



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
Академик РАН Маркович Д.М.

Д.М. Маркович
«11» сентября 2020г.

Заключение

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Исследование анизотропии плазмы вокруг пылевых частиц сферической и несферической формы» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Сальников Михаил Владимирович работал в лаборатории синтеза новых материалов ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2016 году Сальников Михаил Владимирович окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) по направлению «Физика» по специальности «Физика кинетических явлений».

В 2020 году Сальников Михаил Владимирович окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы, сдав на отлично государственный экзамен и представив научный доклад по материалам кандидатской диссертации. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2019 г. Институтом теплофизики СО РАН.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Геннадий Иванович Сухинин работает в должности главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы.

Исследование плазмы является одним из наиболее важных научных направлений. В связи с ростом потребности в производстве сверхточной электроники, ускорителей, генераторов, а также в связи с исследованием возможностей по получению и применению термоядерной энергии значение исследований по этому направлению лишь растёт. Однако во всех

вышеперечисленных промышленных процессах используемая плазма часто засоряется микронными частицами, которые, заряжаясь под действием окружающей плазмы, наносят ущерб промышленным процессам, что может загубить сам результат производства и привести к браку.

Изучению эффектов, связанных с попаданием в чистую плазму «мусорных» частиц микронного размера посвящено отдельное ответвление физики плазмы, именуемое пылевой плазмой. Пылевые частицы изучают как экспериментально, в разрядах постоянного и переменного тока, в лабораторных условиях и в условиях микрогравитации, так и численными методами. Экспериментальные исследования, касающиеся пылевой плазмы невероятно разнообразны. В число этих экспериментов входят: изучение зарядки изолированной пылевой частицы, изучения образования пылевых цепочек и кристаллов, наблюдения за поведением пылевых частиц в разрядах постоянного и переменного тока. Все эти эксперименты проводились для различных температур и давлений разрядов, в земных условиях и условиях микрогравитации.

Однако данные, которые можно получить с помощью экспериментов ограничиваются получением в задаче макропараметров: пространственного распределения пылевых частиц, зарядов, индуцированных на пылевых частицах, а также общих течений плазмы. Несмотря на всё разнообразие экспериментов, экспериментальное изучение макропараметров задачи не дало ответ на вопрос, почему в пылевой плазме происходит самоорганизация пылевых частиц. Исследования показали, что ответ лежит в плоскости изучения влияния, которое пылевая частица оказывает на плазму вокруг себя. Однако исследование такого влияния становится возможным лишь при использовании численных методов.

Традиционными методами для численного исследования пылевых частиц и их влияния на окружающую плазму являются методы «Линейного отклика» (LR-Linear Response) и «PIC» (Particle-In-Cell), однако зачастую вычисления данными методами имеют существенные погрешности и неточности.

Целью настоящей работы является построение численной модели, которая позволит определить самосогласованное распределение объёмного заряда и потенциала плазмы вблизи пылевой частицы различной геометрии в присутствии постоянного внешнего электростатического поля для различных параметров пылевой плазмы.

Поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Создать численную модель, которая самосогласованным образом рассчитывает двумерные распределения объёмного заряда вокруг пылевых частиц разной геометрии.
2. Изучить процесс формирования вейка за пылевой частицей под влиянием внешнего электростатического поля.
3. Изучить зависимость двумерных распределений от параметров плазмы.

Научная новизна

1. Создана новая численная модель, которая итерационно вычисляет самосогласованные пространственные распределения потенциала и плотности объёмного заряда плазмы около пылевых частиц микронного размера различной

формы, а также около цепочек сферических частиц пыли, которые находятся во внешнем электростатическом поле.

2. Впервые, с помощью итерационного вычисления получены общие аппроксимации зависимостей дипольного момента ионного облака и характеристик вейка от напряжённости внешнего электростатического поля.

3. Впервые продемонстрировано, что полученная в результате итерационных вычислений зависимость заряда пылевой частицы эллипсоидальной и дискообразной формы от длины свободного пробега ионов повторяет зависимость, рассчитанную для сферической частицы, когда средняя длина свободного пробега больше ионной длины Дебая.

4. Впервые, с помощью численного моделирования, показано, что, параметры вейка, формирующегося вниз по потоку от пылевой частицы, не зависят от формы частицы пыли, а определяются её электрической ёмкостью, когда её форма представляет собой эллипсоид вращения.

5. Впервые, с помощью численного моделирования показано, что дипольный момент ионного облака, сформированного вокруг пылевой частицы цепочки, уменьшается с увеличением напряжённости внешнего электростатического поля. Это приводит к тому, что пространственное распределение потенциала вблизи частиц пыли стремится к симметричному виду с ростом напряжённости внешнего электростатического поля.

Достоверность

Представленная численная модель основана на использовании общепринятого аппарата вычислительной математики. Были проведены множественные методологические исследования, в которые входили: изменение параметров вычислительной области, изменение размера вычислительной сетки, изменение размеров куба, в котором происходило моделирование, изменение временного шага при моделировании уравнений Ньютона и т.д. В результате было показано, что размеры области расчёта не оказывают влияние на результат.

Созданной моделью получены решения типовых задач: определён потенциал среды вблизи проводящей фигуры разной геометрии в вакууме и низкотемпературной плазме. Было проведено сравнение полученных зависимостей средней дрейфовой скорости потока ионов от приведенного поля и параметров вейка от скорости потока плазмы с общепризнанными результатами экспериментальных исследований.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты о возникновении вейков за пылевой частицей позволяют учесть диполь-дипольное взаимодействие между облаками ионов, возникающими вокруг частиц пыли микронного размера, которые левитируют в слабоионизованной среде. Показанные результаты позволят точно описать процесс возникновения пылевых кристаллов в пылевой плазме. Полученные данные об основных характеристиках вейка и их зависимости от параметров пылевой плазмы позволят точно учесть влияние, которые пылевые частицы оказывают друг на друга. Разработанная модель послужит фундаментом для трёхмерной модели, которая опишет взаимодействия частиц пыли в пылевых кристаллах.

Результаты, полученные в процессе выполнения этой диссертации, представляют интерес для оптимизации работы фильтровальных установок промышленной очистки воздуха, создания установок плазменного напыления, разработки плазменных генераторов, а также для создания лекарственных препаратов с адресной доставкой в органы дыхательной системы и т.д.

Личный вклад автора

Результаты, включённые в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены лично соискателем. Автором создана представленная в диссертации итерационная численная модель. Автором проведён анализ и интерпретация полученных данных, сформулированы заключения, послужившие основой выводов диссертации. На основе полученных результатов, автором данной работы подготавливались выступления на конференциях и публикации в рейтинговых журналах.

Материалы диссертации изложены в следующих **публикациях автора**:

1. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Polarization of a Dust Particle and Surrounded Plasma in an External Electric Field // Contrib. Plasma Phys. - 2016. – Vol. 56. - №. 5. – P. 397–402.
2. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Rostom A., Vasiliev M. M., and Petrov O. F., Plasma anisotropy around a dust particle placed in an external electric field // Physical Review E. – 2017. – V. 95. – P. 063207.
3. Sukhinin G. I., Salnikov M. V., Fedoseev A. V., The effect of the type of ion-neutral collisions on ion cloud formation // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1925. – P. 020029.
4. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Rostom A., Plasma polarization and wake formation behind a dust particle in an external electric field // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – V. 46. - №. 4. – P. 749-754.
5. Сухинин Г.И., Сальников М.В., Федосеев А.В. Вейки в пылевой плазме. Сравнение численных методов // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59. - № 5 (351). – С. 59-69.
6. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Effect of ion mean free path length on plasma polarization behind a dust particle in an external electric field // Contributions to Plasma Physics. – 2019. – V. 59. - № 4-5. – P. e201800152.
7. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Salnikov M. V., The influence of dust particle geometry on its charge and plasma potential // Contributions to Plasma Physics. – 2019. – V. 59. - № 4-5. – P. e201800153.
8. Salnikov M. V., Fedoseev A. V., Sukhinin G. I., Plasma potential distribution around an infinite one-dimensional chain of dust particles // Journal of Physics Conference Series – 2019. – V.1393. - № 1. - P. 012022.
9. Salnikov M. V., Fedoseev A. V., Sukhinin G. I., Plasma potential around a single-dimensional dust particle chain placed in an external electric field // Journal of Physics Conference Series – 2019. – V. 1382. - № 1. - C. 012169.

Апробация работы

17th International Congress on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, September 15-19, 2014; 15th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas. Almaty, August 30 – September 4, 2015; 9-ой международной научной конференции «современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». 12-14 Октября 2016. Алматы. Казахский национальный Университет им. Аль Фараби, Казахстан; РК-4 Symposium November 2016. German Aerospace Center (DLR) Oberpfaffenhofen; 8th International Conference on the Physics of Dusty Plasma. May 20-25, 2017, Prague, Czech Republic; Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар» Новосибирск, 27-30 августа 2018 г.; 16th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas/ September 24-28, 2018. Saint-Malo, France; 24th International Symposium on Plasma Chemistry. Naples (Italy). June 9-14 2019.

Решение о рекомендации к защите

Диссертация «Исследование анизотропии плазмы вокруг пылевых частиц сферической и несферической формы» Сальникова Михаила Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании Секции Ученого Совета «Разреженный газ, плазма, космос и нанотехнологии» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством д.ф.-м.н. Сергея Андреевича Новопашина.

Присутствовало на заседании 14 человек. Результаты голосования: «за» - 14 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №1-2020 от «11» сентября 2020 г.



Председатель семинара
Новопашин Сергей Андреевич
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
разреженных газов ИТ СО РАН



Секретарь семинара
Чиннов Евгений Анатольевич
д.ф.-м.н., гл.н.с. Лаборатория
интенсификации процессов
теплообмена ИТ СО РАН

Подписи

иссл. со

*Новопашин С.А.,
Чиннов Е.А.*

Зав. верою

