

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](mailto: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

приводит к поиску более простых и дешёвых вариантов экспериментальных исследований интересных процессов.

Первым, наиболее очевидным и логичным путём решения проблемы является переход на импульсный режим истечения газового потока из сопла [6-21]. Преимущества импульсных потоков по сравнению со стационарными очевидны: возможность получения расходов газа, температур, плотностей и скоростей потоков и пучков, труднодостижимых в стационарных условиях, возможность использовать откачные вакуумные системы умеренной производительности, высокая эффективность использования дорогостоящих рабочих газов. Возможности перевода сверхзвуковой свободной струи газа в импульсный режим течения и формирования импульсного молекулярного пучка впервые были продемонстрированы в работе [6]. Переход к импульсному истечению широко используется во всём мире при формировании сверхзвуковых молекулярных пучков [22-24], в физике плазмы [25-26], экспериментах по столкновительному рассеянию пучков [7,27], изучению релаксационных процессов в свободных струях [28-29], молекулярной спектроскопии [30-31], взаимодействию молекул с поверхностью [32-33], получению и исследованию свойств молекулярных агрегатов с водородными и Ван-дер-Ваальсовыми связями [34-37], экспериментов с мощными импульсными лазерами [38-39], технологическим процессам взаимодействия сверхзвуковых потоков с поверхностью (напыление тонких плёнок, модификация поверхности: полировка, имплантация) [40-44] и др.

Известны работы по использованию импульсного процесса в исследованиях струйных течений [16]. Однако для моделирования процессов стационарного истечения сверхзвуковых струй необходимо обеспечение квазистационарных условий, т.е. условий, при которых длительность истечения  $\Delta T$  будет достаточной для формирования стационарной струи, а скорости получения информации от диагностической аппаратуры достаточно для измерения параметров в квазистационарном ядре такого импульсного потока.

Для формирования импульсного сверхзвукового потока широко используются клапаны различных модификаций с временами  $\Delta T \sim 10^{-1} - 10^1$  секунд. Поскольку время установления равновесного истечения из сопла не превышает нескольких микросекунд [45], времени свободного истечения достаточно для регистрации интересных параметров. Однако какого бы размера ни был вакуумный объём, в который истекает газ, при ограниченных скоростях вакуумной откачки давление фонового газа в такой камере неизбежно повышается, что приводит к нежелательному изменению условий истечения. Следовательно, необходимым шагом является повышение скорости срабатывания клапана, запирающего истечение из сопла, а также миниатюризация размеров сопла.

Быстродействующие импульсные газовые клапаны серийно выпускаются рядом фирм. Однако, эти клапаны, как правило, работают в узком диапазоне характеристик и формируют газовые импульсы треугольной формы и малой длительности (10-100 мкс).

В Новосибирском государственном университете разработаны импульсные газоструйные устройства, обеспечивающие возможность достижения больших (до 20 граммов в секунду) мгновенных расходов сырья. Прежде всего, это электромагнитный клапан с набором звуковых и сверхзвуковых сопел, системой энергопитания и управления, обеспечивающий истечение газа из форкамеры в течение регулируемого промежутка времени (от 150 мкс до 3 мс), с высокой скважностью (не менее 100), частотой импульсов от 1 до 10 Гц и возможностью регулирования давления торможения в широких пределах, от единиц Па до 2 МПа. Сформированные с помощью этого устройства импульсы имеют трапециевидную форму с квазистационарным ядром большой протяженности ( $\sim 1$  мс). Конструкция клапана описана в [46].

Однако, как показано в работе [47], скорость движения переднего фронта газового импульса существенно ниже предельной скорости стационарного истечения газа. С увеличением давления торможения возрастает удельный расход газа из сопла, что приводит на фиксированных расстояниях от сопла к ускорению переднего фронта газовых импульсов и соответствующему уширению импульса. В целом движение переднего фронта импульса определяется соотношением между импульсом истекающего газа и вытесняемого фонового. По мере продвижения газового импульса от источника всё большая доля истекающего газа переходит в замыкающую волну разрежения. В результате при увеличении расстояния от источника, а также при росте давления в окружающем пространстве длительность

(протяжённость) области стационарного течения уменьшается [48]. Таким образом, моделирование непрерывных струй импульсным истечением имеет существенные ограничения.

Другой способ использования экспериментальных стендов со сравнительно невысокими скоростями вакуумной откачки – миниатюризация сопел [49-50] при режимах с непрерывным истечением в течение более длительных промежутков времени – от десятков секунд до минут и часов непрерывной работы. В работах [51-52] сформулирована система параметров подобия газодинамических и геометрических параметров течения струй газа, истекающих из сверхзвуковых сопел в вакуум и в затопленное пространство с сильным недорасширением. Установлены простые зависимости для определения плотности и динамического давления в поле течения струи, позволяющие воспроизводить в модельных экспериментах значения относительного импульса и характерного угла расширения струи натурального двигателя ориентации космического аппарата, основанная на результатах комплексного исследования влияния неравновесных процессов на истечение газовых струй в вакуум [51]. Представлена методология воспроизведения в модельных экспериментах условий истечения струй ракетных двигателей с использованием струй диоксида углерода с тождественными значениями характерного угла расширения и пересчета их результатов на натурные условия истечения струй [52].

Таким образом, использование более эффективных средств вакуумной откачки: турбомолекулярных и гелиевых криогенных насосов – а также новых технологий изготовления микросопел позволяет вернуться к непрерывному истечению при моделировании космических систем. Однако миниатюризация сверхзвуковых струй требует более тщательного обеспечения локальности измерений существующими средствами диагностики. В настоящей работе рассматриваются различные способы получения информации о параметрах сверхзвуковых струй. Основное внимание уделено использованию электронно-пучковых методов: получение изображений струй по свечению, возбуждённому электронным пучком, оптической спектроскопии струй, использованию сканнера для качественных и количественных измерений продольных и поперечных полей плотности.

В качестве примера на рис. 1 приведен вид продольного сечения сверхзвуковой струи диоксида углерода с относительным импульсом газа на срезе сверхзвукового сопла порядка единицы в условиях истечения в глубокий вакуум (рис. 1,а) и в затопленное пространство (рис. 1,б).

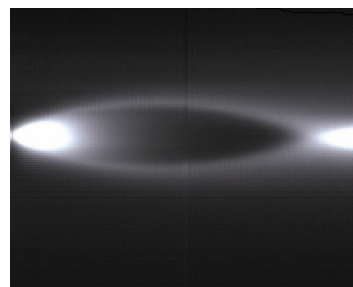
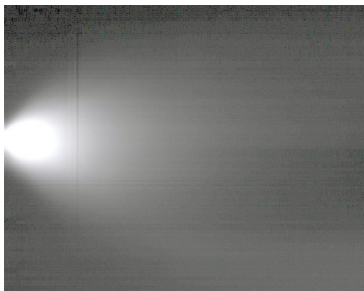


Рис. 1.а.  $P_0 = 0,7 \text{ МПа}$  ;  $P_h = 0,3 \text{ Па}$

Рис. 1.б.  $P_0 = 0,7 \text{ МПа}$ ;  $P_h = 3 \text{ Па}$

Сверхзвуковое сопло, диаметр критического сечения  $d^* = 0,26 \text{ мм}$ , длина диффузора  $L = 3,6 \text{ мм}$ , диаметр выходного сечения  $D_a = 1,6 \text{ мм}$ .

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

#### Литература

1. Бочкарев А.А., Великанов Е.Г., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г., Ярыгин В.Н. Газодинамические установки низкой плотности // В сб. "Экспериментальные методы в динамике разреженных газов". Новосибирск. Изд-во ИТФ СО АН. 1974, с. 6-23.
2. Приходько В.Г., Храмов Г.А., Ярыгин В.Н. Крупномасштабная криогенно-вакуумная установка для исследования газодинамических процессов // Приборы и техника эксперимента. 1996, № 2, с. 162–164.

3. Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Ярыгин И.В., Приходько В.Г., Ярыгин В.Н. Моделирование в вакуумных камерах процессов внешнего загрязнения Международной космической станции струями двигателей ориентации // Химическая физика. 2006, т.25 (11), с. 35–47.
4. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Мишина Л.В., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2011, т. 18 (3), с. 345-372.
5. <http://www.math.spbu.ru/GAM/gdl.html>
6. Bier K., Hagena O. Optimum conditions for generating supersonic molecular beam // In: Rarefied Gas Dynamics. Adv. Appl. Mech.: Proc. 4-th Internat. Symp., N.Y.-London, Acad. Press. 1966, v. 2, p. 260-278.
7. Gentry W.R. Pulsed molecular beam experiments // Rarefied Gas Dynamics: Proc. 14-th Internat. Symp., Tokyo. 1984, v. II, p. 793 - 807.
8. Hagena O.F. Pulsed valve for supersonic nozzle experiments at cryogenic temperatures // Review of Scientific Instruments. 1991, v. 62(4), p. 2038-2039.
9. Atkinson D.B., Smith M.A. Design and characterization of pulsed uniform supersonic expansions for chemical applications // Review of Scientific Instruments. 1995, v. 66(9), p. 4434-4446.
10. Bobylev V.B., Burdakov A.V., Lokonov K.V. Electromagnetic gas valve with a flat Laval nozzle // Instruments and Experimental Techniques. 1996, v. 39(1), p. 137-138.
11. Lee S., Hoobler R.J., Leone S.R. A pulsed Laval nozzle apparatus with laser ionization mass spectroscopy for direct measurements of rate coefficients at low temperatures with condensable gases // Review of Scientific Instruments. 2000, v. 71(4), p. 1816-1823.
12. Malakhovskii A.V. Time evolution of pulsed supersonic jets of argon clusters // Journal of Physics D: Applied Physics. 2000, v. 33, p. 556-563.
13. Makarov G.N. Pressure-shock-controlled pulsed molecular beams // Technical Physics. 2002, v. 47(12), p. 1495-1500.
14. Spangenberg T., Kohler S., Hansmann B., Wachsmuth U., Abel B., Smith M.A. Low-temperature reactions of OH radicals with propene and isoprene in pulsed Laval nozzle expansions // The Journal of Physical Chemistry A. 2004, v. 108(37), p. 7527-7534.
15. Zarvin A.E., Korobeishchikov N.G., Madirbaev V.Zh., Gartvich G.G., Kalyada V.V., Sharafutdinov R.G. A method for studying clusterization processes in a free impulse jet // Instruments and Experimental Techniques. 2005, v. 48(6), p. 817-825.
16. Голуб В.В., Баженова Т.В. Импульсные сверхзвуковые струйные течения // Объединенный институт высоких температур РАН. 2008. М.: Наука, 2008. 279 с.
17. Taylor S.E., Goddard A., Blitz M.A., Cleary P.A., Heard D.E. Pulsed Laval nozzle study of the kinetics of OH with unsaturated hydrocarbons at very low temperatures // Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP). 2008, v. 10(3), p. 422-437.
18. Zarvin A.E., Korobeishchikov N.G., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. Formation of mixed clusters in a pulsed helium - oxygen - isoprene supersonic jet // The European Physical Journal D (EPJ D). 2008, v. 49(1), p. 101-110.
19. Soorkia S., Liu C.-L., Savee J.D., Ferrell S.J., Leone S.R., Wilson K.R. Airfoil sampling of a pulsed Laval beam with tunable vacuum ultraviolet synchrotron ionization quadrupole mass spectrometry: Application to low-temperature kinetics and product detection // Review of Scientific Instruments. 2011, v. 82, 124102.
20. Yan B., Claus P.F.H., van Oorschot B.G.M., Gerritsen L., Eppink A.T.J.B., van de Meerakker S.Y.T., Parker D.H. A new high intensity and short-pulse molecular beam valve // Review of Scientific Instruments. 2013, v. 84(2), 023102.
21. Christen W. Stationary flow conditions in pulsed supersonic beams // The Journal of Chemical Physics. 2013, v. 139(15), 154202.
22. Even U. Pulsed supersonic beams from high pressure source: simulation results and experimental measurements // Advances in Chemistry. 2014, v. 2014, Article ID 636042. 11 pages.
23. Hagena O.-F., Henkes W. Die Bestimmung des effektiven Ionisationsquerschnitts in kondensierten Molekularstrahlen // Zeitschrift für Naturforschung. 1965, v. 20a(7), p. 1344-1348.
24. Anderson J.B., Andres R.P., Fenn J.B. Supersonic nozzle beams // Advances in Chemical Physics. Vol 10: Molecular Beams / Ed. I. Prigogine. 1966. John Wiley & Sons, Inc. P. 275-318.
25. Kuswa G., Stallings C., Stamm A. Improved fast opening gas puff valve // Review of Scientific Instruments. 1970, v. 41(9), p. 1362-1363.

26. Inutake M., Kuriki K. Fast ionization gauge studies of quasisteady gas injection into vacuum // Review of Scientific Instruments. 1972, v. 43(11). P. 1670-1674.
27. Hall G., Lin K., McAuliffe M. J. et al. State-to-state vibrational excitation of I<sub>2</sub> in collisions with He // The Journal of Chemical Physics. 1984, v. 74(12-1), P. 5577-5585.
28. Alagia M., Balucani N., Casavecchia P. et al. Reactive scattering of atoms and radicals // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions. 1995, v. 91, p. 575-596.
29. Zacharias H., Loy M.M. T., Roland P.A. et al. Rotational and electronic relaxation in pulsed supersonic beams of NO seeded in He and Ar // The Journal of Chemical Physics. 1984, v. 81(7), P. 3148–3157.
30. Levy D. H., Wharton L., Smalley R. E. Chemical and biochemical applications of lasers / Ed. by C. B. Moore. N. Y.; L.: Acad. Press, 1977. Vol. 11. P. 1–41.
31. Rettner C. T., Marinero E. E., Zare R. N. et al. Pulsed free jets: novel nonlinear media for generation of vacuum ultraviolet and extreme ultraviolet radiation // The Journal of Physical Chemistry. 1984, v. 88(10), p. 4459–4465.
32. Eldridge B. N., Yu M. L. Compact pulsed molecular beam system for real-time reactive scattering from solid surfaces // Review of Scientific Instruments. 1987, v. 58(6), p. 1014–1026.
33. Atomic and molecular beam methods / Ed. By G. Scoles. N.Y., Oxford: Oxford University Press. 1988.
34. Hagen O.F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: effect of pressure, temperature, nozzle size and test gas // The Journal of Chemical Physics. 1972, v. 56(5), p. 1793-1802.
35. Rohlffing E.A., Cox D.M., Kaldor A. Production and characterization of supersonic carbon cluster beams // The Journal of Chemical Physics. 1984, v. 81(7), p. 3322–3330.
36. O'Keefe A., Sherer J.J., Cooksy A.L. et al. Cavity ring down dye laser spectroscopy of jet-cooled metal clusters: Cu<sub>2</sub> and Cu<sub>3</sub> // Chemical Physics Letter. 1990, v. 172, p. 215-218.
37. Korobeishchikov N.G., Zarvin A.E., Madirbaev V.Zh., Sharafutdinov R.G. Condensation of argon, monosilane and their mixtures in a pulse free jet // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2005, v. 25(4), p. 319-349.
38. Hosokai T., Kinoshita K., Watanabe T. et al. Supersonic gas jet target for generation of relativistic electrons with 12TW-50fs laser pulse // Proceedings of EPAC 2002, Paris, 2003, pp. 981-983.
39. Semushin S., Malka V. High density gas jet nozzle design for laser target production // Review of Scientific Instruments. 2001, v. 72(7), p. 2961-2965.
40. Roca i Cabarrocas P., Gay P., Hadjadj A. Experimental evidence for nanoparticle deposition in continuous argon-silane plasmas: Effects of silicon nanoparticles on film properties // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1996, v. 14(2), p. 655-659.
41. Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Kirkpatrick A. Materials processing by gas cluster ion beams // Materials Science and Engineering: R: Reports // 2001, v. 34 (6), p. 231–295.
42. Khodorkovski M.A., Murashov S.V., Artamonova T.O., Golod Yu.A., Shakhmin A.L., Varentsov V.L., Rakcheeva L. P. Gasdynamic parameters of a supersonic molecular beam seeded by fullerene molecules // Technical Physic. 2003, v. 48(5), p. 523–526.
43. Andreev A.A., Chernysh V.S., Ermakov Yu.A., Ieshkin A.E. Design and investigation of gas cluster ion accelerator // Vacuum. 2013, v. 91(1), p. 47-53.
44. Yamada I. Historical milestones and future prospects of cluster ion beam technology // Applied Surface Science, 2014, v. 310, p. 77–88.
45. Чекмарев С.Ф. Импульсные течения газа в сверхзвуковых соплах и струях // Новосибирск, ИТ СО АН. 1990. 342 с.
46. Gartvich G.G., Dudnikov V.G., Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. Space-time characteristics of a supersonic-jet flow formed with a pulsed electromagnetic valve // Instruments and Experimental Techniques. 1997, v. 40(2), p. 271-273.
47. Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е., Мадирбаев В.Ж. Газодинамика импульсных сверхзвуковых недорасширенных струй: пространственно - временные характеристики // Журнал технической физики. 2004, т. 74(8), с. 21-29.
48. Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е. Импульсные сверхзвуковые струи: применение, проблемы, решения // Вестник НГУ: Серия «Физика». 2006, т. 1(2), с. 29-47.
49. Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г. Влияние размера сопла на дальность сверхзвуковой микроструи // Письма в журнал технической физики. 2011, т. 37 (22), с. 10-15.

50. Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С.1,2, Тимофеев И.В. Экспериментальное исследование структуры сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй // Письма в журнал технической физики. 2015, т. 41 (10), с. 97-103.
51. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 1. Истечение струй в вакуум // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: электронный журнал. 2012, т.13 (1), с. 1-22. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-07-13-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-07-13-001.pdf).
52. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 2. Истечение в затопленное пространство // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: электронный журнал. 2012, т. 13 (2), с. 1-26. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-22-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-22-001.pdf).

## Деструктивная ионизация малых кластеров азота в сверхзвуковом разреженном потоке

С.Т. Чиненов, А.Е. Зарвин, В.В. Каляда, А.С. Яскин  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2  
e-mail: [s.chinenov@g.nsu.ru](mailto:s.chinenov@g.nsu.ru)

*Исследована фрагментация кластеров аргона электронным ударом. Кластеры формировались при истечении газа через сверхзвуковое сопло в вакуум. Продукты ионизации регистрировались масс-спектрометром Hiden EPIC-1000. Получены масс-спектры ионизированных кластеров, зависящие от среднего размера нейтральных частиц. Обнаружены особенности функций распределения ионов по размерам.*

*Destructive ionization of small nitrogen clusters in supersonic rarefied flow. S.T. Chinenov, A.E. Zarvin, V.V. Kalyada, A.S. Yaskin. The fragmentation of argon clusters by electron impact was investigated. Clusters were formed in free jet when the gas flowed through a supersonic nozzle into the vacuum. The decomposition products were recorded by the mass-spectrometer Hiden EPIC-1000. Mass-spectra of ionized clusters having a dependence on the average size of neutral particles were obtained. Features of ion distribution functions by sizes were noticed.*

### Введение

Кластером принято считать образование из атомов или молекул, имеющее нелинейную зависимость свойств от числа составляющих частиц. Одной из особенностей газовых кластеров является их интенсивная фрагментация при ионизации. Это связано с большой разницей в природе удержания частиц в нейтральных, осуществляемого за счет сил Ван-дер-Ваальса с малой энергией взаимодействия на больших расстояниях, и ионизированных кластерах, представляющих собой систему, далекую от равновесной, имеющую большую потенциальную энергию, способствующую к фрагментации[1].

Одним из наиболее распространенных способов ионизации сверхзвуковой кластерной струи является использование электронного пучка. В работе [2] установлено, что с увеличением размера кластера увеличивается вероятность его фрагментации вследствие электронного удара. Этот факт расходится с распространенным мнением о том, что развал кластеров должен уменьшаться с увеличением размера кластеров, поскольку с ростом частицы увеличивается количество доступных степеней свободы, следовательно, можно проще ассимилировать добавочную энергию внутри частицы. Также в этой работе были получены зависимости развала кластеров инертных газов от энергии налетающих электронов, которые авторы сравнили с моделью проникновения заряженной частицы в твердое тело, т.е. наличием максимума с дальнейшим уменьшением фрагментации при росте энергии электронов. Эти и другие работы были сосредоточены на изучении формирования кластеров благородных газов разного размера при расширении свободной струи. Для исследования кластеры сначала ионизируются либо