

УТВЕРЖДАЮ

Ректор НГУ

профессор, академик РАН

М.П. Федорук



05 октября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Диссертация Дубровина Кирилла Алексеевича «Влияние конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной разреженной струи аргона» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника выполнена в Отделе прикладной физики Физического факультета НГУ.

В 2019 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 (Физика) на кафедре физики неравновесных процессов. В период подготовки диссертационной работы с 01.09.2019 по 31.08.2023 г. проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). В лаборатории молекулярной кинетики отдела прикладной физики ФФ НГУ Дубровин Кирилл Алексеевич работал с 2017 по настоящее время: в должности лаборанта-исследователя (2017-2020), младшего научного сотрудника (2020-2023) и научного сотрудника (2023-н.в.).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Зарвин Александр Евгеньевич, заведующий Отдела прикладной физики Физического факультета Новосибирского государственного университета.

Доклад представлен на заседании междисциплинарного семинара Физического факультета НГУ 29 октября 2024 года. На семинаре присутствовало 18 человек, в том числе 1 академик РАН, 3 доктора наук, 6 кандидатов наук.

Слушали: доклад научного сотрудника Отдела прикладной физики Физического факультета НГУ Дубровина Кирилла Алексеевича по материалам диссертационной работы «Исследование влияния конденсации на динамику и молекулярную кинетику разреженного сверхзвукового газового потока», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Вопросы задавали:

- д.ф.-м.н. Коробейщиков Н.Г. (Какой смысл термина «экспериментальное моделирование»? Корректно ли ставить равенство между терминами «показатель адиабаты»

и «коэффициент Пуассона»? Имеются ли доказательства того, что в зоне смешения в отсутствие кластеров нет частиц? Почему вы считаете, что кластеры большого размера присутствуют в области висячих скачков традиционной струи? Почему в режимах с $Re_L = 22$ не наблюдается проникания и рассеяния частиц в верификационных измерениях? Как проводились измерения времён жизни частиц в возбужденном состоянии?);

- д.ф.-м.н., академик РАН Бондарь А.Е. (Что понимается под «аномальным свечением кластеров»? Каков механизм его образования? Чем различается спектр излучения кластеров и атомов? Насколько существенно в данном исследовании, что их спектр различается? Существуют ли альтернативные методы регистрации кластеров в разреженных потоках?);

- д.ф.-м.н. Миронов С.Г. (Как решалась проблема рассеяния пучка электронов на частицах газового потока?);

- к.ф.-м.н. Горев В.Н. (Влияет ли как-то электронный пучок на процесс конденсации в потоке? Можно ли как-то экспериментально подтвердить наличие или отсутствие этого влияния?).

По результатам обсуждения принято следующее решение:

1. Актуальность темы определяется широким кругом применений атомных и молекулярных кластеров в научных исследованиях и технологических задачах, а также ценностью материалов работы для развития теоретических и численных моделей.

2. Цель работы заключается в изучении влияния конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной кластированной струи аргона.

3. Поставлены и решены следующие задачи:

1. адаптировать и валидировать методы и средства диагностики на газодинамической установке ЛЭМПУС-2 для проведения исследования в кластированных сверхзвуковых разреженных потоках;

2. провести измерения геометрических характеристик сверхзвуковой недорасширенной струи аргона в условиях развитой конденсации. Провести сопоставление с известными данными и теоретическими моделями;

3. исследовать процесс взаимодействия кластированного потока с фоновым газом;

4. 4. провести исследования люминесценции атомов и кластеров во всей области течения сверхзвуковой недорасширенной струи аргона, возбужденной электронным пучком. Построить эмпирическую модель послесвечения.

4. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- предложена эмпирическая поправка, учитывающая процесс конденсации, к существующей модели, связывающей начальные параметры истечения с поперечным размером формируемой струи;

- экспериментально показано, что взаимодействие кластеров с фоновым газом приводит к фрагментации кластеров и подавлению проникания частиц фонового газа в центральную область истекающей струи;

- впервые зарегистрировано явление послесвечения вторичного течения за пределами сжатого слоя, инициированного кластерами, прошедшими висячий скачок, при возбуждении частиц высоковольтным пучком электронов;

- на основе анализа спектрального состава послесвечения установлена роль кластеров в наблюдаемом излучении в видимом диапазоне спектра.

Имеющиеся литературные данные не позволяют в полной мере корректно объяснить эффекты преодоления кластерами висячих скачков, особенности излучения кластеров в потоке, не предоставляют моделей передачи энергии внутри потока и с окружающим фоновым пространством, что обуславливает научную новизну и значимость проведенных исследований и полученных в работе результатов.

5. Теоретическая и практическая значимость работы. Представленные в работе результаты расширяют теоретические представления о сложных процессах, протекающих в сверхзвуковых струях, истекающих в разреженное пространство в условиях развитой конденсации, что может являться полезным для исследовательских институтов, занимающихся изучением Ван-дер-Ваальсовых кластеров и их физико-химических свойств (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого и др.). С практической точки зрения полученные в работе данные позволяют составить рекомендации по эксплуатации малогабаритных лабораторных установок для экспериментального моделирования истечения продуктов сгорания из сопел КА, ввести и табулировать поправки к применяемым диагностическим методам, что может оказаться ценным, например, для организаций космической промышленности (Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» и др.). Проведенное комплексное исследование позволяет сделать существенный шаг в изучении физических процессов с участием Ван-дер-Ваальсовых кластеров, что углубит и расширит области их прикладного применения.

6. Достоверность результатов обеспечивается использованием современных измерительных методик, проведением калибровочных работ, анализом погрешностей проведенных измерений, воспроизводимостью результатов и их сравнением с опубликованными данными других исследователей.

7. Основные положения, выносимые на защиту.

1. эмпирическая поправка, учитывающая процесс конденсации частиц, к известной зависимости, связывающей начальные параметры истечения и поперечный размер формируемой струи;
2. результаты экспериментальных исследований взаимодействия частиц кластированного потока с фоновым окружением (проникание и рассеяние);
3. результаты исследования обнаруженного послесвечения вторичного течения за пределами сжатого слоя, инициированного кластерами, прошедшими висячий скачок, при возбуждении частиц высоковольтным пучком электронов;
4. эмпирическая модель послесвечения кластированного потока, основанная на взаимодействии кластеров с фоновым газом.

8. Личный вклад автора состоял в постановке цели исследования, формулировке задач, разработке программы экспериментов, проведении измерений, обработке данных, анализе и

интерпретации результатов, а также подготовке докладов для конференций и написании статей для публикации в высокорейтинговых журналах. Основные научные результаты, включенные в диссертационную работу и выносимые на защиту, получены соискателем лично или при его прямом участии.

9. Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

1. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Художитков В.Э., Яскин А.С. Исследование структуры потока на малогабаритном газодинамическом комплексе: идентификация вторичного потока при истечении кластированной сверхзвуковой струи в разреженное пространство // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59. – №. 5. – С. 48-58.
2. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. Причины свечения аномального вторичного потока в сверхзвуковых кластированных струях, возбужденных высоковольтным электронным пучком // Письма в журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 7. – С. 32–35.
3. Zarvin A.E., Yaskin A.S., Dubrovin K.A., Kalyada V.V. Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants // Vacuum. – 2021. – V. 191. – P. 110409.
4. Zarvin A.E., Madirbaev V.Zh., Dubrovin K.A., Kalyada V.V. On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // Plasma Chem. Plasma Process. – 2022. – V. 42. – P. 247–265.
5. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. The influence of condensation on the supersonic flow sizes // Письма в журнал технической физики. – 2022. – Т.48. – №. 12. – С. 36-39.
6. Дубровин К., Зарвин А., Горбачев Ю., Яскин А., Каляда В. Особенности процесса энергообмена в кластированном потоке аргона при инициации излучения электронным пучком // ФХКГД. – 2022. – Т. 23. – №. 4. – С. 1–17.
7. Dubrovin K.A., Zarvin A.E., Kalyada V.V., Yaskin A.S. Influence of the outflow initial parameters on the transverse dimensions of underexpanded argon jets in presence of condensation // Vacuum. – 2023. – V.207. – P.111651.
8. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. К модели метрирования сверхзвуковых недорасширенных газовых струй в условиях конденсации // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т.2. - №. 2. – С. 227–237.
9. Dubrovin K.A., Zarvin A.E., Kalyada V.V., Yaskin A.S., Dering E.D. Application of electron beam diagnostics for the study of rarefied clustered gas flows // Vacuum. – 2023. – V. 218. – P. 112652.
10. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Ребров А.К. Specific Features of Formation of Supersonic Jets of Rarefied Gases under Conditions of Developed Condensation // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т.64. – №. 5 – С. 70-83.
11. Zarvin A.E., Madirbaev V.Zh., Dubrovin K.A., Yaskin A.S. Analysis of the causes of the inverse population of atomic argon levels in condensing supersonic flows of mixtures // Fluid Dynamics. – 2023. – V. 58. – №. 8. – P. 1668–1683.
12. Зарвин А.Е., Дубровин К.А., Бондарь Е.А., Ярков Л.В., Зайцев А.В., Каляда В.В., Яскин А.С. Экспериментальное и численное моделирование истечения сверхзвуковых струй

выводами. Интерпретация полученных экспериментальных данных представлена на хорошем профессиональном уровне. Автор диссертационной работы является сложившимся исследователем, способным решать поставленные задачи самостоятельно, а также в большом научном коллективе. Научные положения и выводы выполненной работы не вызывают сомнения. Диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В качестве замечания высказано пожелание в устном докладе корректно и ёмко обходиться с формулировками и обходительно интерпретировать полученные результаты, основываясь на имеющихся литературных данных.

Постановили:

Диссертация «Влияние конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной разреженной струи аргона» Дубровина Кирилла Алексеевича отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника в диссертационном совете Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Заключение принято на заседании междисциплинарного семинара Физического факультета НГУ под руководством д.ф.-м.н., академика РАН Александра Евгеньевича Бондаря.

Присутствовало на заседании 18 чел., в том числе 1 академик РАН, 3 доктора и 6 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 9 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №01/10-2024 от «29» октября 2024 г.

Председатель семинара:

д.ф.-м.н., академик РАН,
в.н.с. лаборатории космологии
и физики элементарных частиц
МЦФЭЧиАФФ (ЛКФЭЧФФ)



Бондарь А.Е.

Секретарь семинара:

м.н.с. лаборатории космологии
и физики элементарных частиц
МЦФЭЧиАФФ (ЛКФЭЧФФ)



Шакирова Т.М.

