

Измерение вращательной температуры азота в кластированной сверхзвуковой струе

Т.С. Яковлева, С.В. Автаева, В.В. Каляда, А.Е. Зарвин
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2
e-mail: Jade_95@mail.ru

В работе исследуются распределения вращательной температуры сверхзвуковых кластированных струй молекулярного азота, истекающих в затопленное пространство. Сверхзвуковые струи формируются соплами с критическими сечениями 0.17 и 0.215 мм. Струя активируется электронным пучком с энергией 10 кэВ, рабочий диапазон токов 30-40 мА. В результате измерений получены распределения вращательной температуры в продольном и в поперечном направлениях. Получена зависимость от давления в форкамере сопла.

Rotational temperature measurement in the supersonic cluster gas jet of the molecular nitrogen. T.S. Yakovleva, S.V. Avtaeva, V.V. Kalyada, A.E. Zarvin. The distributions of the rotational temperature of the supersonic jets with clusters formation of molecular nitrogen flowing into the flooded space are investigated. Supersonic jets are formed by nozzles with critical cross-sections of 0.17 and 0.215 mm. The jet is activated by an electron beam with the energy of 10 keV, the operating range of currents is 30-40 mA. Rotational temperature distributions in the longitudinal and transverse directions are obtained. The pressure dependence in the nozzle chamber is obtained.

Введение

В настоящее время сверхзвуковые струи применяются для обработки поверхностей [1-2] (полировка, чистка, травление), в плазмохимии, в проектировании ракетных двигателей и т.д. Таким образом изучение характеристик сверхзвуковых кластированных струй, в том числе температуры, от которой зависит процесс конденсации, актуально в связи с широким спектром их технологического применения.

Сверхзвуковая струя представляет собой многоблочную структуру, образованную системой ударных волн, формируемых в ходе истечения газа. На расстоянии, определяемом параметрами сопла, сортом газа (определяющими значение коэффициента k), соотношением давлений в форкамере сопла (P_0) и фона (P_h) и диаметром критического сечения сопла (d^*), располагается точка х-образности (в некоторых случаях – диск Маха), в которой испытывают скачок термодинамические параметры газа: температура, плотность, давление [2-3]:

$$X_M = k \sqrt{\frac{P_0}{P_h}} d^*$$

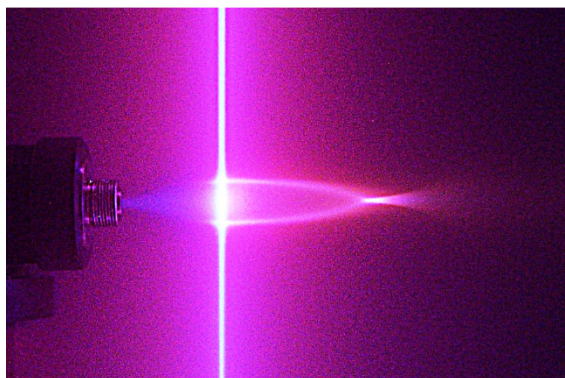


Рис. 1. Фотография сверхзвуковой струи, визуализированной электронным пучком, для сопла с диаметром критического сечения $d^*=0.215$ мм. Давление в форкамере сопла 0.6 МПа.

Процесс истечения газа из сопла является адиабатическим, в результате чего газ охлаждается до низких температур, при которых начинается конденсация и формирование

кластеров различных размеров. В работе для оценки наличия кластеров использовался параметр, предложенный Хагеной [4]:

$$Г^* = \frac{P_0 [\text{мбар}] d_{eq}^{0.85} [\text{мкм}]}{T_0^{2.29} [\text{К}]} K_{ch},$$

где K_{ch} – коэффициент, зависящий от сорта газа, для азота согласно [5] $K_{ch}=528$; T_0 – температура в форкамере сопла; d_{eq} – эквивалентный диаметр сопла [5].

Методика

Для определения вращательной температуры газа использовалась R-ветвь (0-1) полосы 1-ой отрицательной системы молекулярного азота. Этой системе соответствует переход из возбуждённого состояния молекулярного иона азота $N_2^+(B^2\Sigma_u)$ в основное состояние молекулярного иона $N_2^+(X^2\Sigma_g)$. Для разрешения тонкой вращательной структуры спектра полоса регистрировалась с щелью спектрометра 30 или 50 мкм. Диапазон токов 30-40 мА выбран исходя из влияния вторичных эффектов на процесс возбуждения. Были проведены измерения интенсивностей вращательных линий в зависимости от тока пучка. Полученные данные показали, что, начиная с 50 мА, интенсивность в зависимости от тока ведет себя нелинейным образом. Также известно, что зависимость между интенсивностью спектральных линий и током пучка сохраняется линейной вплоть до плотностей газа, равных $n=10^{16} \text{ см}^{-3}$ [6]. В данной работе плотности не превышали 10^{15} см^{-3} .

По методике, разработанной Мюнцем [7], устанавливалась связь между интенсивностями вращательных линий в возбужденном состоянии молекулярного иона с интенсивностями в основном состоянии молекулы азота. Таким образом, если заселенность уровней подчиняется статистике Больцмана и не происходит заметного отклонения от равновесного распределения, зависимость логарифма интенсивности вращательной линии от энергии линейная [7]. По наклону получаемых прямых определялась вращательная температура газа. Температура основного состояния молекулы азота определялась методом последовательных приближений.

Оборудование

Эксперименты проводились на газодинамическом комплексе ЛЭМПУС-2, разработанном в отделе прикладной физики физического факультета Новосибирского государственного университета [8]. Комплекс представляет из себя многомодульную структуру, каждый модуль которой имеет свою откачную систему. На установке откачка осуществляется форвакуумными, турбомолекулярными и криогенными насосами. Для регистрации спектров использовался спектрометр ДФС-452. Излучение подводилось к щели спектрометра с помощью световода. Исследования проводились при различных давлениях в форкамере сопла (0.1 – 0.6 МПа). Параметры экспериментов и используемых сопел представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики используемых сопел.

Сопло	Длина (l), мм	Критическое сечение (d^*), мм	Выходное сечение (D), мм
Сверхзвуковое I	8.2	0.17	2.4
Сверхзвуковое II	17.5	0.215	3.5

Таблица 2. Параметры экспериментов, n_h – плотность фонового газа.

Сверхзвуковое I					Сверхзвуковое II				
P_0 , МПа	P , Па	$n_h, 10^{14} \text{с}^{-3}$	Γ^*		P_0 , МПа	P , Па	$n_h, 10^{14} \text{см}^{-3}$	*	
0.1	0 .35	0.84	35	5	0.2	0 .93	2.25		199
0.2	0 .66	1.6	71	0	0.4	3 .87	9.34		397
0.4	1 .4	3.54	14	21	0.4	3 .08	7.44		
0.6	3 .59	8.66	21	31	0.4	3 .01	7.28		

Результаты и выводы

Проведены измерения вращательной температуры азота в продольном (в зависимости от расстояния от среза сопла) и поперечном направлениях. Как можно видеть из рис. 2, вращательная температура падает с увеличением расстояния до сопла, однако с точек $x/d_* \sim 75$ начинается значительный рост температуры вплоть до $x/d_* \sim 350$, соответствующего смыканию боковых скачков уплотнения («точка х-образности»). При дальнейшем продвижении от среза сопла струя вновь начинает расширяться, формируя вторую бочку с соответствующим падением температуры.

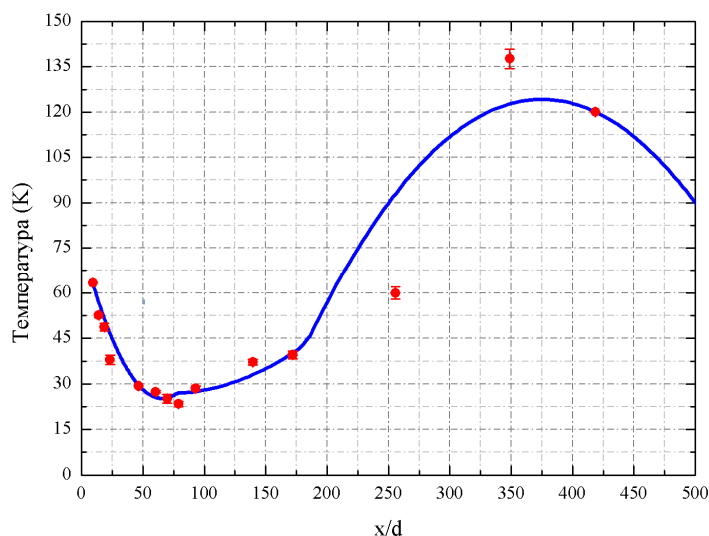


Рис. 2. Распределение вращательной температуры вдоль оси струи для сверхзвукового сопла I ($d_* = 0.215$ мм). Давление в форкамере сопла $P_0 = 0.4$ МПа, давление фона $P_h = 3$ Па.

При истечении газа из сопла на температуру в струе оказывает влияние фоновый газ, проникая через размытые боковые скачки уплотнения. Характеристическим параметром в данном случае является число $Re_L = Re_* / (P_0/P_h)$ [9]. Re_* число Рейнольдса, рассчитанное в точке критического сечения сопла. При данных условиях $Re_L \sim 35$, что соответствует режиму течения, в котором фоновый газ проникает внутрь струи.

Пример изучения распределения температуры газа вдоль оси струи в зависимости от давления в форкамере сопла, т.е. от условий конденсации, приведен на рис. 3. Эксперименты были проведены при четырех давлениях: 0.1, 0.2, 0.4 и 0.6 МПа, использовалось сверхзвуковое сопло I с диаметром критического сечения $d_* = 0.17$ мм. Полученные зависимости представлены на рис. 3. Приведенные распределения вращательной температуры газа вдоль

струи для давлений 0.2-0.6 МПа имеют схожий вид, также наблюдается рост температуры с увеличением давления в форкамере сопла.

При давлении в форкамере сопла равном 0.6 МПа могут образовываться кластеры большего размера, в отличие от более низких давлений. Кроме того, с ростом давления в форкамере сопла увеличивается доля конденсированных молекул, что увеличивает температуру газа. Как видно на графике, с ростом давления температура газа в струе возрастает. При давлениях в форкамере сопла равных 0.4 и 0.2 МПа в струе азота имеет место ранняя стадия конденсации, при которой доля выделяющегося при конденсации тепла незначительна. Поэтому в этих режимах уровень температуры определяется газодинамическим расширением и проникновением тёплого газа из окружающего пространства (согласно оценкам, число Рейнольдса в этих режимах находится в пределах от 9 до 20). В то же время при давлении 0,6 МПа, несмотря на меньшее проникновение фонового газа в струю, температура существенно выше, что свидетельствует о более интенсивной конденсации.

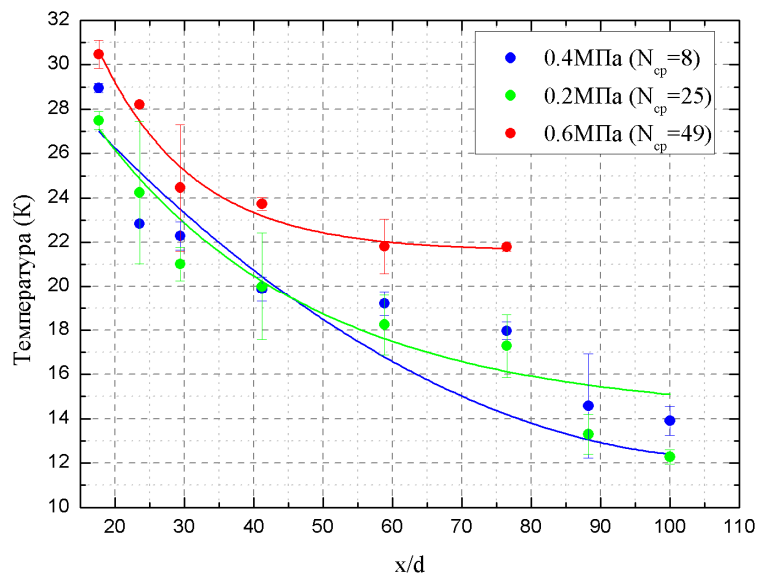


Рис. 3. Распределение вращательной температуры молекул азота вдоль струи. Измерения проведены для четырех различных давлений в форкамере сопла. В скобках указан средний размер кластеров, оцененный по формуле Хагены.

Таким образом, измерения вращательной температуры с помощью электронно-пучковой спектроскопии позволяет получать информацию о температуре в сверхзвуковых потоках конденсирующихся газов при истечении из сверхзвуковых сопел, т.е. в условиях, когда различие между поступательной и вращательной температурами можно пренебречь, а заселённость вращательных уровней не отличается от Больцмановской.

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. Коробейщиков Н.Г., Николаев И.В., Роечко М.А., Каляда В.В. Сверхгладкая полировка поверхности ионно-кластерным пучком аргона // Передовые материалы – 2016: синтез, обработка и свойства наноструктур: материалы Российско-Японской международной конференции. 30 октября – 3 ноября, 2016 / НГУ, Новосибирск, с. 105, 2016.
2. Ashkenas H., Sherman F.S. // Rarefield Gas Dynamics. 4th International Symposium. Academic Press, vol. 2, 1966.

3. Franquet E., Perrier V., Gibout S., Bruel P. Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review // Progress in Aerospace Science, pp.25-53, 2015.
4. Hagen O. F. Nucleation and Growth of Clusters in Expanding Nozzle Flows // Surface Science, vol. 106, issues 1–3, pp. 101-116, 1981.
5. Smith R.A., Ditmire T., and Tisch J. W. G. Characterization of a cryogenically cooled high-pressure gas jet for laser/cluster interaction experiments // Review of scientific instruments, vol.69, 1998.
6. Mohamed A.K., Bonnet J., Larigaldie S., Pot T., Soutade J., Diop B. Electron beam fluorescence in hypersonic facilities // Optical diagnostics of flows. Aerospace Lab, Issue 1, 2009.
7. Muntz E.P. Static Temperature Measurements in a Flowing Gas // The physics of fluids, vol.5, No. 1, pp. 80-90, 1962.
8. 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, vol. 45, Issue 5, pp. 819-827, 2017.
9. Н.И.Кисляков, А.К.Ребров, Р.Г.Шарафутдинов. Диффузионные процессы в зоне смешения сверхзвуковой струи низкой плотности // Прикладная Механика и Техническая Физика, No.1, с. 121-127, 1973.

Экспериментальное моделирование сильно недорасширенных сверхзвуковых струй на компактных лабораторных газодинамических установках

А.Е.Зарвин, В.В.Каляда, А.С.Яскин

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул.Пирогова, 2

e-mail: zarvin@phys.nsu.ru

Рассмотрена возможность экспериментального моделирования истечения сверхзвуковых струй из сопел космических аппаратов в условиях вариации давлений разреженной среды и разных составов газовых атмосфер на компактных малотоннажных экспериментальных установках со сравнительно низкой производительностью вакуумных откачных систем. Изложен опыт Новосибирского государственного университета по использованию различных вариантов моделирования газодинамических струй на подобных установках и предложены пути решения возникающих проблем.

Experimental modeling of highly under-expanded supersonic jets on compact laboratory gas-dynamic installations. A.E. Zarvin, V.V. Kalyada, A.S. Yaskin. The possibility of experimental simulation of supersonic jets outflow from spacecraft nozzles under the conditions of rarefied medium pressure variations and different compositions of gas atmospheres in compact low-tonnage experimental installations with a comparatively low capacity of vacuum pumping systems are considered. The experience of the Novosibirsk State University in the use of various variants of simulation of gas-dynamic jets at similar facilities is expounded. A way to solve emerging problems is suggested.

Экспериментальное моделирование истечения сверхзвуковых струй из сопел космических аппаратов в условиях разных давлений окружающей разреженной среды и разных составов газовых атмосфер является неременным атрибутом подготовки к натурным испытаниям и полётам. В этих целях широко используются крупные аэрогазодинамические установки и комплексы, сформировавшиеся ещё во второй половине прошлого столетия [1-5]. Однако сложность эксплуатации таких комплексов, необходимость больших капитальных вложений для их модернизации и оснащения современными вакуумными откачными системами и средствами диагностики, высокая стоимость каждого экспериментального пуска