазой; **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН** – один из ведущих научных центров по теории теплообмена и физической гидрогазодинамики, в котором, в частности, исследуются проблемы переноса в смесях газов с внутренними степенями свободы, электроразрядного воздействия на потоки газа, проводятся комплексные исследования по физике и химии низкотемпературной плазмы, включая среды

с конденсированной дисперсной фазой, развиваются масс-спектрометрические, оптические и зондовые методики исследования динамики и химической кинетики нестационарной плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны программа расчета функции распределения электронов по энергии и электронных кинетических коэффициентов для слабоионизованной плазмы, содержащей монодисперсные пылевые частицы; программа моделирования процессов диффузионного переноса нейтральных компонентов химически-активной аргон-силановой плазмы пониженного давления с учетом неравновесности электронного газа, которая ориентирована на получение информации о количественном составе компонентов плазмы, о потоках частиц на подложку, а также на установление механизмов плазмохимического процесса разложения моносилана и сопутствующих химических процессов;

показано, что при интерпретации результатов решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в слабоионизованной плазме, содержащей монодисперсные частицы конденсированной дисперсной фазы, их влияние на функцию распределения электронов по энергии и кинетические коэффициенты может характеризоваться одним размерным параметром подобия $\xi_d = a^2 n_d$, который определяется радиусом частиц пыли a и концентрацией частиц n_d ;

установлено, что влияние пылевых частиц на кинетику электронов в газоразрядной плазме в наибольшей степени проявляется в области малых значений приведенного поля, при этом сильнее всего деформируется низкоэнергетическая часть спектра энергии электронов;

определены зависимости электронных коэффициентов диффузии, подвижности, скорости дрейфа, а также констант скоростей электронного удара в диапазоне значений приведенного поля $E/N = 5 \cdot 10^{-18} - 5 \cdot 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ для плазмы аргона, гелия, а также смеси $\text{Ar} + 5\% \text{SiH}_4$, содержащих частицы пыли субмикронного размера, при параметрах $\xi_d = 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$;

установлено, что в плазме аргона учет пылевых частиц в кинетическом расчете приводит к существенному увеличению коэффициентов диффузии и подвижности электронов при $\xi_d > 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне поля $E/N = 5 \cdot 10^{-18} - 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ при одновременном снижении средней температуры электронов в этом диапазоне, дано объяснение этому эффекту исходя из структуры транспортного сечения рассеяния электронов на атомах аргона, в котором имеется область минимума Рамзауэра;

показано, что в плазме $\text{Ar} + 5\% \text{SiH}_4$ при давлении газа $p = 0,1 \text{ мм. рт. ст.}$ и частоте внешнего электрического поля $f = 13,56 \text{ МГц}$ влияние пылевых частиц на спектр электронов начинает сказываться при большем по сравнению с плазмой 100 % Ar пылесодержании – $\xi_d > 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, при этом значения всех кинетических коэффициентов снижаются по сравнению с чистой плазмой;

определены для плазмохимического цилиндрического реактора с радиусом $R = 6 \text{ см}$ и длиной $L = 3 \text{ см}$, работающем при режиме, соответствующем осаждению пленок аморфного кремния ($p = 0,1 \text{ мм. рт. ст.}$, $T = 500 \text{ К}$), зависимости относительных концентраций основных продуктов разложения моносилана от времени, их потоки на торцевую поверхность камеры (подложку) и время выхода на стационарные значения, которые составляют 10^{-3} сек. для радикалов SiH , SiH_2 , а также молекулярного водорода и 10^{-2} сек. для радикала SiH_3 и атомарного водорода;

показано, что механизм плазмохимического разложения SiH_4 при указанном выше режиме работы изменяется с течением времени – на стадии до 10^{-3} сек. деструкция молекул определяется электронным ударом и столкновениями с метастабильными частицами аргона, при $t > 10^{-3} \text{ сек.}$ существенный вклад начинает вносить реакция взаимодействия с атомарным водородом;

установлено на основе вычислительных экспериментов, что на временах $t < 10^{-2} \text{ сек.}$ вклад высших силанов Si_xH_y ($x > 2$) в кинетику пленкообразующих радикалов и водорода незначителен для рассматриваемого режима осаждения;

определены относительные вклады химических реакций образования и гибели следующих компонентов аргон-силановой плазмы: SiH_4 , SiH_x ($x > 1-3$), H , H_2 , Si_2H_5 и метастабильных частиц аргона на интервале времени $t < 0,1 \text{ сек.}$

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

полученные результаты в части исследования кинетики электронов в пылевой плазме дополняют представления о характере влияния частиц пыли на электронную подсистему плазмы газового разряда, зависимости кинетических коэффициентов электронов в широком диапазоне значений приведенного поля могут использоваться в качестве входных параметров при построении гидродинамических моделей газоразрядной плазмы, содержащей пылевые частицы.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

разработана программа моделирования процессов переноса многокомпонентного химически-активного газа, протекающих в плазмохимическом реакторе, позволяющая получать количественную информацию о компонентном составе реагирующего газа, а также определять наиболее важные реакции плазмохимического процесса разложения силана в высокочастотной плазме.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании кинетических процессов в слабоионизованной плазме молекулярных газов, при изучении процессов, протекающих в газоразрядных плазмохимических системах, а также могут быть применены для других плазменных сред с высокой химической активностью, проводимых в различных научных и учебных заведениях, таких как Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва), Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва), Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (г. Москва), Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), Санкт-Петербургский государственный

университет, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Омский государственный технический университет, Ивановский химико-технологический университет, Новосибирский государственный технический университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, а также в других организациях, занимающихся исследованием процессов в плазменных средах с электроразрядным способом активации и разработкой плазменных систем осаждения покрытий на их основе. Отдельные результаты могут использоваться при подготовке квалифицированных специалистов в области физики низкотемпературной плазмы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием экспериментально полученных сечений рассеяния электронов, экспериментально измеренных или теоретически верифицированных значений констант скоростей химических реакций, обоснованным выбором приближений в части описания взаимодействия электронов с пылевыми частицами, применением стандартных подпрограмм при реализации вычислительных алгоритмов; верификацией численных алгоритмов на задачах, допускающих аналитическое решение; в части описания кинетики электронов – сопоставлением и согласием полученных в работе результатов с результатами других авторов.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что впервые показана возможность использования размерного параметра подобия, характеризующего объемное пылесодержание в задаче определения спектра электронов из уравнения Больцмана, проведены расчеты кинетических коэффициентов электронов в пылевой плазме газовых составов – Ar, He, Ar+5%SiH₄ для широкого диапазона значений приведенного поля и установлено, что коэффициенты диффузии и подвижности электронов в аргоновой плазме при добавке пыли существенно увеличиваются в слабых электрических полях; с учетом влияния пылевых частиц на электронную подсистему выполнено

моделирование переноса нейтральных компонентов аргон-силановой плазмы и проанализирована их химическая кинетика.

Личный вклад соискателя заключается в: постановке совместно с научным руководителем всех задач исследования; получении всех результатов, выносимых на защиту; адаптации алгоритма решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в пылевой плазме; подготовке исходных данных, необходимых для кинетических расчетов; проведении анализа и физической интерпретации полученных результатов; формулировке выводов по результатам исследований; подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи исследования диффузионного переноса нейтральных компонентов аргон-силановой плазмы с учетом влияния частиц пыли субмикронного размера на электронную подсистему, имеющей значение для развития механики жидкости, газа и плазмы.

На заседании 27.12.2018 диссертационный совет принял решение присудить **Ляхову А. А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

27.12.2018



Христенко Юрий Федорович

Пикущак Елизавета Владимировна