

«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. проректора по научной работе
Санкт-Петербургского
государственного университета



С. В. Микушев
2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Дубровина Кирилла Алексеевича на тему «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.

Актуальность темы исследования

Исследование процессов истечения газов, газовых смесей из сопла в разреженное пространство в лабораторных условиях при температурах, близких к обычной комнатной, сопряжено с явлением конденсации и формированием кластеров разных размеров. При разработке космических аппаратов и ракетных двигателей, работающих в разреженном пространстве, необходимы предварительные лабораторные исследования структуры истекающей из сопла струи, воздействия струи двигателя на поверхность аппарата и т.п. Появление кластеров в потоке моделируемой струи оказывает воздействие на результаты испытаний. С другой стороны, кластеры обладают уникальными свойствами, которые могут быть использованы в различных технологических процессах. Поэтому проведение исследований по влиянию конденсации на газодинамические процессы и возникновению кластеров в сверхзвуковых разреженных струях является актуальным и необходимым.

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.

Структура и содержание работы

Текст диссертации содержит подробное описание проводившихся экспериментальных, теоретических, расчетных и сравнительных исследований и детальный анализ полученных результатов. 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 от димеризации до формирования макрочастиц, введены характеристические параметры, 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 задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального оборудования, а также адаптации и валидации методик диагностики. Представлено описание модуля электронно-пучковой диагностики и различных оптических трактов, реализованных для решения поставленных задач. Описан процесс адаптации и валидации спектральных методов измерения численной плотности и температуры частиц газового потока. Представлены спецификации модуля молекулярно-пучковой диагностики и описан процесс 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 при определенных газодинамических параметрах истечения приводит к формированию вторичного потока. Выдвинуто предположение, что этот поток содержит кластеры, прошедшие висячие скачки. Для валидации литературной модели проанализированы значения радиуса струи, полученные в режимах с развитой конденсацией. 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. Показано, что при развитии конденсации в потоке сечение атомов уменьшается, что является следствием фрагментации кластеров при столкновении с частицами фонового окружения.

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 результатами литературного источника, в котором представлено описание молекулярно-кластерного механизма 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 сделан вывод, что наблюдаемое в «кластерном следе» длительное послесвечение обусловлено взаимодействием кластеров с частицами фонового пространства.

В Заключение представлены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, написана хорошим языком, логически построена и структурирована. Хорошо, тщательно оформлена.

Научная новизна работы

В диссертационной работе на основе использования современных методик и средств измерения проведены экспериментальные исследования влияния конденсации на структуру и послесвечение сверхзвуковой недорасширенной струи аргона, истекающей в разреженное пространство в условиях развитой конденсации. В результате выполнения работы автором получен ряд новых результатов:

- предложена эмпирическая поправка к существующей модели, учитывающая процесс конденсации, которая связывает начальные параметры истечения с поперечным размером формируемой струи;
- экспериментально установлено, что взаимодействие кластеров с фоновым газом приводит к фрагментации кластеров и подавлению проникания частиц фонового газа в центральную область истекающей струи;
- зарегистрировано явление послесвечения вторичного течения, инициированного кластерами, за пределами сжатого слоя струи;
- установлена роль кластеров в формировании спектрального состава послесвечения.

Теоретическая ценность исследования

Результаты исследования расширяют представления о физических и газодинамических процессах, протекающих в сверхзвуковых струях, истекающих в разреженное пространство в условиях развитой конденсации. Теоретическая ценность диссертационной работы заключается в систематическом анализе процессов сверхзвукового истечения газа в условиях разреженной среды с учетом кластерообразования, а также в формулировке критериев, определяющих режимы конденсации и свечения кластеров. Особое внимание уделено физико-математическому описанию неравновесных процессов возбуждения и ионизации частиц, возникающих при истечении. Разработанная эмпирическая поправка к существующим моделям, связывающая параметры истечения с геометрией струи, обогащает теоретическую базу для описания нелинейных эффектов в разреженных средах. Установленные закономерности взаимодействия кластеров с фоновым газом, включая фрагментацию и подавление проникания частиц, углубляют знания в области молекулярной кинетики неоднородных систем. Полученные данные также способствуют развитию методов математического моделирования, обеспечивая возможность их верификации на основе экспериментальных результатов, представленных в работе.

Практическая значимость

Полученные в Диссертации данные могут быть использованы при проведении лабораторных исследований работы ракетных двигателей в разреженном пространстве, при определении воздействия продуктов сгорания, истекающих из сопла, на поверхность космических аппаратов. Помимо этого, прикладные применения кластеров можно найти в таких отраслях как получение тонкопленочных покрытий с новыми свойствами, травление подложек, имплантация атомов на малые глубины, а также сверхгладкая полировка поверхностей твердых тел. Результаты исследований могут представлять интерес для академических научно-исследовательских институтов, могут найти применение в отраслевых институтах и специализированных конструкторских бюро при конструировании современных космических летательных аппаратов (Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» и др.).

Достоверность полученных результатов

Автором диссертации при проведении физических экспериментов использовались современные методы и средства измерения. Полученные научные результаты сравнивались с данными измерений и численными расчетами других исследователей. Сравнение полученных данных говорит о высокой достоверности результатов исследований.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 16 международных и национальных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано более 50 печатных работ, в том числе 13 статей во всероссийских и зарубежных периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных результатов диссертации.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Автором при метрологическом описании проведенных измерений используется термин «погрешность» (см. стр. 6, 68, 81, 95). С 2017 г. в Российской Федерации действует ГОСТ 34100.3-2017/ Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, в котором введено понятие «неопределенность измерения» (вместо ранее используемого «погрешность»). Этими нормативными материалами следует пользоваться при описании

количественной характеристики качества результатов измерений.

2. Предложенная в диссертации эмпирическая поправка для учета влияния формирования конденсированной фазы на геометрию струи (см. раздел 3.2) представляет интерес для количественного описания. Согласно полученным данным в потоке аргона, развитие конденсации приводит к нелинейному увеличению радиуса струи по сравнению с литературными моделями, что, по-видимому, связано с выделением скрытой теплоты и нарушением адиабатичности течения.

Однако обоснованность предложенной модели подтверждена лишь в узком диапазоне параметров и только для одного газа. Сформулированный в выводах тезис о том, что «в присутствии кластерообразования полученные ранее зависимости могут быть использованы для описания размеров формируемых струй лишь при введении соответствующей поправки, учитывающей все возможные процессы, сопряженные с развитием конденсации в потоке», требует дополнительных пояснений. Из текста не вполне ясно, насколько строго определены границы применимости поправки — как в терминах параметров газа (вид газа, давление, температура), так и в отношении сопел и характера течения.

3. Следует также отметить ряд методологических вопросов, которые, на наш взгляд, заслуживают дополнительного обсуждения. В параграфе диссертации, посвященном процессам конденсации, автор ссылается на эмпирическую модель формирования кластеров в струе, в которой в качестве параметра подобия используется «корреляционный комплекс Γ^* , определяемый состоянием газа до расширения [122-124]:

$$\Gamma^* = a_1 P_0 d_{eq}^{a_2} T_0^{-a_3}$$

где P_0 — давление торможения [мбар]; d_{eq} (1.16) — эквивалентный диаметр сопла [мкм]; T_0 — температура торможения [К]; a_1 , a_2 и a_3 — эмпирические константы, зависящие от сорта газа.»

При этом отмечается, что данный параметр обладает размерностью, что противоречит его назначению как безразмерного критерия подобия. Кроме того, средний размер кластеров в работе связывается с величиной Γ^* , однако не уточняется, к какому сечению струи относится эта усредненная величина. Учитывая, что кластеры образуются не мгновенно и их размер изменяется вдоль струи под воздействием локальных газодинамических условий, отсутствие пространственной локализации вызывает затруднения при построении обоснованной модели

кластерообразования. Эти вопросы требуют дополнительного уточнения и прояснения со стороны автора.

4. В работе имеется небольшое число опечаток: стр. 18, в 5 строке сверху пропущен предлог «в»; стр. 33. В 3 строке сверху пропущен предлог «на»; стр. 50, в 5 строке снизу исключить «с»; стр. 56, в 5 строке сверху исправить слово «различит»; стр. 91, строка 11 снизу, в выражении «...кластер после столкновений с частицами фонового окружения в послескиммерной секции кластер может уменьшиться...» исключить повторение слова «кластер»; стр. 104, строка 11, согласовать «безызлучательный переходов».

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования. Рассматривая работу Дубровина Кирилла Алексеевича в целом, можно констатировать, что выполненный диссертантом комплекс научных исследований представляет несомненную научную ценность, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Заключение

Диссертационная работа К.А. Дубровина характеризуется полнотой и завершенностью, ясно и грамотно написана, достаточно подробно иллюстрирована графиками и рисунками. Исследование выполнено на высоком научном уровне и представляет собой законченный научно-исследовательский труд в области экспериментальной газодинамики и струйных течений в условиях разреженности.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации являются новыми, обоснованными и значимыми для дальнейшего развития методов исследования сверхзвуковых струй с учетом процессов конденсации и кластерообразования. Полученные результаты представляют интерес для лабораторного моделирования условий, близких к работе ракетных двигателей в вакууме, а также могут быть использованы при проектировании и анализе поведения элементов космических аппаратов.

Таким образом, диссертация Дубровина Кирилла Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор – Дубровин Кирилл Алексеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором Кафедры гидроаэромеханики СПбГУ Валерием Александровичем Лашковым и кандидатом физико-математических наук, ассистентом математико-механического факультета СПбГУ Лией Алимджановной Шакуровой.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры гидроаэромеханики СПбГУ, протокол от 6 мая 2025 г. № 44/8/6-02-100.

Профессор Кафедры гидроаэромеханики,
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет»,
доктор физико-математических наук

В.А. Лашков

Ассистент математико-механического факультета,
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет»,
кандидат физико-математических наук

Л.А. Шакурова

Лией Алимджановной Шакуровой
уверено

Лашков В.А.
Шакурова Л.А.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ
УК ГУОРП



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Телефон: (812) 328-97-01

e-mail: spbu@spbu.ru

Сайт: <https://spbu.ru>