

УДК 532.529

Истечение газа из сверхзвукового сопла с экраном в вакуум^{*}

В.Н. Ярыгин, В.Г. Приходько, П.А. Сковородко, И.В. Ярыгин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

В работе экспериментально и численно исследуются обратные потоки, возникающие при истечении газа из сверхзвукового сопла в вакуум. Обсуждаются возможности управления обратными потоками (их минимизации) с помощью газодинамических защитных устройств — экранов, устанавливаемых на выходную часть сопла. Показано, что при неудачном выборе экрана возможно не уменьшение, а даже увеличение обратного потока.

Ключевые слова: сверхзвуковое сопло, истечение в вакуум, обратный поток, газодинамические защитные устройства.

При струйном истечении реального газа из звукового либо сверхзвукового сопла в вакуум предельный угол расширения струи относительно оси сопла Θ_{\max} превышает 90° . Потоки газа при $\Theta > 90^\circ$ принято называть обратными. Такие потоки возникают при работе двигателей ориентации и управления космических аппаратов, высоковакуумных струйных насосов, а также в ряде вакуумных технологических устройств. Как правило, обратные потоки имеют негативный, загрязняющий характер, и поэтому возникает задача их минимизации.

Если в качестве двигателей ориентации и управления используются жидкостные ракетные двигатели малой тяги, как, например, на Международной космической станции (МКС), то обратные потоки формируются не только из газовой (продукты сгорания), но и из капельной фазы, возникающей вследствие диспергирования на выходной кромке сопла пристенной пленки топлива, используемой для охлаждения камеры сгорания и сопла двигателя [1, 2].

Уменьшить обратные потоки можно с помощью специальных защитных устройств (экранов), устанавливаемых на выходную часть сопла [3]. Основное внимание в работе [3] было уделено уменьшению обратных потоков капельной фазы. В настоящей работе экспериментально и численно исследуется влияние экрана на величину обратных потоков газа за сверхзвуковым соплом. Установлено, что не всякий экран вызывает уменьшение обратного потока, некоторые экраны могут вызвать даже увеличение обратного потока. Схема сопла с экраном приведена на рис. 1.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00436.

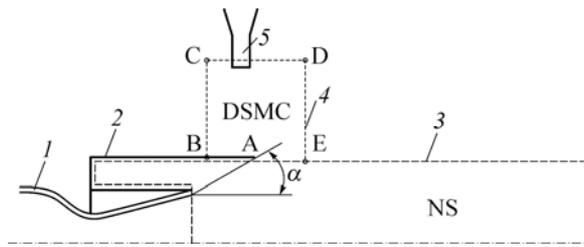


Рис. 1. Схема сопла с экраном.

1 — сопло, 2 — экран, 3, 4 — границы областей расчета для NS и DSMC-алгоритма, 5 — датчик полного давления.

В экспериментах использовалось коническое сопло с полууглом раствора $14,2^\circ$, диаметром критического сечения $d_* = 10$ мм и диаметром среза $d_a = 20$ мм (геометрическое число Маха $M = 2,94$), соотношение диаметров экрана и сопла $d_s/d_a = 1,75$. Угол α изменялся от 30° до 90° . Рабочий газ (воздух) подавался от компрессора через буферную емкость, состоящую из четырех стандартных 40-литровых баллонов. Характерные значения параметров торможения составляли: $T_0 = 293$ К, $P_0 = 10^5$ Па. Параметры сопла были выбраны из условий моделирования двигателей управления МКС [3].

Эксперименты проводились на вакуумной газодинамической установке ВИКИНГ Института теплофизики СО РАН, описание которой можно найти в работе [4]. Достаточно большой объем рабочей камеры (около 150 м^3) обеспечивал широкие возможности для исследований обратных потоков в импульсных режимах работы установки. При этом длительность импульса не превышала 1 с и выбиралась из условий существования обратных потоков. Измерения обратных потоков проводились с помощью датчика полного давления (трубки Пито), в качестве которого использовался ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-10. Положение датчика относительно сопла и экранов показано на рис. 1.

Типичные результаты измерений приведены на рис. 2. На графике представлены результаты экспериментов с длительностью газового импульса 0,4 с. Видно, что имеет место достаточно быстрый (около 0,1 с) выход сопла на режим, затем показания датчика давления в течение 0,2–0,3 секунды почти не изменяются. За время короткого импульса

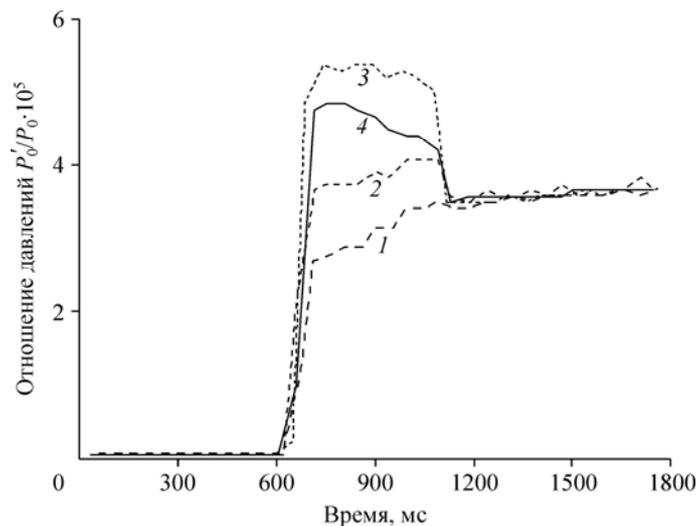


Рис. 2. Временная зависимость сигнала ионизационного датчика.

$P_0 = 1,05 \cdot 10^5$ Па; экран при $\alpha = 90^\circ$ (1), 45° (2), 30° (3), экран отсутствует (4).

окружающий газ не успевает повлиять на измеренное давление, и лишь примерно через 0,5 с начинает проявляться влияние внешнего фона. За полное давление принимались показания датчика сразу после выхода на режим (≈ 750 мс на рис. 2). После окончания импульса датчик показывает установившееся давление в вакуумной камере.

Чтобы уменьшить погрешность измерений тарировка ПМИ-10 проводилась после каждой серии экспериментов. Градуировалась вся измерительная цепь. По результатам находились градуировочные зависимости для датчиков давления. В большинстве случаев разброс данных по давлению в камере в конце импульса не превышал 10 %.

Представленные результаты иллюстрируют, что экраны оказывают весьма существенное влияние на величину обратных потоков. Наиболее интересным является факт, что это влияние немонотонно — экраны с углами 90° и 45° уменьшают обратный поток, а для экрана с углом 30° обратный поток больше, чем для сопла без экрана. Этот вывод важен для практических приложений.

Наряду с экспериментами проводились расчеты течения внутри сопла и экрана и за экраном. Течение внутри экрана в области, обозначенной как NS на рис. 1, моделировалось в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье–Стокса (NS-алгоритм), которые решались численно с помощью оригинального алгоритма, основанного на использовании разнесенной разностной сетки [5]. Распределение параметров на срезе сопла, которое выступало в качестве одного из граничных условий, отыскивалось в рамках параболизированных уравнений Навье–Стокса (PNS-алгоритм), которые решались маршевым методом [5].

Течение за экраном моделировалось с использованием двух подходов: прямого статистического моделирования методом Монте–Карло (DSMC [6]) и PNS-алгоритма. Последний оказался эффективным для описания периферийной области струи, истекающей в вакуум. Прямоугольная область ABCDE, в которой течение моделировалось в рамках DSMC-алгоритма, схематично показана на рис. 1.

Для расчета поля течения в рамках PNS-алгоритма начальная ортогональная поверхность выстраивалась на основе распределения параметров, полученных по NS-алгоритму, при этом построение начиналось от кромки среза экрана (либо сопла, в случае отсутствия экрана) и продолжалось вплоть до оси потока. Расчеты по PNS-алгоритму проводились до расстояния 10 м от сопла, где поток может рассматриваться как полностью радиальный с высокой степенью точности.

Сравнение измеренных и рассчитанных значений относительного обратного потока для различных углов α (различных длин экрана) приведено на рис. 3. В расчетах относительный обратный поток определялся как отношение расхода в угол $\Theta > 90^\circ$ с экраном к таковому без экрана. В экспериментах относительный обратный поток определялся как отношение показаний ионизационного датчика для сопла с экраном к показаниям датчика для сопла без экрана. Сравнение данных экспериментов и расчетов именно

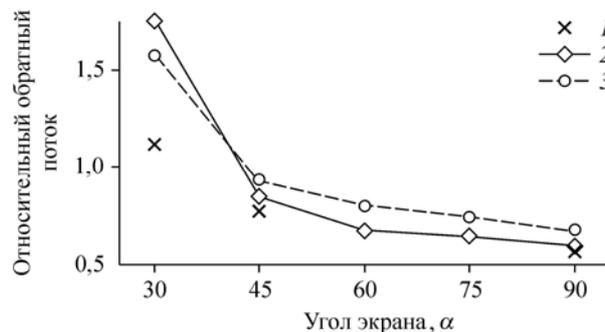


Рис. 3. Влияние экрана на обратный поток.

1 — эксперимент, 2 — DSMC, 3 — PNS.

в относительных величинах является наиболее корректным, поскольку в условиях проведенных экспериментов на показания датчика оказывали влияние эффекты вязкости и разреженности, величины которых были близки как для одиночного сопла, так и для сопла с экраном.

Из рис. 3 видно, что экспериментальные и численные данные качественно согласуются. В исследованном диапазоне параметров экрана его влияние, как отмечалось выше, в экспериментах и расчетах неоднозначно: при $\alpha > 35^\circ$ наличие экрана приводит к уменьшению обратного потока по сравнению со случаем сопла без экрана, а при $\alpha < 35^\circ$ — к увеличению. Последний эффект может быть вызван нарастанием пограничного слоя в длинном экране.

Список литературы

1. **Trinks H., Kaelsch I.** Exhaust plume effects of small thrusters on spacecraft // AIAA Paper. 1987. No 87-1603.
2. **Dettleff G., Plahn K.** Experimental investigation of fully expanding free jets and plume // Proc. of the 21st Int. Symp. RGD. 1998. Vol. 1. P. 607–614.
3. **Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н.** Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Ч. 1. Модельные эксперименты // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 279–296.
4. **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.
5. **Сковородко П.А.** Два подхода к моделированию течения в затопленной струе // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 6. С. 95–100.
6. **Bird G.A.** Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. 458 p.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2016 г.