

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дубровина Кирилла Алексеевича
**«Влияние конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой
недорасширенной разреженной струи аргона»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук
по специальности **1.3.14** - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация Дубровина К.А. посвящена исследованию влияния гомогенной конденсации на газодинамические и молекулярно-кинетические процессы, протекающие в сверхзвуковом разреженном потоке аргона.

Тема диссертации является актуальной. Представленные результаты могут быть востребованы в области аэрокосмической техники, в части разработки ракетных двигателей систем управления космических летательных аппаратов (КЛА) с учетом их воздействия на элементы конструкции КЛА, а также развития методики пересчета результатов модельных экспериментов на натурные условия истечения струй. Очевидная связь прослеживается с разнообразными вакуумными технологиями такими как газоструйный синтез нанокластеров и наноструктурных пленок, а также обработка материалов кластерными пучками.

Несмотря на проведенные до настоящего времени исследования в рассматриваемой области, режимы истечения сверхзвуковых сильно-недорасширенных струй в разреженное пространство, при которых наблюдается формирование малых Ван-дер-Ваальсовых кластеров, изучены недостаточно. Результаты представленной диссертационной работы позволяют восполнить имеющиеся пробелы в данном направлении.

Целью работы является изучение влияния конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной струи аргона.

Содержание Диссертации соответствует **паспорту научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника (отрасль науки – физико-математические)**, в частности, пунктам:

1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах;

4. Неоднородные аэродисперсные системы;

5. Теплофизика низкотемпературной плазмы.

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 влияет на параметры течения струи;
- впервые зарегистрировано явление послесвечения в слое смешения за пределами сжатого слоя, инициированного кластерами, при возбуждении частиц высоковольтным пучком электронов;

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

Теоретическая и практическая значимость

Представленные в работе результаты будут востребованы для исследовательских институтов, занимающихся изучением процессов синтеза Ван-дер-Ваальсовых кластеров и их физико-химических свойств. С практической точки зрения, полученные в работе данные позволяют составить рекомендации по эксплуатации малогабаритных лабораторных установок для экспериментального моделирования истечения продуктов сгорания из сопел КЛА, ввести и табулировать поправки к применяемым диагностическим методам, что может оказаться полезным, для развития аэрокосмической техники. Как отмечалось выше, проведенное комплексное исследование будет способствовать развитию вакуумных технологий синтеза кластеров и кластерных покрытий, а также технологий обработки поверхностей кластерными пучками.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных измерительных методик, проведением калибровочных работ, анализом погрешностей проведенных измерений, воспроизводимостью результатов и их сравнением с опубликованными данными других исследователей, полученными различными измерительными методами и численными расчетами.

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.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 139 страницах печатного текста, включая 48 рисунков, 15 таблиц и библиографический список из 194 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи, выделена новизна, описана научная и практическая значимость полученных результатов, аргументирована их достоверность, сформулированы выносимые на защиту положения, тезисно изложены структура и объем диссертации, а также обозначен личный вклад автора.

Первая глава посвящена описанию современного представления о сверхзвуковых разреженных кластированных газовых потоках и методах их исследования. Описаны теоретические аспекты процесса конденсации, введены параметры подобия, рассмотрены и сопоставлены имеющиеся в литературе модели оценки среднего размера формируемых в потоке кластеров. Структурированы и проанализированы имеющиеся в литературе сведения о процессах ионизации, возбуждения и излучения кластеров при взаимодействии с электронами различной энергии. В заключении главы выделены аспекты газовой динамики и молекулярной кинетики, влияние конденсации на которые слабо изучено, на основании чего сформулированы следующие **задачи исследования**:

- адаптировать и валидировать методы и средства диагностики на газодинамической установке ЛЭМПУС-2 для проведения исследования в кластированных сверхзвуковых разреженных потоках;
- провести измерения геометрических характеристик сверхзвуковой недорасширенной струи аргона в условиях развитой конденсации; провести сопоставление с известными данными и теоретическими моделями;
- исследовать процесс взаимодействия кластированного потока с фоновым газом;
- провести исследования люминесценции атомов и кластеров во всей области течения сверхзвуковой недорасширенной струи аргона, возбужденной электронным пучком; построить эмпирическую модель послесвечения.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального оборудования, а также адаптации и валидации методик диагностики. Приведено описание спецификации электронно-пучковой системы и различных оптических трактов, созданных для решения поставленных задач. Описан процесс валидации спектральных методов измерения численной плотности и вращательной температуры частиц потока. Рассмотрен процесс модернизации модуля молекулярно-пучковой диагностики и адаптации метода измерения полного сечения упругого рассеяния частиц потока на фоновом газе.

Третья глава посвящена исследованию влияния конденсации на структуру и размеры сверхзвукового потока аргона. Показано, что развитие процесса конденсации приводит к существенному изменению структуры и параметров течения. Выполнены измерения поперечного размера веретенообразной струи в максимальном сечении в режимах с развитой конденсацией. Результаты измерений сопоставлены с имеющимися литературными данными. Сделан вывод, что коэффициент, постоянный в отсутствие конденсации или в отсутствие ее изменения, возрастает с ростом размера кластеров и доли конденсата. Для внесения поправки экспериментальные значения представлены в виде зависимости от среднего размера кластеров.

Четвертая глава посвящена исследованию взаимодействия частиц кластированного потока с фоновым окружением. Представлены измерения доли проникающего фонового газа внутрь потока аргона с «кластерным следом» путём регистрации излучения добавленной в фоновый газ примеси азота или кислорода. Установлено, что в области «кластерного следа» профиль проникания имеет нестационарную точку перегиба, соответствующую границе второй «бочки». Рассмотрен процесс рассеяния частиц кластированного потока на фоновом газе.

Пятая глава посвящена исследованию характерных особенностей излучения частиц кластированного потока, инициированного электронным пучком. Показано, что излучение в области «кластерного следа» селективно и регистрируется только вне области возбуждения. Показано, что наличие долгоживущих процессов релаксации и/или передачи энергии согласуется с ранее полученными результатами о механизме селективного возбуждения отдельных уровней аргона и интенсификации излучения в жёлто-зелёной части спектра. Исследовано влияние газа источника и состава атмосферы на послесвечение кластированного потока. На основе полученных данных сделано предположение, что наблюдаемое в «кластерном следе» длительное послесвечение обусловлено взаимодействием кластеров с частицами фонового пространства.

В **заключении** представлены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

Замечания к диссертационной работе:

1) Для оценки поперечного размера затопленной струи в диссертационной работе используется формула (1.23), заимствованная из работы [19]. Значение коэффициента k_7 для случая, когда влияние конденсации несущественно, полагается равным 2.03 (стр.56,57 диссертации). Однако, в оригинальной формуле (5) в статье [19] использован коэффициент 1.1. В работе [19] в качестве поперечного размера рассматривается максимальное удаление висячего скачка от оси. В диссертационной работе размер струи определен несколько иначе с использованием максимального и минимального значения интенсивности излучения частиц в максимальном сечении. Но даже с учетом такого определения разница в коэффициентах представляется большой и требует пояснения.

2) С целью дополнительной верификации экспериментальных методов в диссертации полезно было бы привести данные о расстоянии до диска Маха или соответствующей точки X-образной конфигурации для струй с минимальным влиянием процесса конденсации на поток и провести сравнение с имеющимися аналитическими зависимостями.

3) Не совсем понятно, почему в работе не исследуется влияние процесса конденсации на продольные размеры струи.

4) Следовало бы пояснить наблюдалось ли влияние энергии электронного пучка на измеряемые параметры, в том числе параметры излучения “кластерного следа”.

5) В ряде работ, например [D. Golomb etl., The Journal of Chemical Physics 57, 3844 (1972); doi: 10.1063/1.1678854], показана зависимость результатов измерений параметров молекулярного пучка от температуры скиммера при молекулярно-пучковой диагностике. Не совсем ясно какова была температура скиммера в настоящей работе и исследовался ли указанный эффект.

6) В диссертационной работе следовало бы дать более полное определение понятия “кластерного следа”. По факту прочтения работы складывается впечатление, что это особая газодинамическая структура, “оторванная” от течения атомов струи за пределами первой бочки. На мой взгляд, все же речь идет о кластерах,двигающихся в слое смешения в той или иной мере согласовано с атомами струи и буферного газа. При этом скорость кластеров может совпадать со скоростью мономеров или могут иметь место эффекты проскальзывания.

7) На стр.88-90 приведены данные о сечении рассеяния атомов аргона на атомах фонового газа. Указанное сечение оказывается зависимым от среднего размера кластеров в пучке. Данное утверждение не понятно. Следовало бы привести определение сечения рассеяния атомов струи на атомах буферного газа и соответствующую математическую формулировку.

Указанные замечания не влияют на общий положительный вывод о ценности диссертационной работы и сформулированных в ней научных положений.

Диссертационная работа Дубровина К.А. «Влияние конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной разреженной струи аргона» **соответствует специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

Диссертация представляет собой актуальную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком исследовательском уровне. Научные положения, сформулированные в диссертации и выносимые на защиту, достаточно обоснованы. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях и имеют достаточную апробацию на всероссийских и международных научных конференциях. Текст диссертации написан хорошим языком, логически построен и структурирован.

Следует обратить внимание на очевидную самостоятельность автора при работе над диссертацией, проявленный творческий подход, а также на число публикаций автора по теме диссертации, значительно превышающее предъявляемые требования. Среди

публикаций имеются статьи в международных журналах первой четверти (Q1 по Scopus). Данное обстоятельство подчеркивает высокий уровень проведенных исследований.

Считаю, что диссертация Дубровина К.А. соответствует требованиям пунктов 9-11, «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 01.10.2018), а её автор, Дубровин Кирилл Алексеевич, **заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

Доктор физико-математических наук
01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор кафедры физики,
главный научный сотрудник
лаборатории «Вычислительная физика»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
государственный университет имени Петра Великого»

19.05.2025



Подпись д.ф.-м.н. Быкова Н.Ю. заверяю



Наименование организации: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

Почтовый адрес организации: ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251.
Телефон 8 (800) 707-18-99.

Адрес электронной почты: office@spbstu.ru.

Почтовый адрес оппонента: 190068, СПб, ул. Декабристов 14, кв.53.

Телефон: +7-921-9502546.

Адрес электронной почты: nbykov2006@yandex.ru.

Я, Быков Николай Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Дубровина Кирилла Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

