

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.061.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
МАТЕМАТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 05.11.2019 № 14

О присуждении Кушнарченко Андрею Викторовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка модели и алгоритмов расчёта фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц и кластеров в разреженной газовой среде на основе метода Монте-Карло» **по специальности** 05.13.18 - «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» **принята к защите** 25 июня 2019 года (протокол заседания №11) диссертационным советом Д 003.061.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, приказом Минобрнауки России №105/нк-209 от 11.04.2012 г.

Соискатель Кушнарченко Андрей Викторович, 1978 года рождения, в 2000 году соискатель окончил Красноярский государственный педагогический университет. В 2002 году окончил обучение в аспирантуре в Красноярском

государственном техническом университете. В 2015 году восстановлен на оставшийся срок обучения в аспирантуре ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный Университет». **Работает** старшим преподавателем в научно-учебной лаборатории «Системы искусственного интеллекта» кафедры «Системы искусственного интеллекта» института космических и информационных технологий Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» в институте космических и информационных технологий на кафедре «Системы искусственного интеллекта» в научно-учебной лаборатории «Системы искусственного интеллекта», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, Черемисин Александр Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией дисперсных систем.

Официальные оппоненты:

Каргин Борис Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией стохастических задач;

Плотников Михаил Юрьевич — кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской

академии наук, старший научный сотрудник лаборатории разреженных газов, **дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), г. Томск, **в своем положительном отзыве**, подписанном Матвиенко Геннадием Григорьевичем, доктором физико-математических наук, заведующим отделением лазерного зондирования ИОА СО РАН и Харченко Ольгой Викторовной, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником отделения лазерного зондирования ИОА СО РАН, **указала, что** диссертационная работа А. В. Кушнарченко «Разработка модели и алгоритмов расчёта фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц и кластеров в разреженной газовой среде на основе метода Монте-Карло» является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме в области моделирования газокинетических явлений в аэрозольных системах. Положения, выносимые на защиту, сформулированы отчетливо. Полученные результаты и выводы обоснованы, являются новыми, имеют научное и прикладное значение и полностью отражены в публикациях автора. Автореферат диссертации соответствует её содержанию. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 — «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и отвечает формуле специальности по следующим пунктам областей исследования:

Пункт 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Пункт 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Пункт 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Работа удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Кушнарченко Андрей Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 3 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы. Работы представляют собой научные публикации (две работы опубликованы в изданиях, включённых в перечень ВАК, одна работа в Journal of Aerosol Science, индексируемом в системах Scopus и WoS), материалы и тезисы конференций общим объёмом 8,34 печ. л., в полном объёме отражают содержание диссертации.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах. В работах отражены все основные результаты научного исследования, а именно: вероятностная модель, описывающая фотофоретическое взаимодействие в разреженной газовой среде между поглощающими изучение аэрозольными частицами и кластерами, состоящими из сферических частиц; алгоритм решения задачи расчёта сил фотофоретического взаимодействия между аэрозольными частицами и частицами и кластерами на основе метода Монте-Карло и использования специальных матриц переноса; результаты проведения разностороннего вычислительного эксперимента. Наиболее значительные работы:

Черемисин, А. А. Оценка фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц в стратосфере / А. А. Черемисин, **А. В. Кушнарченко** // Оптика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 23, № 6. — С. 475—479.

Работа посвящена результатам расчёта фотофоретических сил взаимодействия двух частиц сферической формы в зависимости от их размеров и расстояния между ними. Выполнена постановка задачи и рассмотрена аэрозольная система из двух одинаковых аэрозольных частиц сферической формы в газе с температурой 195 К и давлением 9370 Па, что соответствует условиям стратосферы на высоте 17 километров. Подробно описана модель теплового баланса. Показано, что силы фотофоретического взаимодействия могут быть очень велики, на 1-2 порядка больше силы тяжести, действующей на частицы.

Личный вклад: программная реализация моделей и алгоритмов, проведение вычислительных экспериментов, обработка и анализ полученных результатов; подготовка графического материала статьи, подготовка текста статьи, оформление по требованиям журнала.

Черемисину А. А. принадлежат: постановка задачи; контроль графического материала, контроль и правка текста статьи.

Cheremisin, A. A. Photophoretic interaction of aerosol particles and its effect on coagulation in rarefied gas medium / A. A. Cheremisin, **A. V. Kushnarenko** // Journal of Aerosol Science. — 2013. — Vol. 62. — P. 26—39.

Работа посвящена результатам вычислительных экспериментов по разностороннему изучению фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц в вакуумных камерах и атмосфере Земли. В работе выполнена постановка задачи, описана вероятностная модель, описан алгоритм Монте-Карло вычисления матриц переноса, описана модель излучений. Приведены и обсуждены результаты исследований фотофоретических сил взаимодействия в зависимости от расстояния между частицами, их размера, интенсивности падающего на частицы видимого излучения, давления окружающего газа. Дана оценка влияния межмолекулярных столкновений на подавление

фотофоретического взаимодействия и на константу коагуляции. Продемонстрировано взаимодействие отдельных сферических частиц с большим кластером (380 сферических частиц). Продемонстрированы и обсуждены особенности фотофоретического взаимодействия в атмосфере Земли при ночных условиях.

Личный вклад: модификация, развитие моделей и программная реализация алгоритмов, проведение вычислительных экспериментов, обработка и анализ полученных результатов; подготовка графического материала статьи, подготовка текста статьи, оформление по требованиям журнала.

Черемисину А. А. принадлежат: постановка задач к вычислительным экспериментам; контроль и правка текста статьи, контроль перевода статьи, контроль графического материала, работа по учёту замечаний рецензентов.

Черемисин, А. А. Фотофоретическое взаимодействие аэрозольных частиц и его влияние на коагуляцию в атмосфере / А. А. Черемисин, А. В. Кушнарченко // Оптика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 27, № 12. — С. 1090—1098.

Эта работа, главным образом, посвящена изучению влияния фотофоретического взаимодействия на коагуляцию аэрозольных частиц в условиях атмосферы Земли. Проведено исследование сил фотофоретического взаимодействия между сферическими аэрозольными частицами в зависимости от высоты их положения в атмосфере и размера частиц в дневное и ночное время. Установлено, что в дневное время в атмосфере фотофоретическое взаимодействие способно оказать сильное влияние на коагуляцию хорошо поглощающих излучение субмикронных частиц.

Личный вклад: проведение вычислительных экспериментов, обработка и анализ полученных результатов; подготовка графического материала статьи, подготовка текста статьи, оформление по требованиям журнала.

Черемисину А. А. принадлежат: постановка задач к вычислительным экспериментам; контроль, правка текста статьи, контроль графического материала.

Все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично.

Соавторы согласны с авторским вкладом соискателя в совместных работах. Все программы для ЭВМ для расчёта фотофоретического взаимодействия разработаны **лично** Кушнарченко А. В.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

На автореферат поступило 2 отзыва.

Первый отзыв подписан д.ф.-м.н. Михалёвым А. В., ведущим научным сотрудником лаборатории физики нижней и средней атмосферы института солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск. В нём отмечается актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Отмечено, что диссертационная работа соответствует специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Отзыв положительный, не содержит критических замечаний.

Второй отзыв подписан к.х.н Тарабанько Н. В., старшим научным сотрудником лаборатории процессов синтеза и превращения углеводов Института химии и химической технологии СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. В нём отмечено, что диссертационная работа Кушнарченко А. В. является целостной, законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а Кушнарченко А. В. заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Отзыв положительный и содержит следующие замечания:

1. Формулировки цели и выводов исследования подчёркивают кластеры сферических частиц в качестве одного из объектов расчётов, однако представленные в автореферате результаты соответствуют исключительно

одиноким сферическим частицам. Таким образом, один из заявленных результатов остаётся нераскрытым для читателя.

2. Согласно данным Рис. 2, такой результат расчётов, как существенное превосходство расклинивающей фотофоретической силы над гравитационной, реализуется при сравнительно небольших расстояниях между частицами. В этой ситуации область между аэрозольными частицами, а которой реализуется преобразование световой энергии в кинетическую энергию молекул газа и далее в энергию аэрозольных частиц, оказывается в тени самих взаимодействующих частиц. То есть, эта область оказывается обеднена световой энергией по сравнению с «внешними» сторонами частиц. Обсуждение результатов не касается возможности ослабления фотофоретического отталкивания (или же возникновения притяжения) из-за описанного эффекта.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается сферой их научных интересов и результатами деятельности в области математического моделирования явлений переноса методом Монте-Карло, численного моделирования различных течений разреженного газа, оптимизации алгоритмов метода Монте-Карло, исследований в области численных методов в теории переноса, исследований в области атмосферного аэрозоля, что подтверждается научными публикациями официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации, содержащимися в сведениях об оппонентах и ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:
разработана стохастическая математическая модель, описывающая фотофоретическое взаимодействие в разреженной газовой среде между поглощающими излучение аэрозольными частицами и кластерами, состоящими из сферических частиц, также алгоритм метода Монте-Карло и соответствующий комплекс проблемно-ориентированных программ для расчета сил фотофоретического взаимодействия между аэрозольными кластерами с использованием специальных матриц переноса, **предложена** оригинальная

гипотеза о наличии газокинетического взаимодействия отталкивания – фотофоретического взаимодействия между хорошо поглощающими видимое излучение аэрозольными частицами, **доказана** перспективность использования идеи алгоритмов и специальных матриц переноса, предложенных А. А. Черемисиным, в исследованиях газокинетических эффектов и их влияния на аэрозольные частицы, **введено** новое понятие фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана на основании численных экспериментов возможность возникновения фотофоретического взаимодействия между хорошо поглощающими видимое излучение аэрозольными частицами в свободномолекулярном режиме, вносящее вклад в расширение представлений о газокинетических явлениях в аэрозольных системах, **применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** классические и современные достижения вычислительной математики, математического моделирования задач тепломассопереноса в разреженных газовых средах; **изложены** результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующих характер зависимости силы фотофоретического взаимодействия, хорошо поглощающих свет сферических аэрозольных частиц и кластеров сферических частиц от расстояния между участниками взаимодействия, их размера, термобарических параметров газовой среды, интенсивности падающего видимого излучения, условий освещения, а также влияние фотофоретического взаимодействия на коагуляцию одинаковых сферических аэрозольных частиц; **раскрыто** существенное проявление теории фотофоретических явлений в аэродисперсных системах, а именно выявлен новый газокинетический эффект фотофоретического взаимодействия с общей чертой, объединяющей его с другими фотофоретическими явлениями: под влиянием света нарушается равномерность аккомодации молекулярной энергии и импульса по поверхности

частицы в целом, а в данном случае эта неравномерность возникает из-за влияния других частиц, находящихся в газовой среде; **изучена** связь между поглощением аэрозольными частицами света и их коагуляцией, заключающаяся в том, что при освещении среднedisперсных и грубодисперсных аэрозольных частиц в разреженной газовой среде, хорошо поглощающих видимое излучение, возникает газокинетическое явление фотофоретического взаимодействия отталкивания достаточное для того, чтобы препятствовать их сближению, а значит понизить константу их коагуляции; **проведена модернизация** исходного алгоритма статистического моделирования, предложенного А. А. Черемисиным, путём дополнения в расчётной схеме, позволяющего производить оценку влияния взаимного столкновения молекул, на силу фотофоретического взаимодействия.

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

разработаны и внедрены (указать степень внедрения) вычислительные алгоритмы и их программная реализация в комплексе проблемно-ориентированных программ для численного моделирования методом Монте-Карло и оценке фотофоретического взаимодействия сферических аэрозольных частиц и кластеров, состоящими из сферических частиц, **определены** перспективы практического использования разработанных алгоритмов для исследований газокинетических явлений в аэрозольных системах, **создана** перспективная вычислительная технология на основе метода Монте-Карло и применении матриц переноса, которая может быть использована для решения широкого класса задач в исследовании газокинетических явлений в аэрозольных системах, **представлены** результаты оценки влияния фотофоретического отталкивания на константу коагуляции сферических аэрозольных частиц для лабораторных условий в зависимости от размера частиц и интенсивности падающего на них видимого излучения; для атмосферных условий в зависимости от размера и высоты в атмосфере Земли.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ показано, что реализованные алгоритмы, методы и подходы воспроизводят качественно и количественно результаты аналитических расчётов фотофоретической силы, выполненных для известных моделей аэрозольных частиц и опубликованных в рецензируемой научной литературе, выбор численных параметров модели обоснован со ссылками на работы других авторов по смежным тематикам, **теория** построена на известных подходах, последовательном применении методов математического и статистического моделирования, теории переноса в приближении свободномолекулярного режима, современных методов разработки программ на основе объектно-ориентированного и процедурного программирования и подтверждается результатами тестовых расчётов в сопоставлении с аналитическими оценками, **идея базируется** на применении методики, алгоритма статистического моделирования и специальных матриц переноса, предложенных ранее Черемисиным А. А. для решения задачи тепломассопереноса и расчёта фотофоретической силы, действующей на аэрозольный кластер в разреженной газовой среде, **использовано** сравнение авторских расчётов и аналитических расчётов, полученных ранее по рассматриваемой тематике, представленных в открытой печати:

- Rohatschek, H. Semi empirical model of photophoretic forces for the entire range of pressures / H. Rohatschek // Journal of Aerosol Science. — 1995. — V. 26, №. 5. — P. 717—734.
- Rohatschek, H. Levitation of stratospheric and mesospheric aerosols by gravitophoresis / H. Rohatschek // Journal of Aerosol Science. — 1996. — V. 27, №. 3. — P. 467—475.

Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным,

использованы современные методы разработки программ, многочисленные литературные источники, посвящённые явлению фотофореза аэрозольных частиц, подходам её вычисления.

Личный вклад соискателя состоит в:

- создании *математической вероятностной модели* фотофоретического взаимодействия хорошо поглощающих видимое излучение сферических аэрозольных частиц и кластеров сферических частиц в свободномолекулярном приближении;
- модернизации исходного алгоритма статистического моделирования, предложенного А. А. Черемисиным, путём добавления в схему моделирования учёта межмолекулярных столкновений;
- разработке лично автором представленных моделей и алгоритмов в виде *комплекса проблемно-ориентированных программ*;
- личном получении соискателем исходных данных и проведении *научных* вычислительных экспериментов;
- личном участии в *апробации результатов* исследования, участии автора в *обработке и интерпретация экспериментальных данных*;
- в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

На заседании 05.11.2019 диссертационный совет

1. принял решение, что диссертация Кушнарченко Андрея Викторовича «Разработка модели и алгоритмов расчёта фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц и кластеров в разреженной газовой среде на основе метода Монте-Карло» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи моделирования фотофоретического взаимодействия аэрозольных частиц и оценки его влияния на их коагуляцию, имеющей значение для развития отрасли знаний математика и вычислительные науки

2. принял решение присудить Кушнаренко Андрею Викторовичу учёную степень кандидата физико-математических наук

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 13 докторов наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного
совета Д 003.061.02 доктор физико-
математических наук, член-
корреспондент РАН, профессор

Кабанихин С. И.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 003.061.02 доктор физико-
математических наук, доцент



Сорокин С. Б.

05.11.2019