

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-02-08016 и 15-02-09130.

Литература

1. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
2. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961.
3. Ганичев Д.А. и др. // ЖТФ. 1965. Т.35, №5. С.813.
4. Бляхман Л.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т.43, №11. С.1004.
5. Вихарев А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54, №12. С.908.
6. Вихарев А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т.57, №7. С.580.
7. Иляков Е.В. и др. // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXII научно-технической конференции, 26 сентября – 4 октября 2015 г., Феодосия. С.41.
8. Иляков Е.В., Кулагин И.С. // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54, №10. С.758.
9. Иляков Е.В. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т.52, №12. С.979.
10. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkeley Res. Assoc., 1992.
11. Александров А.Ф. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника: Сб. научн. тр. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. Вып. 3. С. 219.

Определение степени проникновения фонового газа в сильнонедорасширенную сверхзвуковую струю методом электронно-пучковой спектроскопии

К.А.Дубровин, А.Е.Зарвин, В.В.Каляда, А.С.Яскин
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул.Пирогова, 2
e-mail: akdubr@gmail.com

В процессе изучения струй аргона за сверхзвуковыми соплами при истечении в разреженное пространство в условиях развитой конденсации было обнаружено резкое изменение структуры, формы и состава струи. В данной работе получены и проанализированы спектры излучения аргона в кластированных сверхзвуковых струях, а также определена степень проникновения фонового газа с помощью спектрального анализа излучения частиц потока.

Degree determination of the background gas penetration into a highly imperfectly expanded supersonic jet by electron-beam spectroscopy. K.A.Dubrovin, A.E.Zarvin, V.V.Kalyada, A.S.Yaskin. In the process of studying argon jets behind supersonic nozzles after expiration into a rarefied space under conditions of developed condensation, a sharp change in the structure, shape, and composition of the jet was observed. The emission spectra of argon in clusters of supersonic jets were obtained and analyzed. The degree of background gas penetration by spectral analysis of the radiation of stream particles was determined.

1. Введение

Образующиеся в процессе конденсации газа в условиях адиабатической изоляции ассоциаты получили название «кластеры» [1]. Газы обладают разной степенью конденсации в сверхзвуковых струях. Кластеры, в свою очередь, обладают разными физическими и химическими свойствами, вследствие чего кластированный поток также обладает уникальными свойствами, собственным составом и структурой.

Вопрос проникновения фонового газа внутрь сформированной сверхзвуковой струи исследуется уже давно [2,3], в том числе с помощью молекулярно-пучковой масс-спектрометрии [4]. Учитывая тот факт, что процесс конденсации вносит значительные

изменения в структуру кластированного потока, представляет интерес изучить его более подробно. В данной работе будет использоваться спектральный анализ излучения потока при электронно-пучковой ионизации.

Отличительной особенностью потоков, содержащих кластеры больших размеров, является образование так называемого «следа»: начиная примерно с середины первой «бочки» наблюдается расширяющийся слабо светящийся поток, также имеющий форму «бочки», но значительно, в несколько раз, превышающий размеры типичной сверхзвуковой веретенообразной струи – первой «бочки». Это явление отчётливо наблюдается при фотографировании свечения потока при ионизации электронным пучком. На рис.1 приведен пример визуализации струи аргона, истекающей из сверхзвукового сопла, электронным пучком. Для наглядности размытые скачки уплотнения первичной бочки, а также более широкого «следа» оконтурены сплошными белыми линиями. В данном режиме электронный пучок находил в области перекрестия боковых ударных скачков. Однако, причины такого излучения до сих пор установлены не были. Высказывались различные варианты объяснения данного явления: поток ионизованных кластеров с люминесценцией долгоживущих состояний, поток возбуждённых кластеров с внутрикластерным энергообменом с передачей энергии отдельным атомам, вылетающим из кластера и др. Однако, вполне вероятным является возможность столкновения возбуждённых кластеров с нейтральными частицами фона. Поэтому представляет интерес изучение возможности и условий проникновения фонового газа в сверхзвуковую струю с кластерами.

Для кластеризации сверхзвукового потока необходимо подавать газ при достаточно высоких давлениях торможения (в настоящей работе $P_0 = 0.4$ МПа). Однако, в связи с ограничениями откачных вакуумных систем, для эксперимента было использовано сверхзвуковое сопло малого сечения, что привело к уменьшению физических размеров струи. С целью увеличения этого размера возникла необходимость создания более высокого вакуума в камере расширения. При увеличении отношения давления торможения $P_{0к}$ фоновому давлению P_h и, соответственно, уменьшению числа Рейнольдса Re_L , боковые скачки ударных волн получаются размытыми, а фоновый газ начинает проникать внутрь струи. Очевидно, кластеры больших размеров в этих условиях без затруднения преодолевают зону смешения, образуя «след».

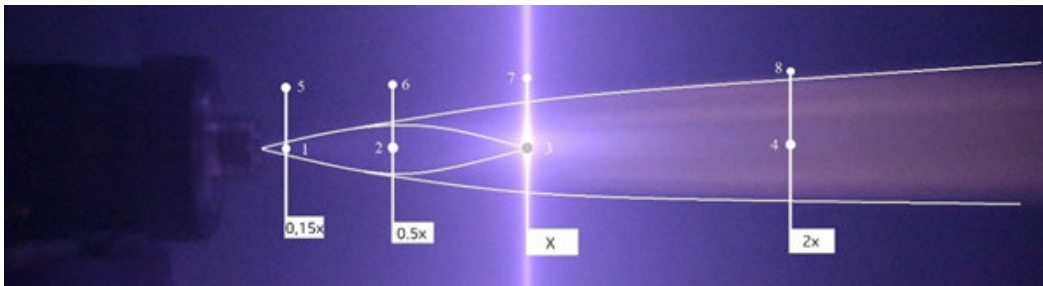


Рис.1. Визуализация струи аргона электронным пучком с обозначением локальных точек измерений.

2. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Работа выполнена на газодинамическом стенде ЛЕММПУС-2, устройство которого подробно описано в [5]. Оптическая система, используемая для достижения поставленных задач, позволяет регистрировать спектры излучения потока непосредственно в месте ионизации потока (рис.2). Сверхзвуковое сопло (1), расположено на координатном механизме (2) внутри камеры расширения (3), в которой в данной работе поддерживалось постоянное фоновое давление $P_h = 2,6$ Па. Вакуумная камера оснащена системой натекания, обеспечивающей изменение состава фонового газа за счёт добавления к остаточному давлению рабочего газа струи любого иного газа. Контроль за процентным соотношением газа в фоне осуществлялся с помощью масс-спектрометра. Электронный источник (4) обеспечивал хорошо сфокусированный электронный пучок с энергией электронов до 10 кэВ при токе до 100 мА, позволяющий ионизировать газовый поток в выбранном участке струи. Вакуумная камера оборудована кварцевым оптическим окном (5), через которое производилось наблюдение за

процессом излучения. За оптическим окном на рельсе установлена короткофокусная кварцевая линза (6), фокусирующая изображение исследуемого участка струи на щель спектрометра (7). Юстировка оптического тракта производилась с помощью координатного механизма спектрометра (8).

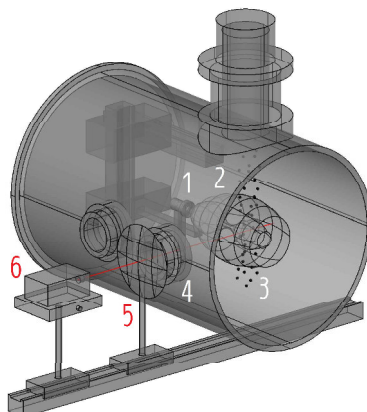


Рис.2. Схематический рисунок оптической схемы измерений.

Для проведения спектральных измерений выбраны несколько локальных областей в газовом потоке, изображенных на рис. 1 белыми точками. Струя газа за сверхзвуковым соплом образует первую «бочку» с веретенообразной структурой, замыкаемой сходящимися боковыми ударными волнами в X-образную конфигурацию. Расстояние между выходным срезом сопла и X-образной конфигурацией обозначим за $1x$. Измерения в данной работе проводились на расстояниях $0,15x$, $0,5x$, $1x$ и $2x$.

Локальная область (1) находится вблизи сопла, где плотность газового потока высока. Следует отметить, что возможность нагрева сопла электронным пучком практически исключена, т.к. ширина пучка значительно меньше расстояния до сопла. В этой области, предположительно, можно пренебречь проникновением фонового газа внутрь потока. Область (2) позволит оценить степень проникновения фонового газа внутрь первичной струи. Область (3) расположена в перекрестии боковых ударных волн, где происходит максимальная фрагментация кластеров, а область (4) – в «следе».

Для оценки проникновения фонового газа на ось струи аргона в фоновый газ подмешивались азот или кислород. Спектры, зарегистрированные на разных расстояниях от сопла, анализировались на наличие известных линий азота и кислорода (рис.3). Здесь, а также на последующих рисунках для наглядности сравнения спектры сдвинуты друг относительно друга по оси длин волн на 2 нм в сторону. Для выявления особенностей на спектрах была произведена их нормировка на интенсивный пик аргона, свободный от излучения примесей.

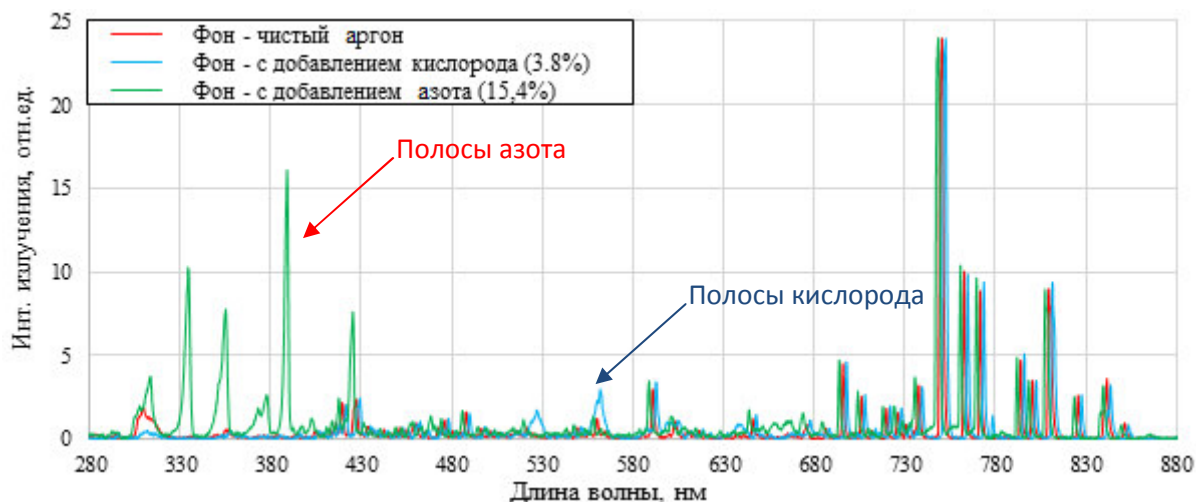


Рис.3. Сравнение спектров фонового газа при добавлении различных примесей.

Интенсивные полосы вблизи 521 и 559 нм, отсутствующие в спектре чистого аргона, проявляются при добавлении в фоновый газ кислорода. При добавлении азота в фоновый газ проявляются характерные полосы вблизи 336, 357, 391 и 427 нм. Регистрация вклада фоновой примеси в излучение потока позволила оценить величину проникновения.

3. Анализ экспериментальных данных

В работе исследовано взаимодействие кластированных сверхзвуковых струй с фоновым газом в предположении, что кластеры по длине струи и за пределами первой бочки имеют разный размер и по-разному могут влиять на процесс проникновения фоновых газов [5-7].

На рис.4 приведено сравнение спектров излучения сверхзвукового газового потока в фоновом газе с различными примесями на расстоянии 0,15х от сопла. Можно заметить, что полосы азота и кислорода в данных спектрах не наблюдаются. Следовательно, проникновение фоновых газов на 0,15х пренебрежимо мало.

При сравнении спектров излучения на расстоянии 0,5х от сопла (рис.5) в струе аргона с добавлением в фоновый газ примеси и при её отсутствии, обнаружены две полосы (на 336 и 357нм) азота. Несмотря на то, что интенсивность этих полос в сравнении с линиями аргона увеличилась в два раза, данный прирост можно считать незначительным, т.к. он ничтожно мал в сравнении с сильными линиями аргона, не приведенными на данном участке спектра.

Следовательно, проникновение фоновых газов в данную часть струи, по-видимому, несущественно. Аналогичная картина наблюдается и в точке пересечения боковых ударных волн.

Однако, в отличие от первой «бочки», в области распространения «следа» плотность потока значительно ниже. Следовательно, фоновый газ способен проникать внутрь «следа», участвуя в процессах излучения потока.

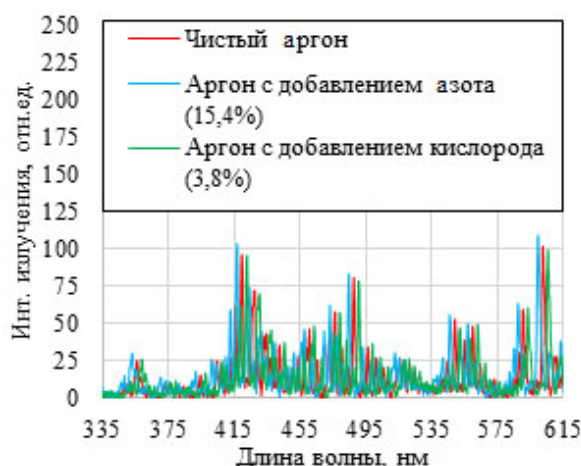


Рис.4. Сравнение спектров излучения газового потока на расстоянии 0,15х.

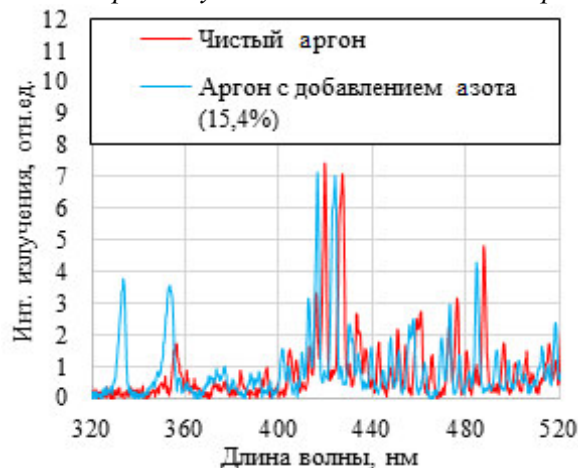


Рис.5. Сравнение спектров излучения газового потока на расстоянии 0,5х.

Для количественной оценки проникновения была проведена серия экспериментов, в ходе которых примесь добавлялась не фоновый газ, а в истекающий из сверхзвукового сопла. Для сопоставления данных экспериментов с предыдущими в истекающий из сопла газ была добавлена примесь в том же процентном соотношении (для азота - 15,4-84,6%, для кислорода – 3,8-96,2%).

При добавлении примесей азота и кислорода в истекающий газ можно сделать несколько допущений. Во-первых, примесные газы не оказывают существенного влияния на конденсацию аргона, поскольку конденсируются значительно хуже аргона. Это означает, что в такой струе рождаются только аргоновые кластеры больших размеров. Во-вторых, малые примеси не меняют газодинамику истечения одноатомного газа. В ходе проведения эксперимента было установлено, что размеры струй в обоих случаях совпадали, что подтверждает данное предположение. В-третьих, состав смеси газов в фоне одинаков в обоих вариантах режимов течений: при истечении смеси аргона с азотом или кислородом, и при истечении чистого аргона в смесь аргона с азотом или кислородом. Данный факт подтверждают показания масс-спектрометра, фиксирующего процентное отношение фонового газа на протяжении всего эксперимента. И, наконец, в-четвертых, процентный состав примеси в струе сохраняется на всём протяжении струи. Это предположение можно допустить только в случае пренебрежения процессами разделения частиц по массам. Однако, исходя из того, что основное разделение идёт между кластерами и мономерами, то между мономерами аргона и азота или кислорода это процесс является второго порядка малости.

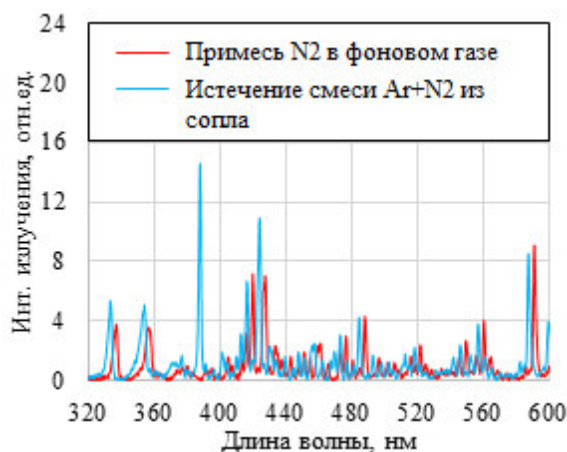


Рис. 6. Сравнение спектров излучения газового потока с примесью N_2 на расстоянии $0,5x$.

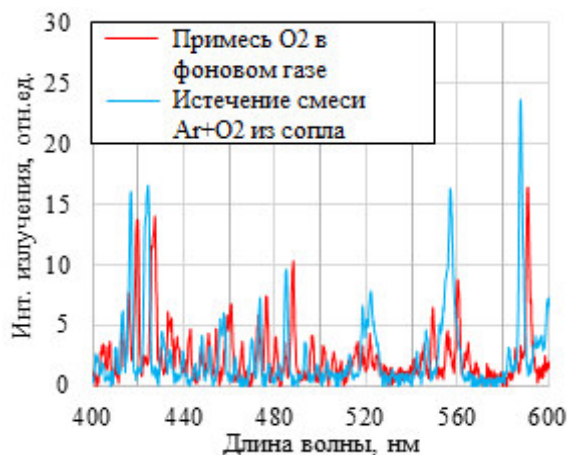


Рис. 7. Сравнение спектров излучения газового потока с примесью O_2 на расстоянии $1x$.

В рамках приведённых допущений были выполнены измерения с истекающей примесью вместе с рабочим газом из сопла. При сравнении спектров излучения потока смеси со спектрами, представленными на рис.4-5, установлено, что излучение примеси азота в спектре при истечении смеси из сопла не только усиливается на полосах, обнаруженных при рассмотрении проникновения фонового газа, но и обнаруживается на других длинах волн (например, в полосе 391 нм) (рис. 6). Это означает, что данные процессы не являются аналогичными, и что энергообмен в потоке смеси происходит иным образом.

При добавлении в истекающую смесь кислорода, спектр струи меняется более существенно (рис. 7): несмотря на малую долю в аргоне по сравнению с азотом, не только зарегистрированы более интенсивные полосы 560 и 591 нм, но и обнаружено изменение интенсивностей отдельных линий аргона.

Обнаруженные при этих сравнениях особенности не только подтверждают факт отличия излучения статичного фонового газа от излучения потока, но и иллюстрируют влияние примеси на излучение разреженной струи.

4. Выводы

На основании полученных данных можно сделать некоторые выводы относительно вида и структуры кластированной струи, а также относительно излучения потока. В ходе проведения эксперимента было обнаружено отличие в излучении примесей при добавлении в статичный фоновый газ и при истечении примеси из сверхзвукового сопла. Также было детектировано малое проникновение фонового газа внутрь первой бочки. Стоит отметить, что в условиях развитой конденсации и образования кластеров больших размеров, можно констатировать факт меньшего проникновения фонового газа в кластированный поток в сравнении с мономерным [2.3]. Однако, причины и механизмы, вызывающие интенсивное излучение в «следе» в присутствии кластеров большого размера по-прежнему требуют более детальных исследований.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Программе развития конкурентоспособности "5-100" и договора № Ф-340-16.

Литература

1. Сидоров Л.Н. «Молекулы, ионы и кластеры в газовой фазе» // СОЖ, ХИМИЯ. 2000.
2. Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г. Диффузионные процессы в зоне смешения сверхзвуковой струи низкой плотности // ПМТФ. 1973. Вып.1. С.121-127.
3. Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г. О структуре высоконапорных струй низкой плотности за сверхзвуковым соплом // ПМТФ. 1975. Вып.2. С.42-52.
4. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Коробейщиков Н.Г., Ходаков М.Д. Особенности масс-спектрометрии метановых и метаносодержащих кластеров в сверхзвуковых молекулярных пучках // Наноинженерия. 2014, № 1 (31), с. 3-6.
5. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., Korobeishchikov N.G., Khodakov M.D., Yaskin A.S., Khudozhnikov V.E., Gimelshein S.F. Condensable Supersonic Jet Facility for Analyses of Transient Low-Temperature Gas Kinetics and Plasma Chemistry of Hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827.