

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ВАКУУМЕ

NEW POSSIBILITIES FOR EXPERIMENTAL MODELING OF GAS JETS IN A VACUUM

А.Е.Зарвин, (ORCID: 0000-0002-1973-5088) / zarvin@phys.nsu.ru
К.А.Дубровин, (ORCID: 0000-0001-9655-1242),
В.В.Каляда, (ORCID: 0000-0003-2739-5017),
А.С.Яскин, (ORCID: 0000-0003-0600-5366)

A.E.Zarvin, K.A.Dubrovin, V.V.Kalyda, A.S.Yaskin,

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Приведены результаты моделирования процессов, происходящих в сверхзвуковых потоках разреженных газов при истечении из сопел космических аппаратов и их движении в разреженной атмосфере произвольно заданного состава. Результаты иллюстрированы примерами измерений на компактном лабораторном газодинамическом стенде с помощью современных диагностических методов.

The results of modeling the processes occurring in supersonic flows of rarefied gases when they flow out of the nozzles of spacecraft and movement in a rarefied atmosphere of an specified composition are presented. The results are illustrated with examples of measurements on a compact laboratory installation using modern diagnostic methods.

Ключевые слова: вакуум, газодинамика сверхзвуковых потоков, визуализация течений, сканирование, электронные, молекулярные пучки, донное давление

Key words: vacuum, gas dynamics of supersonic flows, visualization of flows, scanning, electronic, molecular beams, given pressure.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов, происходящих в сверхзвуковых потоках, истекающих в вакуум или сильно разреженную окружающую среду, является в настоящее время актуальной задачей в различных областях науки и техники. Резкое падение плотности и температуры в таких потоках позволяет моделировать и изучать процессы колебательного, вращательного и поступательного энергообмена в газах [1]. Падение температуры при сохранении достаточного числа столкновений в потоке обеспечивает условия кластерообразования и интенсивной конденсации. Поэтому сверхзвуковые струи оказались чрезвычайно удобным и преимущественно применяемым способом получения кластеров нужного размера. Достаточно перечислить только важнейшие, на наш взгляд направления исследований, ведущихся с использованием кластеров или кластеризованных потоков: фуллерены, фуллериты, фуллереноподобные частицы и области их применения [2]; тонкопленочные покрытия с новыми свойствами, сформированные в кластерных потоках [3]; травление подложек, имплантация атомов на малые глубины [4]; субнанометровая полировка поверхностей твердых тел [5]; внутрикластерный энергообмен, в том числе инверсная заселенность отдельных уровней [6]; химические реакции в кластерах или с их участием [7] и др. (см., например, обзор [8]).

Одно из важнейших технологических применений сверхзвуковых струй связано с космическими полётами. При разработке перспективных пилотируемых транспортных кораблей нового поколения, планов полётов на Луну и Марс, создании малых и микроспутников встает острая необходимость наземного моделирования элементов

космических аппаратов (КА). Данная задача подразумевает подробное изучение истечения сверхзвуковых струй из отдельных сопел и многосопельных компоновок в условиях сильно разреженных атмосфер или глубокого вакуума; взаимодействия этих струй с набегающим сильно разреженным потоком, а также с элементами собственных конструкций КА или с объектами причаливания; формирования потоков с нужными характеристиками путем пассивного или активного воздействия на поток. Чрезвычайно важными являются задачи моделирования истечения в сильно разреженную среду газожидкостных смесей и жидкостей, а также ионно-плазменных струй [9].

В настоящей работе приведены некоторые результаты моделирования одиночных и блочных струй с помощью современных диагностических средств, в условиях подобию заданным в качестве примера натурным параметрам.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воспроизведение на наземных газодинамических установках условий работы реальных двигателей КА требует огромных материальных и финансовых затрат [10]. В настоящее время большинство лабораторных вакуумных газодинамических стендов России (таких, например, как установки ВС-4, ВИКА и ВИКИНГ Института теплофизика СО РАН [11-12]), предназначенных для моделирования процессов вблизи КА в разреженном пространстве, требует кардинального переоснащения. На текущий момент они экономически нерентабельны. Численные расчёты (в том числе прямое компьютерное моделирование полётной газодинамики), несмотря на значительные успехи последнего времени, не гарантируют полного и адекватного описания сложных физико-химических процессов вблизи КА при работе двигателей в условиях вакуума и требуют валидации посредством эксперимента. Вынос экспериментов в открытый космос, проведение натуральных измерений на малых спутниках, а также микро- и наноспутниках требует вложения больших финансовых средств и привлечения многочисленных коллективов специалистов. Ввиду этого появляется необходимость решения возникающих задач путём использования наземного моделирования на малогабаритных лабораторных экспериментальных установках и миниатюрных моделях, применяя методы подобию [13] или используя импульсные режимы истечения [14]. Такой вариант решения проблемы при всей его сложности является актуальным, востребованным и остро необходимым.

В настоящей работе мы приводим результаты, полученные на многофункциональном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 отдела прикладной физики Новосибирского государственного университета [15], предназначенном, в частности, для работы при повышенных расходах газа с сохранением высокого разрежения в рабочей камере. Стенд обеспечен высоковакуумными высокопроизводительными и безмасляными насосами, позволившими достичь в непрерывном режиме истечения предельной массовой скорости вакуумной откачки по диоксиду углерода ~ 0.2 г/с и при импульсном истечении до 2 г/с, при давлении окружающего пространства ниже 0.5 Па. Проведение экспериментов на установке требует на порядки меньших затрат энергии и расходуемых материалов, чем на известных крупных газодинамических установках второй половины и конца 20-го века, как в непрерывном, так и в импульсном режимах истечения. Моделирование истечения сверхзвуковых струй газов и газовых смесей проводилось с использованием миниатюрных сопел субмиллиметрового размера.

Экспериментальная апробация моделирования поля течения струй проведена на одиночном сопле и многосопловых компоновках при разных условиях по давлению торможения. Высоковольтный электронный пучок использован для визуализации газодинамических течений с помощью разработанной системы сканирования и для определения абсолютных значений локальной плотности и вращательной температуры при использовании современной спектральной аппаратуры. С помощью молекулярно-пучковой масс-спектрометрии оценивалось наличие в потоках кластеров, а свободномолекулярным датчиком осуществлялись измерения давления вблизи донной

плоскости соплового блока. Кроме того молекулярно-пучковые методы обеспечили возможность измерения скорости и поступательной температуры.

Ниже приведены и обсуждаются некоторые из полученных результатов, а также наработанный опыт и возможности использования малогабаритных стенов для моделирования сложных течений. К сожалению, ограничения статьи по объему не позволяют проиллюстрировать значительную часть разработанных, адаптированных и внедренных методов и диагностических методик.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В модельных экспериментах используются холодные газовые потоки, соответственно, не светящиеся. В то же время, при истечении в вакуум в сверхзвуковых струях быстро падает плотность, вследствие чего теневые методы исследования, широко применяемые в аэродинамических трубах при моделировании течений при давлениях, соответствующих малым высотам, оказываются непригодными. Поэтому для визуализации таких потоков необходимо возбуждение излучения в струе. В качестве источника возбуждения в большинстве случаев используют высоковольтный электронный пучок [16]. Пример такой визуализации приведен на рис. 1. Показано свечение струи азота, истекающей из одиночного сверхзвукового конического сопла с диаметром критического сечения $d^* = 0.215$ мм. Результат получен при давлении торможения $P_0 = 400$ кПа, давлении фонового газа $P_h = 2$ Па. Параметры возбуждающего электронного пучка: энергия электронов $E_e = 10$ кэВ, ток пучка $I_e = 20$ мА. Область электронного пучка на изображении ослаблена на порядок. Из сравнения с известными размерами элементов форкамеры сопла можно оценить истинный размер струи. Наблюдается веретенообразная структура сверхзвуковой струи, зона смешения (более яркие полосы по бокам), х-образная конфигурация, замыкающая первую бочку.

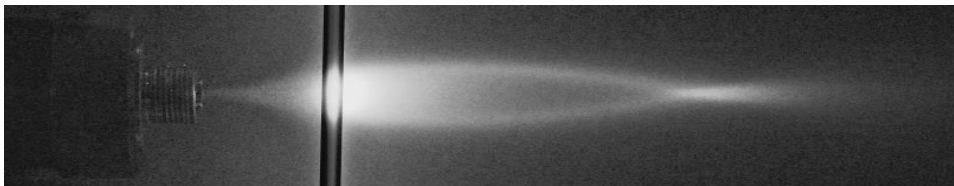


Рис. 1. Сверхзвуковая струя азота. Засветка высоковольтным электронным пучком.

Другой способ определения распределений плотности в поле истекающих струй состоит в использовании спектральных измерений интенсивности свечения на выбранной длине волны (для атомарных газов) или интегральной интенсивности колебательной полосы (для молекулярных газов) [17]. Обязательным условием, в реальности сильно ограничивающим выбор участка спектра, является отсутствие перекрытия другими полосами, либо другим газом в случае истечения смесей. Тем не менее, в ряде случаев такие измерения достаточно точны. Как показывают многочисленные измерения, в условиях истечения, не возмущенных проникновением в струю фонового газа из окружающего пространства, а также процессом конденсации, совпадение с изэнтропическим расчетом очень хорошее, что подтверждает возможность измерений распределений плотности в струях методом электронно-пучковой спектроскопии на малогабаритных установках и с миниатюрными соплами.

Фоторегистрация продольных и поперечных сечений сверхзвуковых потоков начала использоваться при исследованиях газодинамики сверхзвуковых струй вскоре после применения высоковольтных хорошо сфокусированных пучков электронов для локальных измерений плотности разреженного газа [16]. Нами предложен и осуществлен переход на современную технику регистрации. В качестве детектора излучения использован ручной сканер изображения, представляющий собой линейку фотодатчиков

длиной около 200 мм, обеспечивающую разрешение до 900x900 dpi. Считывание информации осуществляется в режиме online на микро-SD-карту. Таким образом, формируется файл с цифровыми данными, которые могут быть представлены как в виде изображения светящегося объекта, так и в виде графиков изменений плотности для выбранной координаты. Пример таких изображений при истечении рабочего газа через компоновку четырех сверхзвуковых газовых источников представлен на рис. 2 для продольного (рис. 2,а) и поперечных (рис. 2,б,в,д) сечений потока на разных расстояниях от соплового блока. Скорость сканирования 2 мм/с. Температура соплового блока $T_0 = 300$ К. Давление в форкамере $P_0 = 100$ кПа. Давление окружающего фонового газа $P_h = 0.5$ Па. Диаметр электронного пучка не превышал 1 мм. Для удобства представления реальные размеры изображений не соблюдены.

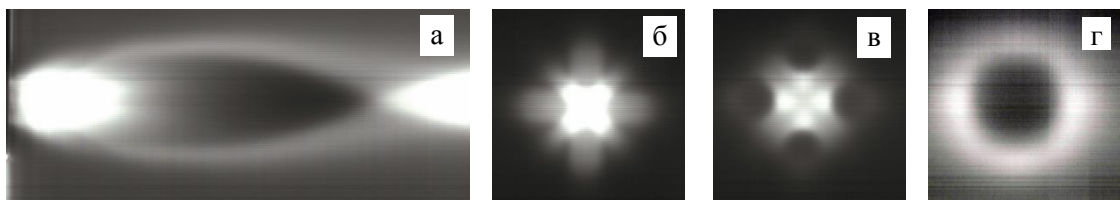


Рис. 2. Сканированные изображения продольного (а) и поперечных (б), (в), (г) профилей составной струи, истекающей из квадратной сборки сопел.

Преимуществом данного способа измерений является быстрое получение информации в цифровом виде, позволяющее практически в режиме реального времени с высоким разрешением получать графики распределений плотности в интересующих сечениях.

На рис. 3 приведен результат измерений донного давления, P_d , для компоновки из восьми одинаковых сверхзвуковых сопел с $d^* = 0.21$ мм при давлении в форкамерах сопел $P_0 = 60$ кПа и давлении окружающего пространства $P_h = 0.66$ Па.

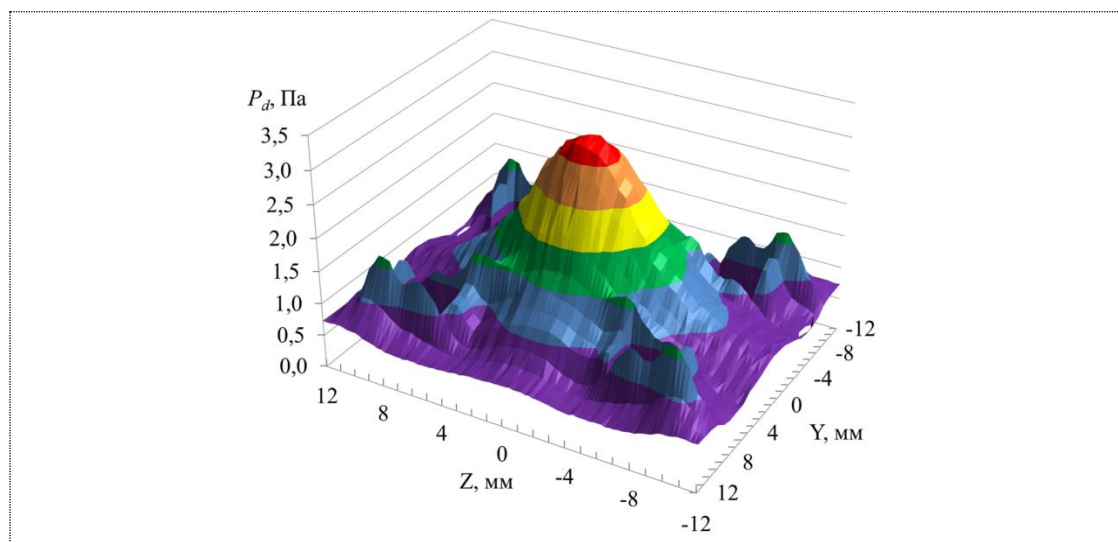


Рис. 3. Трёхмерный график распределения донного давления.

Измерение распределения донного давления, т.е. силового воздействия от вихревых потоков газа в направлении донной части соплового блока и деталей конструкции КА, в условиях сильного разрежения окружающего пространства представляет собой достаточно сложную задачу. При моделировании в вакууме погрешности использования трубки Пито (или свободномолекулярного датчика) по сравнению с традиционными аэродинамическими режимами существенно возрастают. В

условиях моделирования на небольшом высоковакуумном газодинамическом стенде потребовалась миниатюризация моделей донного экрана соплового блока с соответствующей миниатюризацией средств диагностики. В качестве датчика был использован тонкостенный капилляр внутренним диаметром 0.5 мм. Измерение абсолютных значений давления проводилось системой с использованием квадрупольного масс-спектрометра.

ВЫВОДЫ

На примерах продемонстрированы возможности применения на малогабаритной экспериментальной установке Новосибирского государственного университета методов и средств диагностики сверхзвуковых потоков, истекающих из одиночных сопел и сопловых блоков в вакуум или разреженное пространство. Имеющееся оборудование и разработанные методики могут быть использованы для моделирования процессов при разработке авиационно-космических систем нового поколения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-01-00332/20) и Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSUS-2020-0039).

ЛИТЕРАТУРА

1. Campargue R 1984 *J Phys Chem* 88 4466-74
2. Natural Fullerenes and Related Structures of Elemental Carbon 2006 // Ed. Frans J.M. Rietmeijer eBook Springer The Netherlands 295p
3. Popok V N 2011 *Mater. Sci. Eng. R.* 72 137-57
4. Toyoda N and Yamada I 2015 *Physics Procedia* 66 556-60
5. Andreev A A, Chernysh V S, Ermakov Y A and Ieshkin A E 2013 *Vacuum* 91 47-53
6. Madirbaev V Z, Zarvin A E and Korobeishchikov N G 2014 *Advances in Nonequilibrium Processes: Plasma, Combustion, and Atmosphere* 76-82 / Ed A.M. Starik and S.M. Frolov (Moscow Torus Press 344p)
7. Zhang M, Yang T, Wang Z, Ma X-F, Zhang Y, Greer S M, Stoian S A, Ouyang Z-W, Nojiri H, Kurmoo M and Zeng M-H 2017 *Chem. Sci.* 8 5356–61
8. Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications 2019 // Ed John Zhanhu Guo, Kenan Song, Chuntai Liu (Elsevier Higher Education Press) 319p
9. Yarygin V N, Gerasimov Yu I, Krylov A N, Mishina L V, Prikhodko V G and Yarygin I V 2011 *Thermophys Aerodin* 18 333-58
10. Reynier F 2016 *Prog. Aerosp. Sci.* 85 1-32
11. Bochkarev A A, Velikanov E G, Rebrov A K, Sharafutdinov R G and Yarygin V N 1974 *Experimental Methods in Dynamics of Rarefied Gases* // Novosibirsk, IT AS USSR 6-23
12. Yarygin V N, Prikhodko V G and Yarygin I V 2018 *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 59 801–8
13. Gerasimov J and Yarygin V 2012 *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics* **13(1)** <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/295/>
14. Zarvin A E, Korobeishchikov N G, Kaljada V V, Madirbaev V Z and Khodakov M D 2011 *4th Central Eur. Symp. on Plasma Chemistry, Zlatibor, Serbia* // Ed. M M Kuraica and B M Obradović. P. 147-8.
15. Zarvin A E, Kalyada V V, Madirbaev V Zh, Korobeishchikov N G, Khodakov M D, Yaskin A S, Khudozhnikov V E and Gimelshein S F 2017 *IEEE Trans Pl Sci* 45 819-27
16. Kislyakov N I, Rebrov A K and Sharafutdinov R G 1975 *J Appl Mech Tech Phys* 16 187-95
17. Smith J A and Driscoll J F 1975 *J. Fluid Mech.* **72** 695-719.