ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 1, с. 161–166

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.6.011.8; 539.198; 544.277.4

ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА

© 2025 г. А. Е. Зарвин[a],*, В. В. Каляда[a], Е. Д. Деринг[a], К. А. Дубровин[a]

[a] *Новосибирский государственный университет*
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

** e-mail: zarvin@phys.nsu.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.
После доработки 25.04.2024 г.
Принята к публикации 25.06.2024 г.

Описан и верифицирован метод регистрации интенсивности в поперечном сечении молекулярного пучка. Предложена и испытана схема учета влияния фонового газа. Полученные результаты измерений в потоках аргона и азота продемонстрировали прямую зависимость формы и ширины поперечных профилей молекулярного пучка от числа Маха на входе в скиммер, а также среднего размера кластеров в условиях конденсирующихся сверхзвуковых струй.

DOI: 10.31857/S0032816225010216, **EDN:** GHXXRF

1. ВВЕДЕНИЕ

Молекулярные пучки, формируемые из сверхзвуковых газовых струй, истекающих в разреженное пространство, давно являются объектом интереса исследователей в различных областях науки и техники [1–8]. Одним из наиболее современных направлений является использование кластированных молекулярных пучков. Как правило, экспериментаторы стремятся достичь максимальной интенсивности в приосевой области молекулярного пучка. Однако газодинамика, а также достоверное детектирование таких объектов еще недостаточно изучены. Помимо особенностей скиммирования кластированных потоков, отличающегося от детально изученного формирования с помощью скиммера сверхзвуковых струй в отсутствие конденсации [9], много вопросов возникает о достоверности измерений параметров молекулярного пучка датчиками закрытого (измерение интенсивности) и открытого (измерение плотности) типа. Так, масс-спектрометрия осевых профилей плотности молекулярного пучка в условиях развитой конденсации дает совершенно неожиданные результаты [10]. Измерение плотности простым ионизационным датчиком открытого типа в условиях кластеров в молекулярном пучке дает заниженные данные о плотности, в том числе из-за того, что кластер представляет собой, как правило, один ион, несмотря на большое число образовавших его атомов или молекул.

Наиболее популярные методы масс-спектрометрии (квадрупольный и времяпролетный) с достаточно большим промежутком времени между ионизацией анализируемого потока и его регистрацией на детекторе вследствие развала кластеров при ионизации, напротив, демонстрируют необычно высокую концентрацию мономеров. В то же время в детекторе закрытого типа (как правило, датчике ионизационного типа с узким входным отверстием) данные об интенсивности молекулярного пучка дают вполне достоверную информацию об общем числе достигших детектора частиц вследствие эффективного испарения кластеров внутри детектора, однако неопределенным оставляют вопрос о скорости потока на входе в детектор.

Распределение интенсивности или плотности молекулярного пучка поперек оси позволяет не только изучить особенности расширения кластированного пучка и оценить скоростное отношение на входе в скиммер, но и рассмотреть газодинамику сверхзвуковых потоков перед скиммированием. Ранее были выполнены работы по диагностированию локальной плотности поперек оси молекулярного пучка в потоках без кластеров [11, 12]. В нашей работе пред-

ложена система диагностики интенсивности в условиях формирования молекулярных пучков из сверхзвуковых кластированных потоков, а также изложены результаты и проблемы таких измерений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты выполнены на экспериментальном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 отдела прикладной физики Новосибирского государственного университета. Описание стенда, его вакуумных и диагностических возможностей приведено в работах [13–16].

На рис. 1 изображена принципиальная схема измерений. Источником сверхзвуковой струи являлась размещенная в камере расширения *1* форкамера со сменным звуковым или сверхзвуковым соплом *2* на координатном устройстве *3*, обеспечивающем перемещение в трех взаимно ортогональных направлениях *X*, *Y*, *Z*, а также поворот в плоскости *XY* с точностью 10 мкм и 0.1° соответственно. Перемещение осуществляется по заданной программе с помощью шаговых двигателей, также размещенных внутри вакуумной камеры *1*. Молекулярный пучок формируется с помощью конусообразного скиммера *4* с внутренним и наружным углами раствора 45 и 55°, диаметром входного сечения $d_S = 0.49$ мм и острой входной кромкой. Соосность молекулярно-пучковой системы достигается путем тщательной юстировки по лазерному лучу, проходящему через сопло, скиммер и входное отверстие детектора при разных координатах по оси *X*.

В работе использованы звуковое сопло и сверхзвуковое с конической частью диффузора. Параметры сопел приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры использованных сопел

Сопло	d_*, мм	L, мм	d_a, мм	M_a	
				N_2	Ar
1	0.51	–	–	1.0	1.0
2	0.26	3.6	1.5	5.5	8.1

Примечание: d_* – диаметр критического сечения сопла, L – длина, d_a – диаметр выходного отверстия сверхзвукового сопла, M_a – значение числа Маха в выходном сечении сопла.

Детектор молекулярного пучка *5* установлен в послескиммерной секции молекулярно-пучковой системы *6* на однокомпонентном координатном устройстве *7*, обеспечивающем перемещение детектора поперек молекулярного пучка в

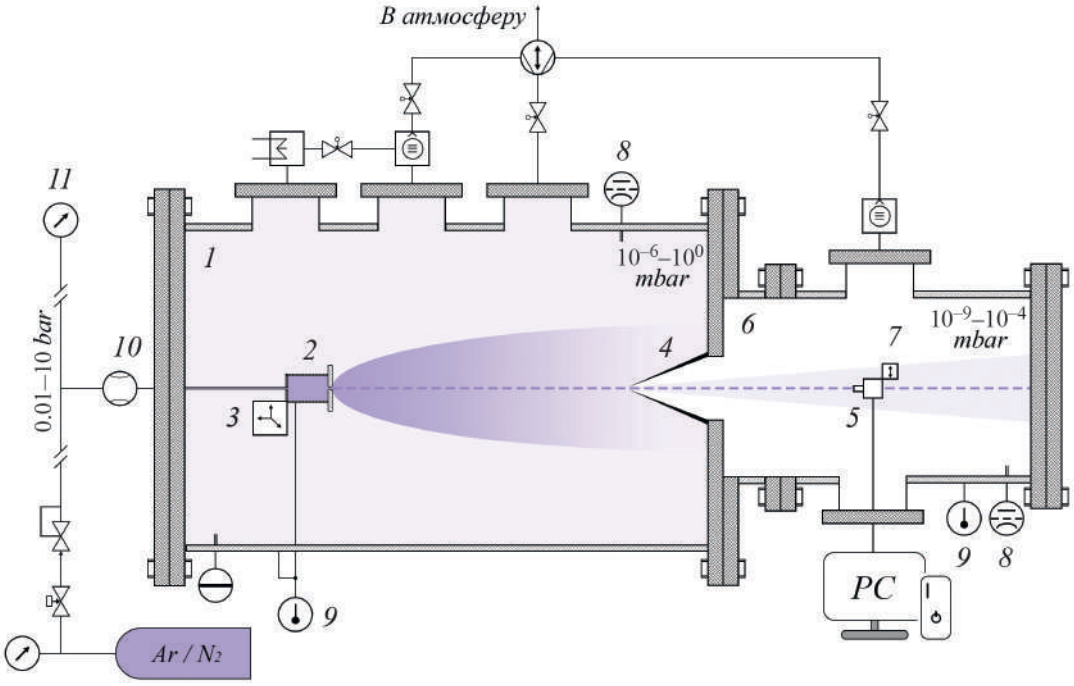

Рис. 1. Схематическое изображение измерительного участка стенда ЛЭМПУС-2: *1* – камера расширения, *2* – форкамера с соплом, *3* – 4-компонентный координатный механизм, *4* – скиммер, *5* – детектор молекулярного пучка, *6* – послескиммерная камера, *7* – ручной координатный механизм, *8* – вакуумметр ионизационный, *9* – датчик температуры, *10* – регулятор расхода, *11* – датчик абсолютного давления.

пределах 150 мм с точностью позиционирования 0.1 мм.

В качестве детектора в работе использован вакуумный датчик давления 356 Micro-Ion Plus, информация от которого через адаптер записывается на персональном компьютере. Для измерения интенсивности молекулярного пучка вход датчика оснащен диафрагмой с отверстием диаметром 2 мм. Измерения интенсивности проводятся путем последовательной локализации положения датчика (входного отверстия ионизационной лампы) на задаваемых расстояниях относительно оси молекулярного пучка. Одновременно осуществляются фиксация и запись давления фонового газа в послескиммерной секции с помощью второго такого же датчика, расположенного на патрубке послескиммерной секции вдали от оси молекулярного пучка *8*.

Предварительно показания обоих датчиков в отсутствие молекулярного пучка сверяются и согласуются в диапазоне измерений. Разница между показаниями датчиков давления на выбранной линии тока в молекулярном пучке и в фоновом пространстве (гарантированно вне влияния направленного движения частиц молекулярного пучка) принимается за значение интенсивности молекулярного пучка в относительных единицах при условии постоянства скорости направленного движения в молекулярном пучке (в гиперзвуковых течениях соответствует предельной скорости потока).

Температура газа в форкамере сопла, в камере расширения и послескиммерной камере регистрируется многоканальным датчиком *9* марки Ketotek STC-3008 с погрешностью менее 0.2%. Давление газа до расширения задается задатчиком расхода газа *10* марки РРГ-12 и регистрируется датчиком *11* марки Siemens Sitrans P7MF1564 с погрешностью 0.25% от максимального измеряемого значения.

Разрежение в камере расширения и послескиммерной камере обеспечивается откачной системой, состоящей из турбомолекулярных и гелиевых криогенных насосов, подключенных по параллельной схеме. Варьирование рабочего газа, подаваемого в форкамеру сопла, давления и температуры торможения, а также угла поворота струи относительно оси молекулярно-пучковой системы обеспечивает возможность определения поперечных профилей интенсивности молекулярного пучка при различных условиях истечения (в режимах при числах Маха в потоке $M > 3$).

Следует отметить, что такая схема измерений позволила определять интенсивность в поперечном сечении молекулярного пучка не только при фиксированном расстоянии сопло–скиммер (соответственно, неизменном давлении фонового газа в послескиммерной секции), но и при варьировании этого расстояния, меняющем поток газа через скиммер и величину фонового давления в послескиммерной секции. Таким образом можно было регистрировать зависимость интенсивности на любой линии тока в молекулярном пучке при изменении расстояния сопло–скиммер.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Пример зарегистрированных значений интенсивности в зависимости от расстояния между входным отверстием детектора и осью молекулярного пучка, y_b (в мм), на трех расстояниях между соплом и скиммером (x = 25, 45, 60 мм) приведен на рис. 2а. Данные получены при истечении азота из звукового сопла № 1 (табл. 1), фиксированных значениях температуры (T_0 = 300 K) и давления торможения (P_0 = = 50 кПа), а также давления в камере расширения (P_∞ = 0.59 Па). Величины интенсивности приведены в единицах, соответствующих показаниям датчика, регистрирующего суммарный сигнал, определяемый молекулярным пучком и фоновым газом в послескиммерной секции.

Стоит отметить, что диапазон перемещения датчика поперек оси молекулярного пучка составляет 150 мм, что позволяет зарегистрировать полный поперечный профиль и фоновое значение сигнала только с одной стороны от оси молекулярного пучка. При вычитании фоновых сигналов зависимости приобретают вид, приведенный на рис. 2б. Сопоставимые значения интенсивности полезного и фонового сигналов увеличивают погрешность измерений, составляющую, по оценкам, не менее 20%. Однако, как следует из приведенных графиков, разброс данных вследствие случайных шумов не влияет существенно на регистрируемые значения.

Поскольку для последующего анализа данных требуются относительные значения интенсивности поперечных профилей молекулярного пучка, на рис. 3 приведены данные, нормированные к единице в максимуме, $I_{\text{норм}} = (I - I_{\text{ф}}) / (I - I_{\text{ф}})_{\text{макс}}$.

Согласно оценке [17], расстояние до диска Маха в этих измерениях составляло около 100 мм.

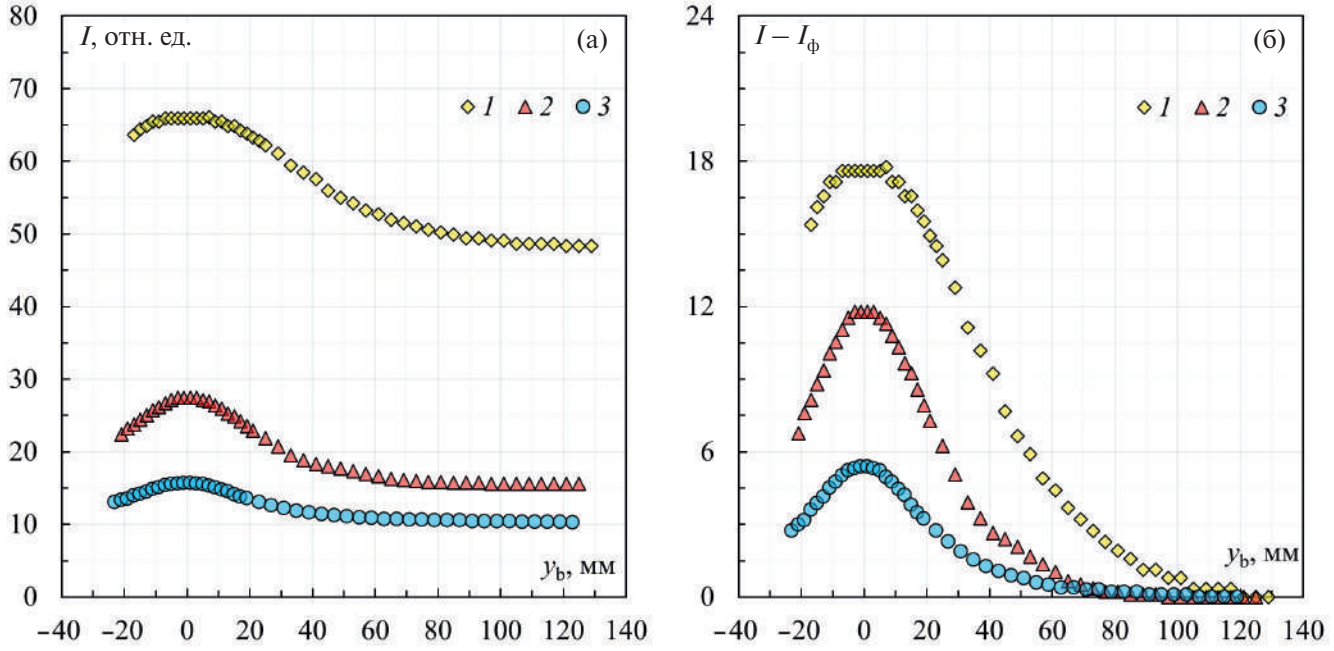

Рис. 2. Экспериментальные значения интенсивности сигналов поперек молекулярного пучка азота на трех расстояниях x между звуковым соплом № 1 (табл. 1) и скиммером: 25 мм (*1*), 45 мм (*2*) и 60 мм (*3*); ***а*** – интегральные значения, ***б*** – после вычитания фонового сигнала.

При этом число Кнудсена Kn_S, рассчитанное по изэнтропическому значению плотности в струе и диаметру входного сечения скиммера, на расстояниях 25, 45 и 60 мм составило соответственно 2.6, 8.5, 15. Поэтому на ближайшем к соплу расстоянии можно было ожидать влияния внутреннего скиммерного взаимодействия [9] на измерения поперечных профилей плотности. Как и предполагалось, на расстоянии $x = 25$ мм поперечный профиль (зависимость от y_b) значительно шире, что соответствует более широкому разлету молекул в молекулярном пучке и, соответственно, меньшему числу Маха. В то же время при удалении скиммера от сопла и при большем значениям числа Кнудсена влияние скиммерного взаимодействия ослабевает, а число Маха растет.

При истечении аргона из сверхзвукового сопла малого диаметра (сопло № 2, табл. 1) при давлении торможения 100 кПа кластерообразование практически не оказывает влияния на газодинамику потока [средний размер кластеров, оцененный по работе [18], $\langle N \rangle = 4$, поэтому зависимость поперечных профилей интенсивности в молекулярном пучке от расстояния x мало отличается от полученной в азоте (рис. 4)].

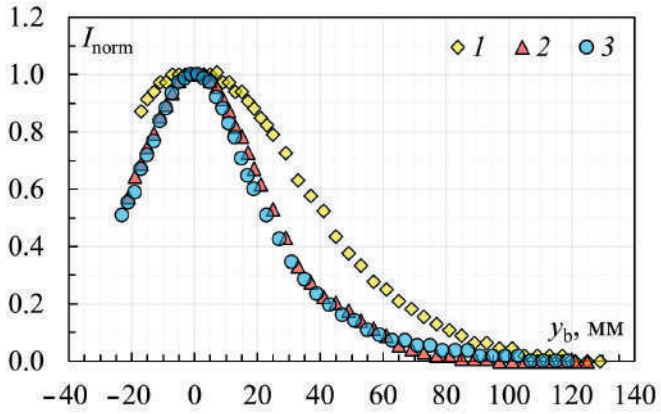

Рис. 3. Поперечные профили интенсивности молекулярного пучка после нормировки к единице в максимуме. Условия те же, что и на рис. 2.

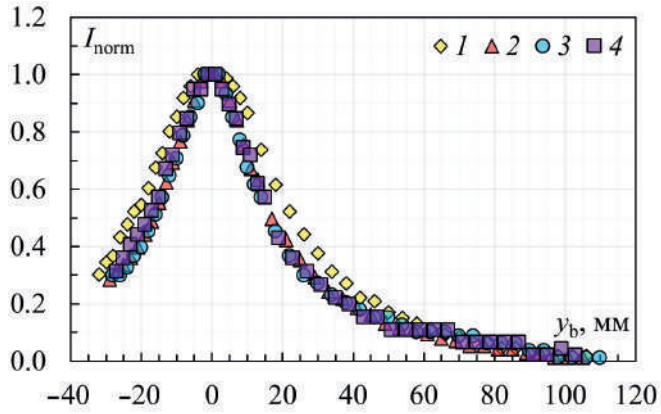

Рис. 4. Поперечные профили интенсивности молекулярного пучка на четырех расстояниях x между соплом и скиммером: 40 мм (*1*), 60 мм (*2*), 80 мм (*3*) и 100 мм (*4*). Аргон, сверхзвуковое сопло № 2 (табл. 1).

Размер первичной бочки для этих режимов истечения составил свыше 100 мм, число Кнудсена $Kn_S = 10$ уже на минимальном из рассмотренных расстояний x. Незначительное уширение профиля на расстоянии $x = 40$ мм свидетельствует, по-видимому, о незавершенном процессе роста числа Маха.

Зависимость уширения поперечного профиля молекулярного пучка не только от геометрического положения скиммера относительно сопла и изэнтропического значения числа Маха в струе, но и от эффективности кластерообразования проиллюстрирована на рис. 5, где приведено сравнение результатов для двух газов

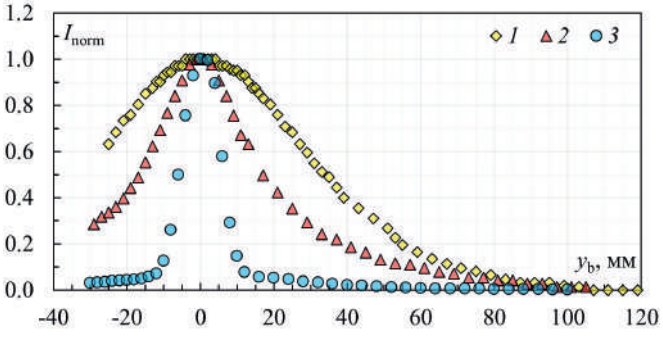

Рис. 5. Сравнение результатов при различном среднем размере кластеров: *1* – N_2, $P_0 = 300$ кПа, $x = 60$ мм; *2* – Ar, $P_0 = 100$ кПа, $x = 60$ мм; *3* – Ar, $P_0 = 300$ кПа, $x = 60$ мм.

в сопоставимых условиях истечения. Во всех режимах использовано сверхзвуковое сопло № 2 (табл. 1). Выбраны режимы с одинаковым расстоянием между критическим сечением сопла и скиммером, $x = 60$ мм. При истечении аргона сопоставлены режимы с различающимися в три раза давлениями торможения при сохранении фиксированной температуры торможения. Согласно оценке [18], средний размер кластеров при $P_0 = 100$ кПа составляет $\langle N \rangle = 60$, при 300 кПа $\langle N \rangle = 840$. При этом же давлении в струе азота $\langle N \rangle = 15$. Соответственно, ширина поперечного профиля интенсивности молекулярного пучка в струе азота наибольшая, а в аргоне при высоком давлении торможения – наименьшая.

Полученные экспериментальные данные наглядно иллюстрируют возможность связать форму и ширину регистрируемых поперечных профилей плотности молекулярного пучка с числом Маха на входном срезе скиммера.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена разработка экспериментальной методики измерения интенсивности в поперечном сечении молекулярного пучка в послескиммерной секции установки. В качестве детектора интенсивности использован вакуумный манометрический датчик. Предложена и испытана схема учета влияния фонового газа. Параллельная запись значений фонового давления в послескиммерной секции обеспечила контролируемый учет вклада фоновой компоненты в полезный сигнал и высокую достоверность получаемых результатов. Мощная откачная система установки позволила выполнить исследования в широком диапазоне давлений торможения с соплами разной формы и геометрических размеров.

Приведенные результаты измерений продемонстрировали прямую зависимость формы и ширины поперечных профилей молекулярного пучка от числа Маха на входе в скиммер, а также среднего размера кластеров в условиях конденсирующихся сверхзвуковых струй. Установленная достоверность получаемых результатов позволяет в дальнейшем решать вопросы определения числа Маха, а при знании направленной скорости потока – поступательной температуры в исследуемых струях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена на уникальном оборудовании центра коллективного пользования “Прикладная физика” Новосибирского государственного университета при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант FSUS-2020-0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эстерман И.* // УФН. 1947. Т. 32 (1). С. 89.
2. *Kantrowitz A., Grey J.* // Rev. Sci. Instrum. 1951. V. 22 (5). P. 328. https://doi.org/10.1063/1.1745921
3. *Kistiakowsky G.B., Slichter W.P.* // Rev. Sci. Instrum. 1951. V. 22 (5). P. 333. https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1745922
4. *Рамзей Н.* Молекулярные пучки. М.: ИЛ, 1960.
5. Advances in Chemical Physics. Vol. X. Molecular Beams / Ed. by J. Ross. New York: Interscience, 1966.

6. *Luria K., Christen W., Even U.* // J. Phys. Chem. A. 2011. V. 115. P. 7362. https://doi.org/10.1021/jp201342u
7. *Карпенко А.Ю., Батурин В.А.* // Журнал нано- и электронной физики. 2012. Т. 4 (4). С. 04015.
8. *Bi H., Zhang Y., He Z., Zuo G., Cao B., Zhang J., Wu J., Cao Q., Wang X.* // Vacuum. 2023. V. 214. 112228. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112228
9. *Зарвин А.Е., Шарафутдинов Р.Г.* // ПМТФ. 1979. № 6. С. 107.
10. *Зарвин А.Е., Каляда В.В., Художитков В.Э.* // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24 (5). С. 691.
11. *Bossel U.* // Archives of Mechanics. 1974. V. 26 (3). P. 355.
12. *Зарвин А.Е., Шарафутдинов Р.Г.* Динамика разреженных газов. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО АН, 1976.
13. *Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., Korobeishchikov N.G., Khodakov M.D., Yaskin A.S., Khudozhitkov V.E.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45 (5). P. 819. https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2682901
14. *Zarvin A., Yaskin A., Kalyada V., Dubrovin K.* // J. Fluids Eng. 2022. V. 44 (7). 071204. https://doi.org/10.1115/1.4053372
15. *Zarvin A.E., Madirbaev V.Zh., Dubrovin K.A., Yaskin A.S.* // Fluid Dynamics. 2023. V. 58 (8). P. 1668. https://doi.org/10.1134/S0015462823602747
16. *Dubrovin K.A., Zarvin A.E., Kalyada V.V., Yaskin A.S., Dering E.D.* // Vacuum. 2023. V. 218. 112652. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112652
17. *Ashkenas H.Z., Sherman F.S.* // Proc. of the 4th RGD Symposium. 1964. V. 2. P. 84.
18. *Hagena O.* // Z. Phys. D. Atoms, Molecules and Clusters. 1987. V. 4. P. 291. https://doi.org/10.1007/BF01436638