

На правах рукописи



Дубровин Кирилл Алексеевич

**ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕ
СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ РАЗРЕЖЕННОЙ СТРУИ АРГОНА**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

Зарвин Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Быков Николай Юрьевич**

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический государственный университет имени Петра Великого», профессор кафедры физики, главный научный сотрудник лаборатории «Вычислительная физика»

Рудяк Валерий Яковлевич

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», профессор кафедры теоретической механики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «04» июня 2025 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук: <http://www.itp.nsc.ru/>.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1 (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



д.ф.-м.н., профессор РАН,
Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследования процессов истечения газов (газовых смесей) из сопла в разреженное пространство, обусловленные как созданием и эксплуатацией ракетных двигателей, так и анализом физико-химических процессов, проводятся на протяжении нескольких десятков лет. За продолжительный период времени было опубликовано немало работ, посвященных изучению природы разреженных газовых потоков [1-2], а также методам и средствам их диагностики [3-4]. Экспериментальное моделирование в данной области является актуальной и сложной научно-технической задачей, решение которой позволяет воссоздавать и изучать распределение параметров различных течений. Так, например, при разработке космических аппаратов (КА) нового поколения предварительные наземные исследования позволяют заблаговременно определить структуру струй при различных параметрах расхода газа и внешних условиях в окружающем пространстве [5-6], выявить влияние истекающего газа на собственную атмосферу аппарата [7] и взаимодействие потока с поверхностями аппарата [8], приводящее к их загрязнению. Однако проведение подобных исследований в лабораторных условиях при комнатной температуре сопряжено с развитием процесса конденсации и формированием кластеров различных размеров [9-10]. Кластеры, объединенные слабыми силами Ван-дер-Ваальса, обладают уникальными свойствами, что нашло немало прикладных применений в различных технологиях: фуллерены и фуллереноподобные частицы; тонкопленочные покрытия с новыми свойствами; травление подложек, имплантация атомов на малые глубины; сверхгладкая полировка поверхностей твердых тел; внутрикластерный энергообмен; химические реакции и др. Однако вопросы влияния развитой конденсации на процессы, протекающие в сверхзвуковых разреженных струях, до сих пор слабо изучены. Так, например, в работах отдела прикладной физики ФФ НГУ [11] методом электронно-пучковой диагностики было обнаружено, что в условиях развитой конденсации помимо типичной веретенообразной струи образуется вторичный поток, обладающий большими размерами, сложной структурой и слабозатухающим послесвечением, не нашедший описания в научной литературе. Это побудило к проведению комплексного исследования влияния конденсации на протекающие в потоке газодинамические и молекулярно-кинетические процессы.

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

-
- ¹ Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. – Новосибирск: Наука, 1984. – 235 с.
 - ² Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 1. Истечение струй в вакуум // ФХКГД. – 2012. – Т.13, N.1. – С.1–22.
 - ³ Gochberg L.A. Electron beam fluorescence methods in hypersonic aerothermodynamics // Prog. Aerospace Sci. – 1997. – V.33. – P.431–80.
 - ⁴ Zarvin A.E., Sharafutdinov R.G. Influence of a stream perturbation before the skimmer on molecular-beam parameters // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 1978. – V.19. – P.321–4.
 - ⁵ Yarygin V.N., Gerasimov Yu.I., Krylov A.N., et al. Gas Dynamics of Spacecraft and Orbital Stations (Review) // Thermophys. Aeromech. – 2011. – V.18, N.3. – P.333–58.
 - ⁶ Patel M., Thomas J., Joshi H.C. Experimental investigation of rarefied flows through supersonic nozzles // Vacuum. – 2023. – V.211. – P.111909.
 - ⁷ Dupeyrat G., Giat M. Experimental study of velocities in a free jet in a rarefied atmosphere // AIAA Journal. – 1976. – V.14, N.12. – P. 1706–8.
 - ⁸ Yamazaki S. et al. The Experimental Study of Impinging Interaction of Rarefied Gas Jet With Plane Wall Using LIF Method // FEDSM. – 2011. – V.44403. – P.2811–16.
 - ⁹ Hagen O.F. Cluster ion sources // Rev. Sci. Instrum. – 1992. – V.63. – P.2374–9.
 - ¹⁰ Buck U., Krohne R. Cluster size determination from diffractive He atom scattering // J. Chem. Phys. – 1996. – V.105, N.13. – P.5408.
 - ¹¹ Зарвин А.Е. и др. О структуре сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации // ПЖТФ. – 2015. – Т.41, N.22. – С.74–81.

Задачи диссертационной работы:

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

Объектом исследования является сверхзвуковая недорасширенная струя аргона, истекающая в разреженное пространство в условиях развитой конденсации.

Предметом исследования являются структура и послесвечение недорасширенной кластированной струи аргона низкой плотности.

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.

Теоретическая и практическая значимость. 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.

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.

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.

Исследования по тематике диссертационной работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-01-00332), Российского научного фонда (проекты №22-11-00080, №22-19-00750) и Министерства образования и науки РФ (проекты 3.5918.2017/ИТР, 3.5920.2017/ИТР, FSUS-2020-0039).

Апробация результатов. Основные результаты представлены в виде докладов, сделанных лично автором диссертационной работы или в соавторстве с научным коллективом, на различных студенческих, всероссийских и международных конференциях: Международная научная студенческая конференция; Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»; Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли; Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар»; Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям; Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика»; Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии»; Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики»; Всероссийская конференция с международным участием «Физика низкотемпературной плазмы»; International Conference on the Methods of Aerophysical Research; International Symposium on Rarefied Gas Dynamics; Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков»; Всероссийская научная конференция студентов-

физиков и молодых ученых; Международный симпозиум по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям.

Публикации автора. Список публикаций по теме диссертационной работы включает более 50 печатных работ, в том числе 13 статей во российских и зарубежных периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных результатов диссертационной работы (см. стр. 17), а также 16 материалов и более 20 тезисов конференций.

Структура и объём диссертационной 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 объём диссертации, а также обозначен личный вклад автора.

Первая глава посвящена описанию современного представления о сверхзвуковых разреженных кластированных газовых потоках и методах их исследования. В §1.1 представлены особенности истечения неконденсирующегося газа в разреженную среду, введены общепринятые величины для характеристики потоков, истекающих из сопла в разреженную среду. В §1.2 обсуждена возможность моделирования процесса истечения на малогабаритных лабораторных установках с использованием параметров подобия, а также рассмотрены известные методы диагностики разреженных газовых потоков. В §1.2.1 представлены варианты использования пучка электронов для проведения количественных и качественных измерений. В частности, даётся теоретическое и практическое обоснование возможности использования электронно-пучковой диагностики для измерения численной плотности (§1.2.1.1), скорости и поступательной температуры (§1.2.1.2), вращательной температуры частиц потока (§1.2.1.3), а также для визуализации поля течения струи (§1.2.1.4). В §1.2.2 представлено описание метода молекулярно-пучковой диагностики, а также обозначены технологические требования к экспериментальному участку для достижения неинвазивности методики. В деталях рассмотрена методика исследования процесса рассеяния частиц на фоновом газе. В §1.3 приведено современное представление о конденсации газа в сверхзвуковом потоке и о взаимодействии кластеров с электронами диагностического пучка. В §1.3.1 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 $\langle S \rangle$ ^[9-10]. В §1.3.2 структурированы и проанализированы имеющиеся в литературе сведения о процессах ионизации, возбуждения и излучения кластеров при взаимодействии с электронами различной энергии, рассмотрены сопряженные процессы фрагментации, испарения, деструкции и внутреннего энергообмена. 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. В §2.1 рассмотрено устройство

газодинамического стенда ЛЭМПУС-2 ^[12] (рисунок 1), описаны его ключевые узлы, перечисленные основные технические спецификации. Отдельное внимание уделено модификациям, выполненным в контексте настоящей работы.

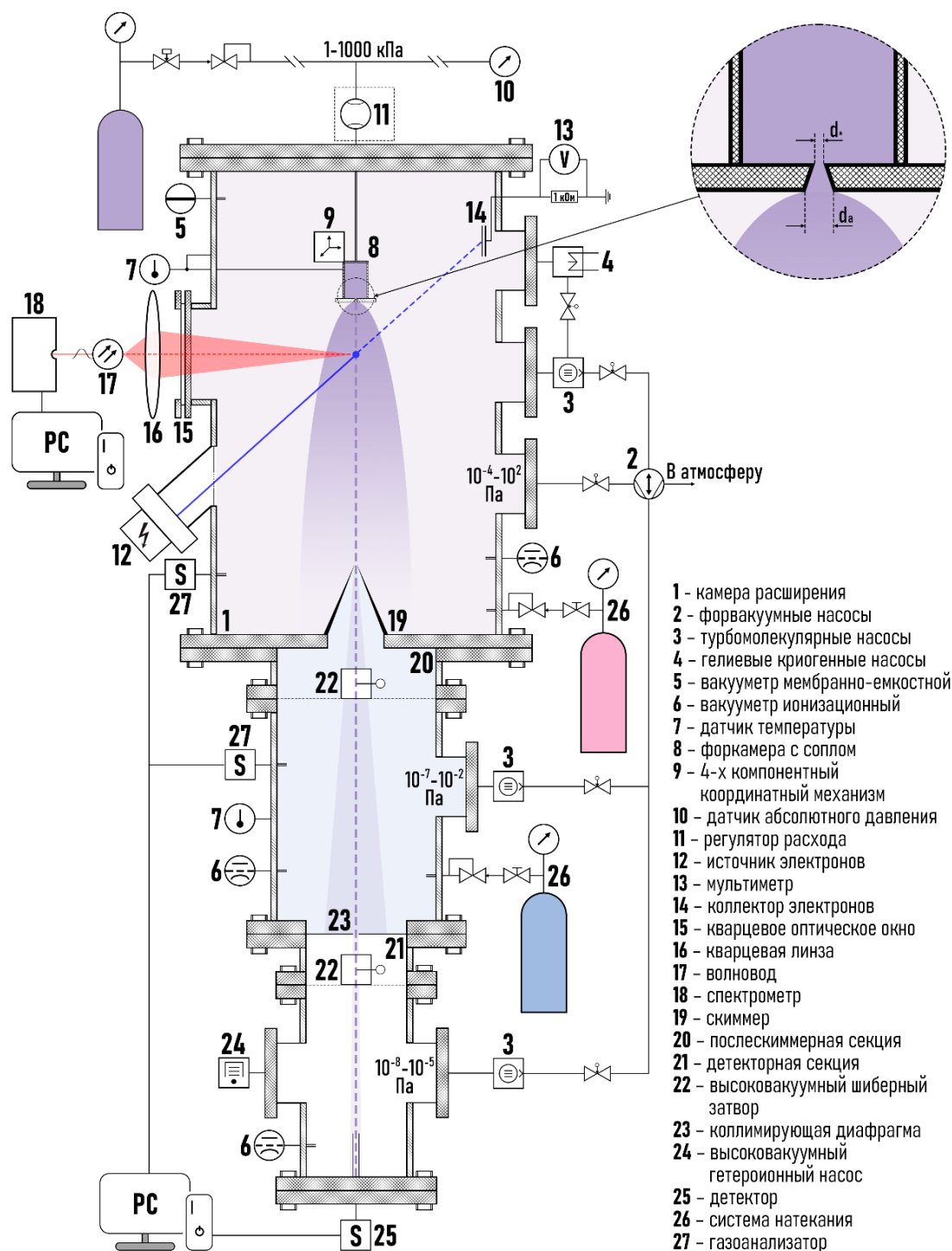
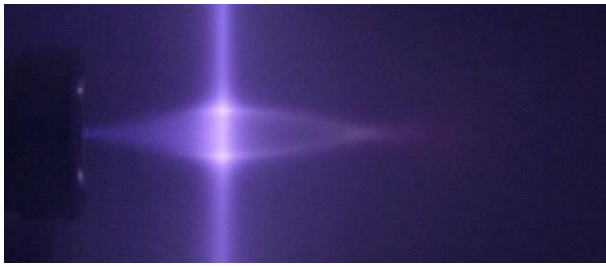


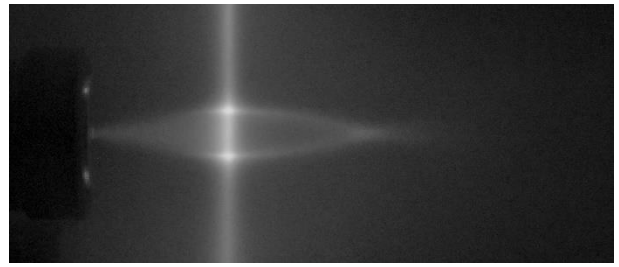
Рисунок 1 – Схематический вид газодинамического стенда «ЛЭМПУС-2».

В §2.2 представлено описание модуля электронно-пучковой диагностики и различных оптических трактов, реализованных для решения поставленных задач. В §2.2.1 описан процесс валидации метода визуализации разреженного газового потока, а также отладки способа обработки изображений (рисунок 2) и метризации линейных размеров (измерение радиуса струи в максимальном сечении r_m).

¹² Zarvin A.E., Kalyada V.V., et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Trans.Plas.Sci. – 2017. – V.45. – P.819-27.



a



б

Рисунок 2 – Визуализация сверхзвуковой недорасширенной струи аргона (*a* – первичная фотография, *б* – после обработки). СЗС, $d^* = 1.0$ мм, $P_0 = 17.5$ кПа, $T_0 = 302.2$ К, $P_\infty = 2.5$ Па.

Валидация метода осуществлена путём сопоставления экспериментальных данных, полученных в условиях пренебрежимо малой конденсации, с литературной зависимостью [13]:

$$r_m/r_a = k_0 \left(N/\bar{F} \right)^{0.5} \operatorname{tg} \theta_m, \quad (1)$$

где k_0 – постоянный коэффициент; $N = P_0/P_\infty$ – степень расширения струи по давлению;

P_0 – давление торможения; P_∞ – противодавление; $\bar{F} = \frac{d_a^2}{d_*^2}$ – степень расширения сопла по площади; r_a , d_a – радиус и диаметр выходного сечения сопла; d^* – диаметр критического сечения сопла;

γ – показатель адиабаты; $\theta_m = \arctg \sqrt{\frac{1-\bar{J}}{\bar{J}}}$ – угол расширения струи;

$\bar{J} = \left(1 + \frac{1}{\gamma M_a^2} \right) \left(1 + \frac{2}{\gamma - 1} \frac{1}{M_a^2} \right)^{-0.5}$ – относительный импульс газа на срезе сопла; M_a – число Маха на выходном срезе сопла.

Сопоставление показало хорошее совпадение ($\Delta < 2.5\%$) при $k_0 = 2.03$. Отличие значения численного коэффициента от представленного в работе [13] поясняется проведением измерений в потоке аргона, использованием геометрической оценки M_a и определением понятия радиуса струи вместе с зоной смещения, что не меняет принципиальный вид зависимости, а лишь вносит уточнение в значение k_0 .

В §2.2.2 описаны особенности спектрального анализа инициированного электронным пучком излучения, продемонстрирован созданный рабочий участок и варианты его использования, рассмотрены спектры излучения чистых газов (Ar, N₂, CO₂) и смесей (Ar+N₂, Ar+CO₂, Ar+O₂, Ar+He), расшифрованные с использованием литературных данных по спектральным характеристикам излучательных переходов [14-15] (Приложение А).

В §2.2.3 описан процесс адаптации и валидации спектральных методов измерения численной плотности и температуры частиц газового потока. Зарегистрированные осевые профили численной плотности $n/n_0 (x/d_*)$ в потоках аргона и азота, истекающих из звукового сопла в условиях пренебрежимо малой конденсации, сопоставлены с численными расчетами,

¹³ Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 2. Истечение в затопленное пространство // ФХКГД. – 2012. – Т.13, N.2. – С.1-26.

¹⁴ Бочкарев А.А., Косинов В.А., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г. Измерения параметров газового потока с помощью электронного пучка // Эксп. методы в дин. разреж. газов. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР. – 1974. – С.98–137.

¹⁵ Kazakov V.V., Kazakov V.G., Kovalev V.S., et al. Electronic structure of atoms: atomic spectroscopy information system // Physica Scripta. – 2017. – V.92, N.10. – P.105002.

полученными совместно с сотрудниками ИТПМ СО РАН [16], а также с изобарической зависимостью [17]:

$$\frac{n}{n_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}, \quad \frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-1}, \quad M(x) = A_* \left(\frac{x-x_*}{d_*}\right)^{\gamma-1} - \frac{1}{2} \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left(A_* \left(\frac{x-x_*}{d_*}\right)^{\gamma-1}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где n_0 и T_0 – плотность и температура газа до расширения; A_* и x_* – константы, зависящие от γ и определяемые расчетным или экспериментальным путём. Показано [18], что внутри ядра струи расширение газа происходит согласно (2), а в дальнем поле течения наблюдается отклонение, обусловленное образованием прямой ударной волны.

В свою очередь, измерения температуры молекул азота по распределению интенсивности R-ветви колебательной полосы (0-1) ИОС, полученные в фоновом окружении и в потоке [19], с хорошей точностью ($\Delta \sim 2\%$ в фоновом газе и $\Delta \sim 15-20\%$ в сверхзвуковом потоке [20]) соответствуют значениям, измеренным на стенках камеры расширения и оцененным по (2), соответственно.

В §2.3 представлены спецификации модуля молекулярно-пучковой диагностики и описан процесс адаптации метода измерения полного сечения упругого рассеяния частиц потока на фоновом газе σ_b . Значения амплитуды сигнала на оси пучка A в диапазоне давления в послескimmerной секции P_{ps} 10^{-4} – 10^{-2} Па хорошо ($\Delta < 6\%$) описываются экспоненциальной зависимостью [21]:

$$\frac{A}{A_{\max}} = \exp \left\{ -\sigma_b \cdot \frac{P_{ps}}{k_B \cdot T_{ps}} \cdot L_{ps} \right\}, \quad (3)$$

где $A_{\max}$ – значение A при $P_{ps} \rightarrow 0$; T_{ps} – температура фоновых частиц; k_B – постоянная Больцмана; L_{ps} – длина послескimmerной секции. Валидация проведена путём сопоставления полученных в неконденсирующемся потоке азота и аргона значений (29 и 42 Å²) с представленными в литературе данными [22-23].

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, внешнего по отношению к «традиционной» струе, обладающего схожей формой, но со значительно большими размерами и слабозатухающим послесвечением при возбуждении частиц потока пучком электронов (рисунки 3). Установлено, что он не наблюдается за соплами большого диаметра, при малых значениях давления торможения, в потоках слабоконденсирующихся газов, образуется в определенном диапазоне значений числа

¹⁶ Zaitsev A.V., Yarkov L.V., et al. Jet expansion into the vacuum chamber: Kinetic-continuum computations and validation against experiments // AIP Conf. Proc. – 2024. – V.2996 – P.080014.

¹⁷ Ashkenas H., Sherman F.S. The structure and utilization of supersonic free jets in low density wind tunnels // Proc. 4th Int. Symp. on Rarefied Gas Dyn. – 1964. – V.2, N.7. – P.84–105.

¹⁸ Dubrovin K.A., Yarkov L.V., Zarvin A.E., Zaitsev A.V., et al. Numerical and Experimental Simulation of Supersonic Gas Outflow into a Low-Density Medium // Aerospace. – 2024. – V.11, N.11. – P.905.

¹⁹ Деринг Е.Д., Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В. Использование электронно-пучковой спектроскопии для определения вращательной температуры в сверхзвуковом кластированном потоке // Материалы XL Сибирского теплофизического семинара. – 2024. – С.168.

²⁰ Muntz E.P. Static Temperature Measurements in a Flowing Gas // Phys. Fluids. – 1962. – V.5. – P.80.

²¹ Калинин А.П., Родионова И.П., Родионов И.Д. Метод рассеяния быстрых молекулярных пучков как инструмент изучения свойств вещества // ФХКГД. – 2007. – В.5. – С.1–135.

²² Phelps A.V. Cross Sections and Swarm Coefficients for Nitrogen Ions and Neutrals in N2 and Argon Ions and Neutrals in Ar for Energies from 0.1 eV to 10 keV // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1991. – V.20, N.3. – P.557-73.

²³ Nenner T., Tien H., Fenn J.B. Total cross section measurements for the scattering of argon by aliphatic hydrocarbons // J. Chem. Phys. – 1975. – V.63, N.12. – P.5439–44.

Рейнольдса $Re_L = Re_* / \sqrt{N}$ [24] и характеризуется падением плотности вниз по течению. На основании данных источников [25-26] выдвинуто предположение, что этот поток содержит кластеры, прошедшие висячие скачки, ввиду чего он получил название «кластерный след» [11].

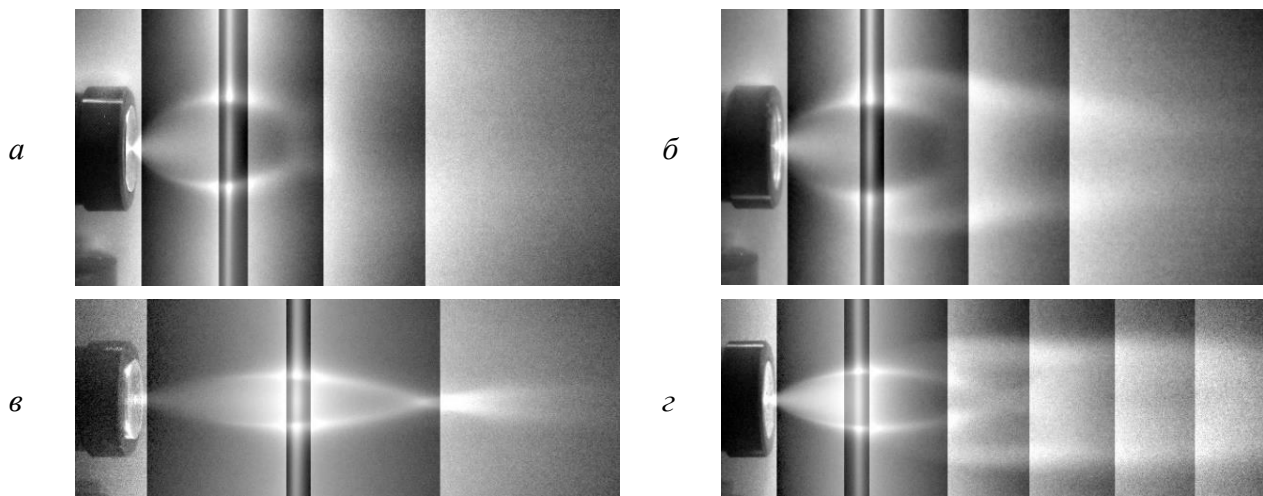


Рисунок 3 – Визуализация потоков аргона, истекающих из различных сопел.

- (а) – ЗС, $d^* = 1.12$ мм, $P_0 = 30$ кПа, $T_0 = 301.1$ К, $P_\infty = 6.0$ Па, $\langle S \rangle = 9$;
(б) – ЗС, $d^* = 0.24$ мм, $P_0 = 600$ кПа, $T_0 = 298.4$ К, $P_\infty = 6.0$ Па, $\langle S \rangle = 181$;
(в) – СЗС, $d^* = 1.00$ мм, $P_0 = 35$ кПа, $T_0 = 298.3$ К, $P_\infty = 2.68$ Па, $\langle S \rangle = 56$;
(г) – СЗС, $d^* = 0.24$ мм, $P_0 = 680$ кПа, $T_0 = 303.4$ К, $P_\infty = 6.0$ Па, $\langle S \rangle > 1400$.

Для выявления влияния начальных параметров истечения на структуру потока аргона, истекающего из сверхзвукового сопла в условиях развитой конденсации, в §3.1 представлены независимые серии измерений с вариацией одной из величин при поддержании других постоянными.

При вариации P_∞ (§3.1.1) установлено, что его увеличение приводит к уменьшению размеров струи, что согласуется с (1), а также к сужению «кластерного следа», что обусловлено фрагментацией и отклонением кластеров в сторону оси потока при столкновении с фоновыми частицами. При малых значениях P_∞ послесвечение «кластерного следа» не наблюдается.

При вариации P_0 (§3.1.2) установлено, что его увеличение приводит к увеличению размеров струи, что также согласуется с (1), а также к увеличению интенсивности послесвечения «кластерного следа», что поясняется ростом доли конденсата. В то же время, с ростом P_0 увеличивается значение Re_L , ввиду чего преодоление кластерами висячих скачков затруднено, из-за чего рост интенсивности послесвечения непропорционален.

При вариации T_0 (§3.1.3) установлено, что её увеличение, вопреки модели (1), в условиях развитой конденсации приводит к уменьшению размеров струи и «кластерного следа», что поясняется смещением фронта конденсации вниз по потоку.

Для валидации модели (1) в §3.2 проанализированы значения r_m , полученные в режимах с развитой конденсацией. Установлено, что при вариации P_∞ значения r_m хорошо ($\Delta < 1.5\%$) описываются (1), но при $k_0 = 2.17$. В свою очередь, при вариации P_0 результаты описать зависимостью (1) с использованием постоянного k_0 невозможно, как и результаты измерений

²⁴ Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г. Диффузионные процессы в зоне смешения сверхзвуковой струи низкой плотности // ПМТФ. – 1973. – № 1. – С.121–7.

²⁵ Новопашин С.А., Перепелкин А.Л., Ярыгин В.Н. Взаимодействие кластеров CO₂ с диском Маха // Физика кластеров. Сб. науч. тр., СО АН СССР, Ин-т теплофизики, Новосибирск. – 1987. – С.169–72.

²⁶ Patel, M., Geethika, B.R., Thomas, J. et al. Spatial mapping of low-pressure cluster jets using Rayleigh scattering // Sci.Rep. – 2023. – V.13. – P.6338.

при вариации T_0 , влияние которой (1) не учитывает. Из полученных результатов следует, что развитие конденсации приводит к дополнительному уширению газового потока вне согласия с зависимостью (1), что ранее было отмечено в источниках [1-2]. Исходя из полученных результатов был сделан вывод, что коэффициент k_0 , постоянный в отсутствие конденсации или в отсутствие ее изменения, возрастает с ростом размера кластеров и доли конденсата. Эффект уширения можно пояснить появлением дополнительной внутренней энергии молекул за счет выделения в поток скрытой теплоты конденсации [2, 27], приводящего к искажению адиабатичности [28], уменьшению $\bar{J}$, увеличению θ_m и, как следствие, уменьшению плотности газа на оси потока, что подтверждается экспериментальными данными [29].

Для внесения поправки в (1) экспериментальные значения k_0 представлены в виде зависимости от среднего размера кластеров $\langle S \rangle$ [10] (рисунок 4). Данные образуют монотонно возрастающую зависимость, нижний предел которой определяется постоянным значением k_0 в режимах без конденсации [20], а верхний порог насыщения – ограничением доли конденсата в струе, а также пределом эффективности рассеяния кластеров на фоновых частицах при стремлении отношения их масс к бесконечности [30]. Характер изменения k_0 в рассмотренном диапазоне $\langle S \rangle < 3000$ можно аппроксимировать зависимостью:

$$k_0(\langle S \rangle) = k_0^{\text{inf}} + \Delta k_0 \left(1 - e^{-\langle S \rangle / a_1} \right), \quad (4)$$

где $k_0^{\text{inf}} = 2.03$, $k_0^{\text{up}} = 2.44$, $\Delta k_0 = k_0^{\text{up}} - k_0^{\text{inf}}$, $a_1 = 825$ – постоянные численные коэффициенты. Модель поправки (4) апробирована в **Приложении Б** на режимах истечения из сверхзвуковых сопел различных конфигураций. Сравнение показывает хорошее совпадение: абсолютная погрешность < 0.3 мм, среднеквадратическое отклонение $= 0.02$ мм, а относительная погрешность $< 2\%$.

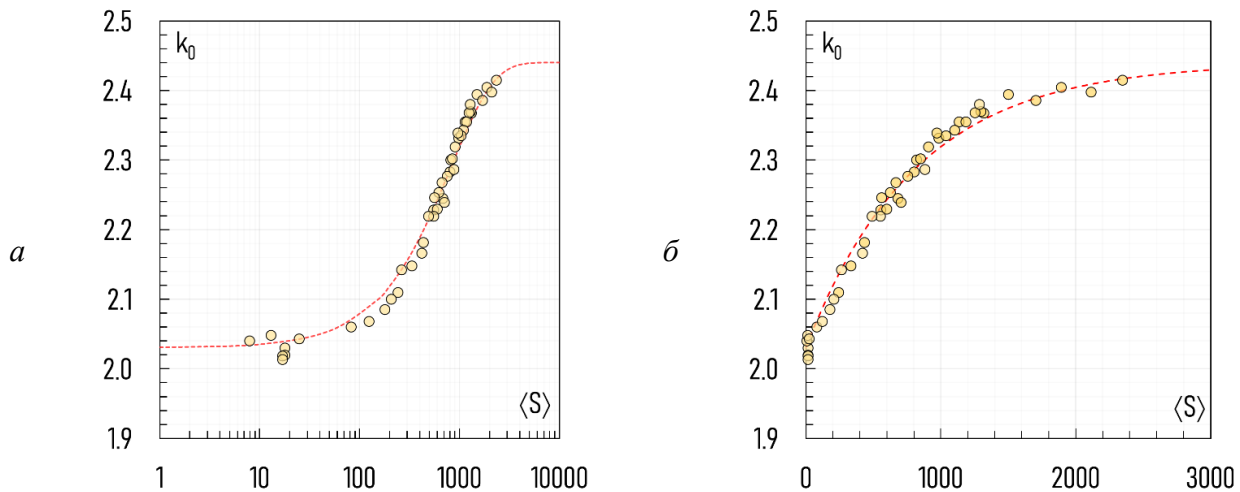


Рисунок 4 – Аппроксимация экспериментальных данных ●, полученных для различных сверхзвуковых сопел, моделью поправки (4): (а) – логарифмическая, (б) – линейная абсцисса.

Стоит отметить, выборка данных невелика, а справедливость модели продемонстрирована в узком диапазоне T_0 , геометрических параметров сопел и только для

²⁷ Горчакова Н.Г., Сквородко П.А., Ярыгин В.Н. Влияние гомогенной конденсации на газодинамику и излучение свободной струи углекислого газа // ИФЖ. – 1985. – Т.49, № 1. – С.5–10.

²⁸ Авдусевский В.С., Иванов А.В. и др. Структура турбулентных недорасширенных струй, вытекающих в затопленное пространство и спутный поток // МЖГ. – 1972. – №3. – С.15–29.

²⁹ 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.

³⁰ Korobeishchikov N.G., Skovorodko P.A., et al. Experimental and numerical study of high intensity argon cluster beams // AIP Conf. Proc. – 2014. – V.1628. – P.885–92.

аргона, ввиду чего поправку (4) нельзя считать валидированной. В то же время, следует отметить, что в присутствие конденсации зависимость (1) справедлива лишь при $\langle S \rangle < 50$.

Четвертая глава посвящена исследованию взаимодействия частиц кластированного потока с фоновым окружением. В §4.1 представлены измерения доли проникающего фонового газа P_p внутрь потока аргона с «кластерным следом» (рисунок 5) путём регистрации излучения добавленной в фоновый газ примеси азота или кислорода [24].

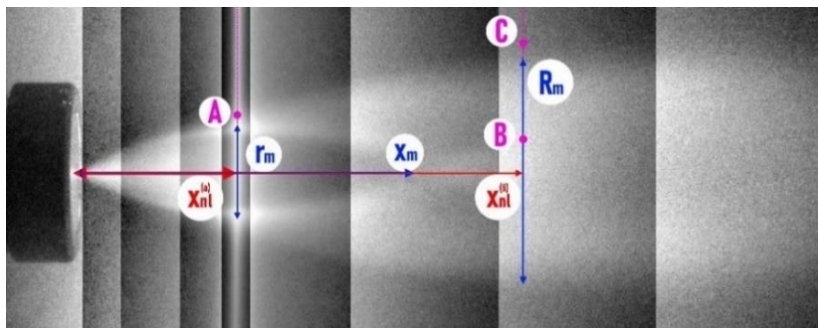


Рисунок 5 – Визуализация потока аргона. СЗС, $d^* = 0.26$ мм, $P_0 = 400$ кПа, $T_0 = 308.1$ К, $P_\infty = 2.93$ Па (Ar + N₂), $\langle S \rangle = 761$, $x_{nl} = 39.4$ (а) и 108.4 (б) мм.

Сравнение поперечных профилей P_p , принимающих за 100% постоянное значение интенсивности, фиксируемое в фоновом пространстве, для указанных на рисунке 5 сечений представлено на рисунке 6.

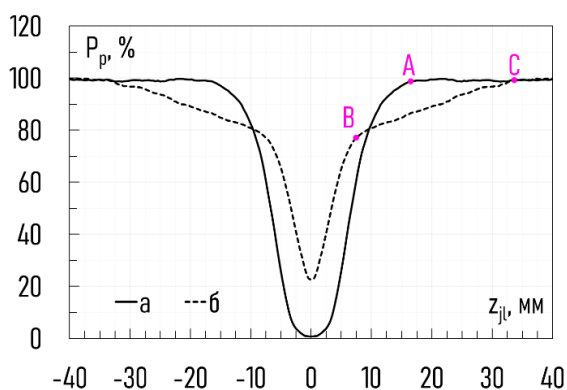


Рисунок 6 – Сравнение поперечных профилей доли проникания P_p , зарегистрированных на расстояниях $x_{nl} = 39.4$ (а) и 108.4 (б) мм от среза сопла (см. рисунок 5).

Установлено, что в области первой «бочки» (а) профиль проникания аналогичен тем, что были получены другими авторами [24]. В свою очередь, в области «кластерного следа» (б) профиль проникания имеет нестационарную точку перегиба, соответствующую границе второй «бочки», а выход профиля на 100% наблюдается лишь за границей «кластерного следа», на основе чего можно сделать вывод, что «кластерный след» представляет собой газодинамический фактор, обусловленный процессом взаимодействия фонового окружения с частицами кластированного потока. Следует отметить, что в области второй «бочки» профиль P_p не достигает 0%, что также согласуется с результатами [24].

В §4.2 рассмотрен процесс рассеяния частиц кластированного потока на фоновом газе. Для исключения влияния столкновений частиц в потоке между собой, моделирование проведено в молекулярном пучке. Ввиду рабочего диапазона масс-спектрометра, анализ произведен при регистрации атомов и кластеров малого размера (< 1000 а.е.м.). В режиме истечения аргона при формировании кластеров размера $\langle S \rangle \leq 50$ получены значения сечения рассеяния для атомов, димеров и тримеров: $\sigma = 37, 17$ и $1.7 \cdot \text{\AA}^2$, соответственно. Можно предположить, что кластеры, обладая большей массой и импульсом, при схожем числе столкновений испытывают меньшее отклонение от прямолинейного движения, ввиду чего возникает вероятность их регистрации внутри заданного телесного угла, что приводит к уменьшению регистрируемого сечения рассеяния относительно значения для мономеров.

В (3) предполагается, что σ_b неизменно при фиксированных параметрах конфигурации системы. Однако в §4.2 показано, что это значение для атомов аргона меняется при развитии процесса конденсации в потоке. На **рисунке 7** представлены измеренные значения σ_b в зависимости от $\langle S \rangle$. На начальных стадиях конденсации измеряемое значение полного сечения рассеяния является постоянной величиной $\sigma_b = 43 \pm 10 \text{ \AA}^2$ для всех исследованных режимов истечения из различных сопел, что согласуется с источниками [22-23] и данными в §2.3, однако с ростом $\langle S \rangle$ измеряемое значение σ_b уменьшается. В работе [31] показано, что при развитии конденсации количество атомов, регистрируемых детектором в молекулярно-пучковой системе на приосевой области, снижается, что является следствием газодинамического разделения частиц по массам. Этот эффект приводит к тому, что регистрируемая детектором величина A мономерного сигнала в соизмеримых пропорциях складывается из нерассеянных атомов молекулярного пучка и продуктов деструкции, образующихся при столкновении кластеров с фоновыми частицами, что в конечном итоге приводит к искажению измеряемой величины σ_b . Также отметим, что ионизация кластеров в масс-спектрометре приводит к фрагментации (деструкции) кластеров [32], что в равной степени может иметь влияние на наблюдаемый эффект.

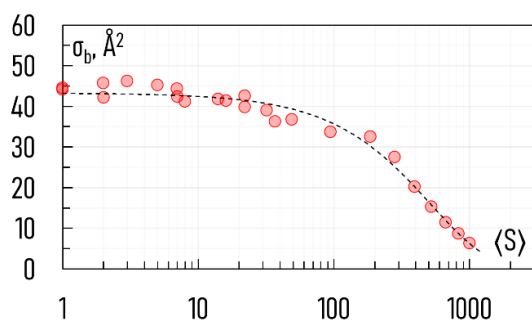


Рисунок 7 – Зависимость экспериментальных значений сечения рассеяния σ_b атомов аргона в кластированном пучке от $\langle S \rangle$.

Обнаруженные эффекты демонстрируют, что кластеры в области «кластерного следа» испытывают многочисленные столкновения с фоновыми частицами, которые приводят к их постепенной фрагментации или полному распаду.

Пятая глава посвящена исследованию характерных особенностей излучения частиц кластированного потока, инициированного электронным пучком. В §5.1 показано, что излучение в области «кластерного следа» селективно и регистрируется только вне области возбуждения. На **рисунке 8** представлены полученные поперечные профили нормированной интенсивности излучения для различных длин волн при расположении электронного пучка за первой «бочкой» струи в области распространения «кластерного следа» при смещении локализации измерений вниз по потоку от области возбуждения. Установлено, что во всём изученном диапазоне длин волн (280-900 нм) профили интенсивности излучения, регистрируемого в области с малыми временами жизни в возбужденных состояниях (*a*), являются идентичными (с учётом уширения за счёт выделения скрытой теплоты конденсации, см. §3.2). При смещении локализации измерений вниз по потоку от пучка электронов на 5 мм и более (*б-в*) профили интенсивности, зарегистрированные для различных переходов, различаются: на некоторых длинах волн регистрируется излучение в области «кластерного

³¹ Зарвин А.Е., Каляда В.В., Художитков В.Э. Особенности регистрации кластеров в сверхзвуковых недорасширенных струях методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // ТиА. – 2017. – Т.24, N.5. – С.691–702.

³² Schütte S., Buck U. Strong fragmentation of large rare gas clusters by high energy electron impact // Int. J. Mass Spectrom. – 2002. – V.220. – P.183–92.

следа», а на других – практически нет, что свидетельствует о наличии длительных релаксационных процессов [33].

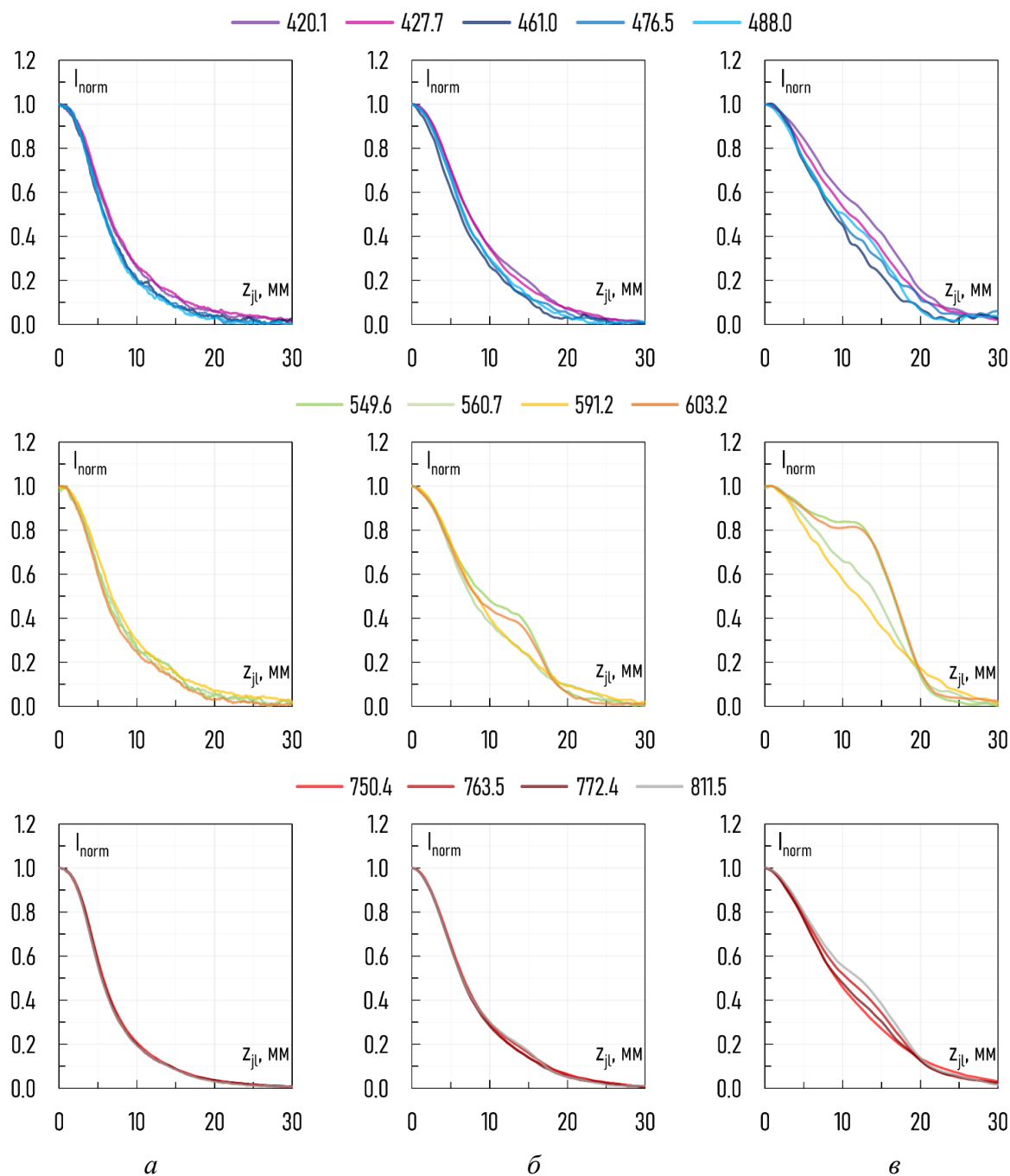


Рисунок 8 – Сравнение поперечных профилей нормированной интенсивности излучения для различных переходов аргона, зарегистрированных в потоке при расположении электронного пучка на расстоянии 93.8 мм от сопла и смещении локализации измерений относительно него на 0 (а), 5 (б) и 15 (в) мм вниз по потоку.

Показано, что наличие долгоживущих процессов релаксации и/или передачи энергии согласуется с результатами работы [34], в которой представлено описание молекулярно-кластерного механизма селективного возбуждения отдельных уровней аргона и интенсификации излучения в жёлто-зелёной части спектра.

³³ Хмель С.Я., Шарафутдинов Р.Г. Электронно-индуцированная флуоресценция кластеров двуокиси углерода (свободная струя конденсирующегося газа) // ЖТФ. – 1997. – Т.67, N.3. – С.43–52.

³⁴ Madirbaev V.Zh., Zarvin A.E., Korobeishchikov N.G., Sharafutdinov R.G. Ion-cluster reactions initiated by an electron beam in mixtures of argon with methane and monosilane // Phys. Solid State. – 2002. – V.44. – P.515-7.

В §5.2 представлены результаты измерения среднего времени жизни частиц кластированного потока в возбужденном состоянии. Установлено, что данные по исследованным переходам аргона расслаиваются на две группы, коррелирующие с результатами §5.1, с характерными временами 2.5 и 10 мкс, что не согласуется с литературными данными для атомарных частиц и может свидетельствовать о более сложном процессе релаксации энергии внутри кластеров.

В §5.3 исследовано влияние газа источника и состава атмосферы на послесвечение кластированного потока. Установлено, что «кластерный след», образующийся в потоке CO₂, аналогично оказывает сопротивление прониканию фоновому окружению, однако вместо интенсивного послесвечения в видимой и УФ областях спектра демонстрирует затемнение, что свидетельствует об отсутствии канала передачи энергии в излучательные переходы. Для изучения влияния состава атмосферы на послесвечение потока аргона были проанализированы режимы истечения с идентичными начальными параметрами при добавлении в фоновое пространство различных примесей (**рисунок 9**).

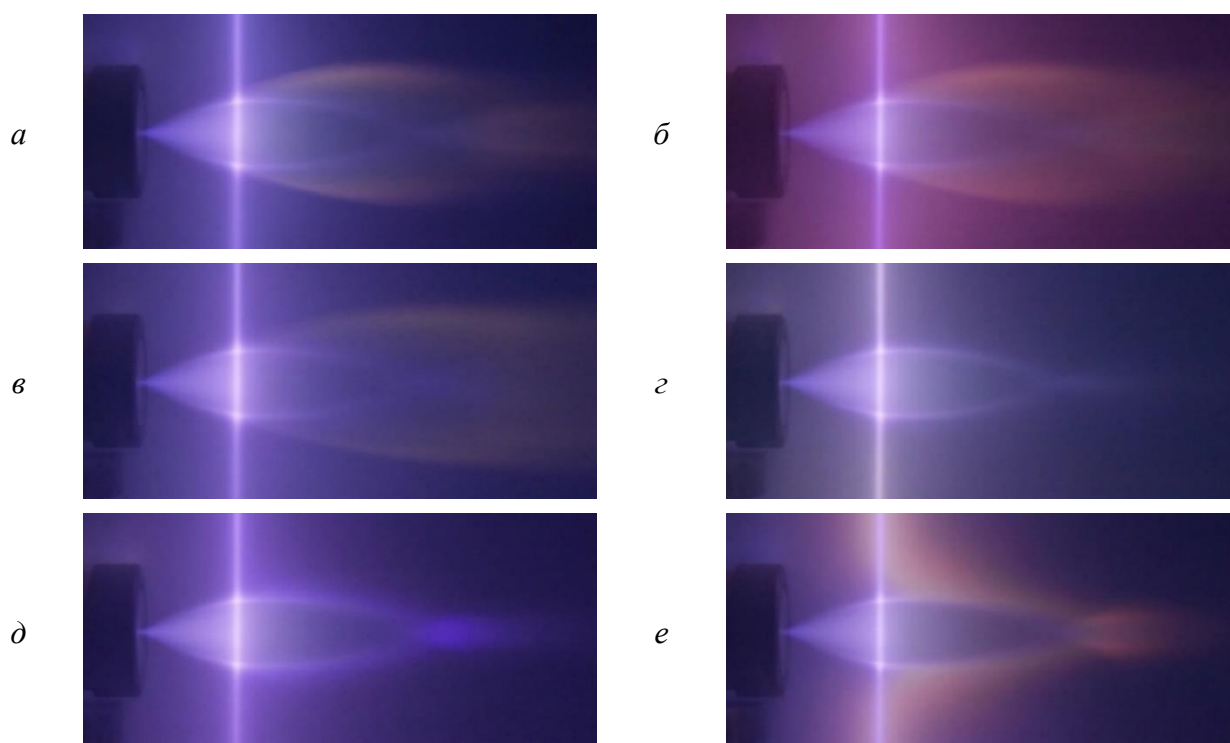


Рисунок 9 – Визуализация кластированного потока аргона при истечении в атмосферу различного состава: (а) – Ar, (б) – Ar+N₂, (в) – Ar+He, (г) – Ar+O₂, (д) – Ar+CH₄, (е) – Ar+CO₂. СЗС, $d^* = 0.26$ мм, $P_0 = 600$ кПа, $P_\infty = 4.7$ Па, $T_0 = 320.1$ К, $\langle S \rangle = 1359$.

Установлено, что при истечении кластированного потока аргона в атмосферу различного состава наблюдается не только изменение цвета и интенсивности послесвечения «кластерного следа» (б, в), но и его гашение в видимом диапазоне (г – е), что подтверждается спектральными измерениями. Примечательно, что ввиду различия в эффективности рассеяния, при истечении в атмосферу различного состава наблюдается изменение размеров потока при идентичных начальных параметрах, что согласуется с высказанными в третьей главе предположениями.

На основе полученных данных сделан вывод, что наблюдаемое в «кластерном следе» длительное послесвечение обусловлено взаимодействием кластеров с частицами фоновое пространства. В §5.4 проанализированы возможные варианты протекающих реакций энергообмена, в результате чего выделен двустадийный процесс столкновительного

энергообмена с передачей энергии от возбужденного кластера атому или молекуле фонового газа, удовлетворяющий всем полученным в работе результатам:



При этом наиболее вероятные энергии, передаваемые от кластеров к фоновым частицам, соответствуют переходам аргона в диапазоне длин волн от 500 до 600 нм. Данный процесс позволяет объяснить установленные в §3.1 условия наблюдения послесвечения «кластерного следа» при вариации начальных параметров истечения. При увеличении P_0 интенсивность послесвечения увеличивается, т.к. растёт вероятность столкновения частиц фонового окружения с частицами «кластерного следа». С ростом P_0 интенсивность послесвечения возрастает, т.к. с приращением доли конденсата увеличивается число кластеров, проходящих висячие скачки. В то же время, с ростом P_0 увеличивается размер потока и линейное число Рейнольдса Re_L , что приводит к «изолированности» струи от фонового газа, ввиду чего рост интенсивности послесвечения непропорционален. В свою очередь, при увеличении T_0 , вместе с размерами «кластерного следа» уменьшается также и интенсивность его послесвечения, т.к. при постоянном значении Re_L вместе с уменьшением вероятности преодоления висячих скачков уменьшается и вероятность передачи энергии фоновым частицам. В то же время, исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что процесс энергообмена может быть значительно сложнее представленного варианта, в связи с чем целесообразно в дальнейшем на качественном и количественном уровне описать процесс энергообмена, излучения и гашения флуоресценции, что может являться объектом дальнейших работ при тесном взаимодействии исследователей экспериментального и теоретического профиля.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Осуществлена модернизация универсального газодинамического стенда ЛЭМПУС-2 отдела прикладной физики ФФ НГУ для проведения измерений в кластированных разреженных газовых потоках: адаптированы методики визуализации и количественных измерений численной плотности, температуры и полного сечения рассеяния частиц, разработано и сформировано два варианта оптического тракта со специальными затеняющими экранами, исключающими возможность регистрации фоновых шумов, произведено переоборудование системы вакуумной откачки, изготовлен комплект звуковых и сверхзвуковых сопел различных конфигураций, создана и установлена система вариации температуры торможения, установлена система натекания для вариации состава фонового окружения. Средства диагностики, основанные на методиках, взятых из литературных источников, валидированы в условиях пренебрежимо малой конденсации и апробированы в условиях истечения кластированных сверхзвуковых потоков различной степени разрежения.
2. Впервые обнаружено, что в условиях развитой конденсации за пределами струи образуется вторичный поток больших размеров («кластерный след»), обладающий уникальным послесвечением при инициации излучения электронным пучком, обусловленный прохождением кластеров через висячие скачки веретенообразной струи.
3. Предложена эмпирическая поправка, учитывающая влияние конденсированной фазы на геометрию сверхзвуковой недорасширенной струи.
4. Продемонстрировано, что частицы «кластерного следа» оказывают сопротивление прониканию фонового окружения внутрь струи. Установлено, что при рассеянии частиц кластированного потока на частицах фонового газа происходит фрагментации кластеров и формирование вторичного потока «кластерного следа».
5. Впервые обнаружен эффект селективности излучения, наблюдаемого в «кластерном следе», при возбуждении частиц потока электронным пучком. Установлено, что измеренные

времена жизни частиц кластированного потока в возбужденном состоянии отличаются (в большую сторону) от табулированных, определённых в равновесных условиях. Выявлено влияние состава фонового окружения на послесвечение «кластерного следа». Предложена эмпирическая модель процессов возбуждения, релаксации, энергообмена и излучения, протекающих в «кластерном следе».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 // ПМТФ. – 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 // ПЖТФ. – 2020. – Т.46. – №.7. – С.32–5.
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.247–65.
5. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. The influence of condensation on the supersonic flow sizes // ПЖТФ. – 2022. – Т.48. – №.12. – С.36-9.
6. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Горбачев Ю.Е., Яскин А.С., Каляда В.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 // ТиА. – 2023. – Т.2. - №.2. – С.227–37.
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 // ПМТФ. – 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 Dyn. – 2023. – V.58. – №.8. – P.1668–83.
12. Зарвин А.Е., Дубровин К.А., Бондарь Е.А., Ярков Л.В. и др. Экспериментальное и численное моделирование истечения сверхзвуковых струй в разреженную среду. Часть 1: течения без влияния конденсации // ФХКГД. – 2024. – Т.25. – №.2. – С.1–20.
13. Dubrovin K.A., Yarkov L.V., Zarvin A.E., Zaitsev A.V., et al. Numerical and Experimental Simulation of Supersonic Gas Outflow into a Low-Density Medium // Aerospace. – 2024. – V.11. – №.11. – P.905.

Подписано в печать «__» _____ 202__ г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1.0.

Тираж 100 экз., заказ № _____.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1