

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.110.02(24.1.193.01), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.09.2021г. № 11

О присуждении Зобнину Андрею Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда» по специальности 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы принята к защите 11.05.2021г., (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Зобнин Андрей Вячеславович 1965 года рождения, в 1989 году окончил Московский физико-технический институт.

В 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук на тему «Влияние пристеночной области на содержание СО в релаксирующем потоке продуктов сгорания» по специальности 01.04.08 — физика и химия плазмы.

Работает в должности старшего научного сотрудника, лаборатория №17.1 – плазменно-пылевых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории №17.1 – плазменно-пылевых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, начальник лаборатории в Государственном научном центре Российской Федерации «Троицком институте инновационных и термоядерных исследований» профессор Глова Александр Фёдорович;

- доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики-1 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского государственного университета» Карасёв Виктор Юрьевич;

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» Сухинин Геннадий Иванович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником теоретического отдела д.ф.-м.н. Майоровым С. А. (утвержденном 14.06.2021г. заместителем директора по научной работе к.ф.-м.н. Кочиевым Д. Г.), указала, что научная значимость работы определяется теоретическими и экспериментальными результатами исследования эволюции плазменно-пылевых систем и их свойств. Развитие методов диагностики динамических характеристик макрочастиц в плазменно-пылевых системах имеет большое прикладное значение.

Результаты, представленные в работе могут найти применение в исследованиях специалистов, занимающихся изучением пылевой плазмы, её

свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, в Московском энергетическом институте, в Санкт-Петербургском государственном университете, в Московском физико-техническом институте, в Институте химической физики РАН, в Московском инженерно-физическом институте, в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, в Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Соискатель имеет 56 опубликованных работ, из них по теме диссертации 19 работ в реферируемых журналах, 2 работы в сборниках трудов ОИВТ РАН, 6 тезисов в сборниках конференций.

1. *V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. A. Sinel'shchikov, A. V. Zobnin, A. D. Usachev*, Inductively-Coupled Dusty Plasma // *Journal de Physique IV, France*, 10, Pr5-399-Pr5-402 (2000);
2. *A. V. Zobnin, A. P. Nefedov, V. A. Sinelshikov, V. S. Filinov*, Macroparticles ordered structures in induced discharge of low pressure // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, Т. 64, N 8. – с.1539-1544 (2000);
3. *А. В. Зобнин, А. П. Нефедов, В. А. Синельщиков, В. Е. Фортов*, О заряде пылевых частиц в газоразрядной плазме низкого давления // *ЖЭТФ* 118 №3 с.554-559 (2000);
4. *А. В. Зобнин, А. П. Нефедов, В. А. Синельщиков, О. А. Синкевич, А. Д. Усачёв, В. С. Филинов, В. Е. Фортов*, Упорядоченные структуры пылевых частиц в плазме высокочастотного безэлектродного газового разряда // *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, том 26, №5, с. 445-454 (2000);
5. *V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. A. Sinel'shchikov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin*, Filamentary Dusty Structures in RF Inductive Discharge // *Physics Letters A*, V.267, P. 179-183 (2000);
6. *А. В. Зобнин, А. Д. Усачёв, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов*, Пыле-акустическая неустойчивость в плазме индукционного газового разряда // *ЖЭТФ*, Т.122, N.3, с. 500-512 (2002);
7. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, V. E. Fortov*, Spatial Separation of Dust Particles by their Sizes at the Diffuse Edge of RF Inductive Discharge Plasma // *AIP Conference Proceedings* 649. P. 293-296;

8. *V. E. Fortov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin, V. I. Molotkov, and O. F. Petrov, Dust-acoustic wave instability at the diffuse edge of radio frequency inductive low-pressure gas discharge plasma // Physics of Plasmas V.10. No5. P. 1199-1208 (2003);*
9. *V. E. Fortov, O. F. Petrov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin, Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains// Physical Review E 70, 046415 (2004);*
10. *S. Ratynskaia, S. Khrapak, A. Zobnin, M. H. Thoma, M. Kretschmer, A. Usachev, V. Yaroshenko, R. A. Quinn, G. E. Morfill, O. Petrov, V. Fortov, Experimental Determination of Dust-Particle Charge in a Discharge Plasma at Elevated Pressures // Physical Review Letters 93, 085001 (2004);*
11. *S. A. Khrapak, S. V. Ratynskaia, A. V. Zobnin, A. D. Usachev, V. V. Yaroshenko, M. H. Thoma, H. Höfner, G. Morfill, O. F. Petrov, V. E. Fortov, Particle charge in the bulk of gas discharges // Physical Review E 72, 016406 (2005);*
12. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov, Ion current on a small spherical attractive probe in a weakly ionized plasma with ion-neutral collisions (kinetic approach) // Physics of Plasmas 15, 043705 (2008);*
13. *А. В. Зобнин, Нелокальная модель пространственно-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока// Теплофизика Высоких Температур, Т. 47, № 6, с. 803-810 (2009);*
14. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov, M. A. Bukharin, Simulations of the DC-discharge Plasma with Dusty Structure // Sixth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Partenkirchen, Germany May 16-20 2011) AIP Conference Proceedings 1397, P. 150-151 (2011);*
15. *S. A. Khrapak, M. H. Thoma, M. Chaudhuri, G. E. Morfill, A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F., Petrov, E. E. Fortov, Particle flows in a dc discharge in laboratory and microgravity conditions // Physical Review E 87, 063109 (2013);*
16. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, Two-dimensional positive column structure in a discharge tube with radius discontinuity // Physics of Plasmas 22, 094701 (2015);*
17. *A. Usachev, A. Zobnin, O. Petrov, V. Fortov, M. Thoma, M. Pustyl'nik, M. Fink, G. Morfill, Elongated dust clouds in uniform DC positive column of low pressure gas discharge // Plasma Sources Science and Technology 25 035009 (2016);*
18. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov, M. H. Thoma, M. A. Fink, Two-dimensional positive column structure with dust cloud: Experiment*

and nonlocal kinetic simulation // *Physics of Plasmas* 25, 033702 (2018);

19. A. V. Zobnin, A. D. Usachev, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov M. Y. Pustyl'nik, M. A. Thoma, H. M. Thomas, Charges of a single grain and the grain in a cloud: Theory and experiments // *Journal of Physics: Conference Series* 1556, 012078 (2020);

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (г. Москва ул. Профсоюзная 84/32) д.ф.-м.н., профессор Попель С. И. Отзыв положительный, без замечаний.

2. Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, (Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби 71) проректор по научно - инновационной деятельности д.ф.-м.н., профессор, академик НАН РК Рамазанов Т. С. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Пылевая структура, представленная на рисунке 3 слева, выглядит более упорядоченной, чем структура на рисунке 2 (в). С чем это связано? Действительно ли пылевые структуры из полидисперстных частиц имеют большую степень упорядоченности, чем образованные монодисперсными частицами?

2. На рисунке 8 не указаны погрешности измерений, что не позволяет судить каков вклад в разброс точек от эффекта проецирования на плоскость и от погрешности измерений смещений частиц.

3. В формуле на странице 18 фигурируют переменные помеченные тильдой, но не дано их определения, если это безразмерные параметры, то неясно на что они нормированы.

4. На рисунке 18 (страница 26) линии, соответствующие результатам расчётов, очень тонкие и трудно различимы.

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1) в.н.с., д.ф.-м.н. Швейгерт И. В. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. В выводах по первой главе говорится об упорядоченных структурах, но ни где не дано анализа степени упорядоченности, не ясно наблюдались ли плазменно-пылевые кристаллы, или структуры жидкостного типа.

2. В численных расчётах, представленных во второй главе, эффект отражения электронов от поверхности частиц не учитывался, тем не менее говорится о хорошем согласии с экспериментальными измерениями зарядов частиц, а в пятой главе утверждается, что отражение электронов достигает 50%. Как это согласуется?

4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Института нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (г. Москва, Ленинский проспект 29) г.н.с., д.ф.-м.н. Лебедев Ю. А. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Зондовые измерения параметров плазмы проводились в отсутствие пылевых частиц в чистом инертном газе, но экспериментально наблюдалось плазменное травление пластиковых микросфер. Как влияет поступление молекулярных примесей на параметры плазмы и заряды частиц?

2. Некоторые переменные, встречающиеся в формулах и таблицах, например «ню» с тильдой, S_{s5} , S_{s3} , k_{s5} , k_{s3} , не описаны в тексте автореферата.

5. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва, Ленинский пр-т 53 стр. 4) д.ф.-м.н., профессора Очкин В. Н. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. На некоторых рисунках, например 10, 17 и 18, линии очень тонкие и плохо отпечатаны.

2. Неясно, в какой мере предположение об изотропности плазмы вокруг пылевой частицы, использованное в расчётах по определению её заряда, может применяться в плазме тлеющего разряда, особенно стратифицированного, в котором в области левитации пылевых частиц имеет

место сильное нарушение квазинейтральности плазмы и присутствуют сильные электрические поля, вызывающие сильный дрейф ионов.

б. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцина (г. Москва, Ленинские горы д. 1 стр. 2) д.ф.-м.н. Паль А. Ф. Отзыв положительный, с замечанием:

при использовании полидисперсных частиц окиси церия в гелии и неоне при давлениях 150 -300 Па наблюдалось формирование пылевых облаков не только у нижней, но и у верхней границы светящейся области разряда. К сожалению, автор оставил без обсуждения такое интересное и малоизученное явление.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Глова Александр Фёдорович является ведущим ученым в области физики лазеров, а также физики и химии плазмы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью и при оптическом пробое.

1. Glova A. F., Lysikov A. Yu., Nelyubin S. S., Klochkov I. D., Baldaev L. Kh., Novinkin Yu. A., Stogov M. A.; Controlled processes at laser coating deposition //Journal of Physics: Conference Series, Volume 1696, p. 012021 (2020);

2. Gvozdev S. V., Glova A. F., Dubrovskii V. Yu, Durmanov S. T., Krasnyukov A G. Lysikov A. Yu., Smirnov G. V., Pleshkov V. M.; Attenuation of laser radiation by the flame of burning hydrocarbons and efficiency of remote cutting of metals // Journal of Physics: Conference Series, Volume 941, p. 012033 (2018);

3. Glova A. F., Lysikov Yu. A., Malyuta D. D., Nelyubin S. S., Peretyatko P. I., Ryzhkov Y. F.; Effect of radiation refraction on characteristic of a CW optical discharge // Journal of Physics: Conference Series, Volume 747, p. 012011 (2016).

- д.ф.-м.н., Карасёв Виктор Юрьевич является признанным специалистом в области физики пылевой плазмы, известен исследованиями вращения плазменно-пылевых структур в магнитном поле и исследованиями модификации поверхности пластиковых частиц в плазме разряда постоянного тока.

1. Е. С. Дзलिएва, С. И. Павлов, Л. А. Новиков, И. Ч. Машек; Пылевая плазма в сильно неоднородном магнитном поле // Письма в журнал технической физики, т. 46, вып. 8, стр. 28 (2020);

2. Е. С. Дзलिएва, С. И. Павлов, Л. А. Новиков, И. Ч. Машек; Пороговый характер раскручивания объёмного пылевого кластера в магнитном поле // Журнал технической физики, т. 90, с. 202 (2020);

3. Siasko A. V., Golubovskii Yu. B., Karasev V. Yu.; About the photoemission of electrons from the surface of a spherical dust particle in gas discharge plasma // Plasma Sources Science and Technology 30, p. 065030 (2021);

- д.ф.-м.н. Сухинин Геннадий Иванович является крупным специалистом по физике газового разряда и комплексной плазме.

1. 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 59, p. 201800152 (2019);

2. Fedoseev A. V., Demin N. A., Salnikov M. V., Sukhinin, G. I.; Non-local electron kinetics around the cloud of dust particles // Contributions to Plasma Physics 59, p. 201800181 (2019);

3. Salnikov M. V., Sukhinin G. I.; Distribution of ion velocity near an isolated dust particle // Journal of Physics: Conference Series 1677, p. 012154 (2020).

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» является ведущей научной организацией, в которой проводятся исследования в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы и комплексной плазмы. Комплексная и неидеальная плазма является важными направлениями

исследований теоретического отдела.

1. Игнатов А. М.; Влияние невязимных сил на устойчивость пылевых кластеров // Физика плазмы Т. 47, №5, с. 391 (2021);
2. Игнатов А. М.; Устойчивость планарного плазменного кристалла // Физика плазмы Т. 46, №4, с. 358 (2020);
3. Скворцова Н. Н. , Майоров С. А. , Малахов Д. В. , Степахин В. Д. , Образцова Е. А. , Кенжебекова А. И. , Шишилов О. Н. ; О пылевых структурах и цепных реакциях, возникающих над реголитом при воздействии излучения гиротрона // Письма в ЖЭТФ Т. 109, №7, с. 452 (2019).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Найдены условия формирования плазменно-пылевых структур в высокочастотном разряде индукционного типа, показано, что трёхмерные структуры из частиц микронного размера образуются вблизи границы свечения разряда, или у стенки разрядной камеры;

– экспериментально исследована сепарация пылевых частиц по размерам, определена скорость плазменного распыления полимерных микросфер;

– обнаружено и исследовано развитие пыле-акустической неустойчивости в плазменно-пылевых структурах в высокочастотном разряде индукционного типа;

– на основе экспериментов и численных расчётов показано, что столкновения ионов с нейтральными атомами плазмообразующего газа оказывают сильное влияние на равновесные заряды пылевых частиц в квазиизотропной газоразрядной плазме даже когда длина свободного пробега ионов превышает радиус Дебая;

– рассчитаны воль-амперные характеристики ионного тока на малый притягивающий зонд в слабоионизованной изотропной плазме для различных

частот столкновений ионов с нейтралами и предложены аналитические аппроксимации полученных зависимостей;

– разработана численная модель продольно- и радиально-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов и пылевой компонентой;

– для тестирования модели проведены экспериментальные измерения интенсивностей свечения плазмы неона и концентраций метастабильных атомов в разряде постоянного тока в трубке со ступенчатым изменением радиуса;

– обнаружено, что протяжённая плазменно-пылевая структура вызывает значительное увеличение яркости свечения плазмы положительного столба разряда постоянного тока вследствие влияния пылевой компоненты на электрическое поле разряда;

– обнаружена стратификация первоначально однородного положительного столба под влиянием пылевого облака;

– показано, что для правильного описания ионизационно-рекомбинационного равновесия в плазменно-пылевой структуре необходимо учитывать отражение электронов от поверхности полимерных пылевых частиц.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– исследовано влияние столкновений ионов с нейтральными атомами на ионный ток на пылевую частицу малого размера и её равновесный заряд; это влияние оказалось неожиданно сильным в условиях, когда на первый взгляд допустимо использование бесстолкновительного приближения;

– разработана численная модель продольно- и радиально-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов и пылевой компонентой, которая позволяет описывать взаимодействие разряда с пылевым облаком самосогласованным образом.

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

– в работе применены оригинальные методы экспериментального определения зарядов пылевых частиц и пространственного распределения частиц по размерам;

– получены данные о влиянии пылевой структуры на распределение параметров плазмы в положительном столбе разряда постоянного тока, обнаружен эффект стратификации и усиления свечения разряда;

Результаты, представленные в работе могут найти применение в исследованиях специалистов, занимающихся изучением пылевой плазмы, её свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, в Московском энергетическом институте, в Санкт-Петербургском государственном университете, в Московском физико-техническом институте, в Институте химической физики РАН, в Московском инженерно-физическом институте, в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, в Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Оценка достоверности результатов исследований показывает, что достоверность полученных результатов подтверждается использованием различных методов измерения, сравнением экспериментальных данных с результатами численных моделей, а также подтверждением основных представленных в работе результатов исследованиями других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии постановке и проведении экспериментов, интерпретации их результатов, разработке численных моделей и проведении расчётов.

Апробация результатов исследования проводилась на международных конференциях «Уравнения состояния вещества» (Терскол 2000, Эльбрус 2014, 2018), конференциях «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» (Эльбрус 2003, 2009, 2011, 2013), всероссийских конференциях по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск 2001, 2004), на

международных конференциях «Пылевая плазма в приложениях» (Одесса, Украина 2007, 2010), Юбилейной конференции ОИВТ РАН (Москва, 2010), VII International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Partenkirchen, Germany 2011); и на различных сессиях, совещаниях и семинарах.

Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

На заседании от 15.09.2021г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, решение научной проблемы, имеющей важное политическое, социально-экономическое значение, новые научно-обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Зобнину Андрею Вячеславовичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 (1.3.9) — физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» (из них 9 - очно) и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (из них 7 - очно), участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

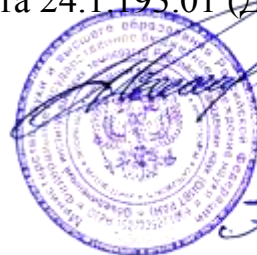
Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

 Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

15.09.2021г.