

**КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ**

УДК 532.529

**Управление пространственной структурой течения за сверхзвуковым соплом в вакууме**

**В.Г. Приходько, И.В. Ярыгин, В.Н. Ярыгин**

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

E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

Рассматриваются особенности истечения в вакуум газовых потоков. Показана возможность уменьшения обратных потоков путем локального повышения окружающего давления в области выходной кромки сопла.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое сопло, истечение в вакуум, обратный поток, экран.

Известно, что одной из особенностей формирования газодинамической структуры течения за сверхзвуковым соплом в вакууме (например, угловых распределений плотности или давления) является возникновение обратных (направленных под углом более  $90^\circ$  относительно оси сопла) потоков. Их величина зависит от рода газа (отношения удельных теплоемкостей), числа Маха сопла и режима течения в нем (числа Рейнольдса) и по порядку величины не превышает нескольких процентов общего расхода газа через сопло. Как правило, обратные потоки играют негативную роль, поэтому прилагаются усилия к их уменьшению. Наиболее заметно негативный характер обратных потоков проявляется при работе жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ), которые используются в качестве двигателей управления и ориентации космических аппаратов и космических станций, включая Международную космическую станцию (МКС). Как показывают результаты натурных [1] и модельных [2, 3] исследований, присопловая поверхность МКС подвергается интенсивному загрязнению продуктами сгорания топлива. Для уменьшения (а в пределе — исключения) загрязняющего воздействия струй ЖРДМТ были предложены, исследованы и оптимизированы (при моделировании в вакуумных камерах) различные варианты газодинамических защитных устройств (экранов), разработаны их конструкции и в дальнейшем установлены на двигатели ориентации Служебного модуля «Звезда» МКС, что позволило на несколько порядков уменьшить загрязняющее воздействие струй ЖРДМТ [4].

Цель данной работы состоит в исследовании основного механизма влияния экрана на уменьшение обратных потоков. Выполнен цикл экспериментальных исследований с экраном и без него, но при давлении в вакуумной камере, равном давлению внутри экрана. Показано, что установка замкнутого экрана на выходную часть сверхзвукового сопла приводит к повышению давления в области среза сопла и, как следствие, меняет условия

истечения из сопла. Этот результат, по мнению авторов, имеет важное методологическое значение с точки зрения управления пространственной структурой течения за сверхзвуковыми соплами.

Экспериментальные исследования выполнялись на крупномасштабной вакуумной газодинамической установке ВИКИНГ (объемом  $150 \text{ м}^3$ ) Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. В работе использовалось сверхзвуковое сопло с геометрическим числом Маха  $M = 3$  (с конической формой сверхзвуковой части и диаметрами критического и выходного сечений сопла  $d_* = 10 \text{ мм}$  и  $d_a = 20 \text{ мм}$  соответственно). В качестве рабочего газа использовался воздух при комнатной температуре. Сопло было установлено внутри вакуумной камеры выходным сечением вниз.

Конструктивная схема сопла с установленным экраном представлена на рис. 1. Разработанная конструкция предусматривает возможность измерения давления в полости между экраном и соплом. Для исследования влияния угла  $\alpha$  (см. рисунок) на величину давления в полости между экраном и соплом были изготовлены сменные экраны различной длины с углами  $\alpha = 30, 45 \text{ и } 60^\circ$ . При этом отношение внутреннего диаметра экрана к выходному диаметру сопла выбрано постоянным и равным 1,75. Для измерения давления в пространстве между соплом и экраном использовался датчик-тензомодуль ТДМ-2Д. Выходной сигнал датчика регистрировался с помощью цифрового вольтметра АВМ-4306, подключенного к компьютеру для записи данных. Перед проведением экспериментов осуществлялась тарировка аппаратуры в стационарном режиме (в покоящемся газе) при заданном постоянном давлении в рабочей камере, которое контролировалось емкостным мембранным вакуумметром MKS Baratron Type 626A.

В последующих экспериментах измерялись поперечные профили полного давления в трех сечениях за соплом без экрана. Для записи поперечного профиля давления за срезом сопла без экрана на координатном механизме крепился датчик давления типа ТДМ-А с трубкой Пито диаметром 1,2 мм. Координатный механизм позволял с точностью около 0,1 мм устанавливать положение датчика относительно среза сопла во время эксперимента. Расстояние  $X$  от среза сопла до датчика давления (входной части трубки Пито) устанавливалось таким же, как расстояние от среза сопла до среза экрана в экспериментах с экраном, а давление в вакуумной камере  $p_\infty$  выбиралось равным измеренному давлению  $p$  внутри соответствующего экрана. Давление торможения  $p_0$  было одинаковым во

всех режимах и составляло  $p_0 = 1,09 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (расход воздуха  $G = 20 \text{ г/с}$ ). Результаты измерений давления внутри экранов и поперечных профилей полного давления в струях за соплом без экранов для трех давлений в вакуумной камере приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, необходимо сделать несколько общих замечаний относительно свободного истечения газа из сопла в покоящуюся среду с малым противодавлением (в данном случае в вакуум).

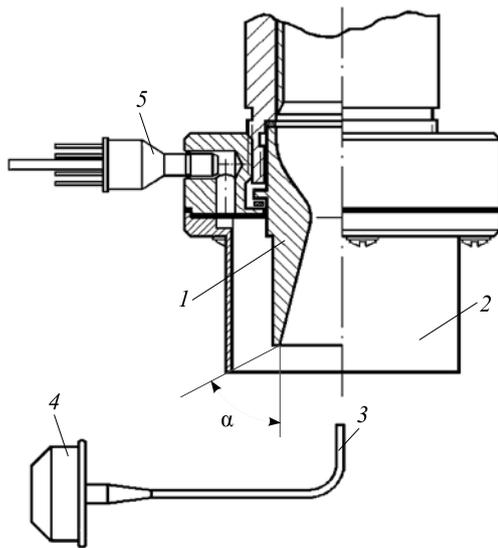
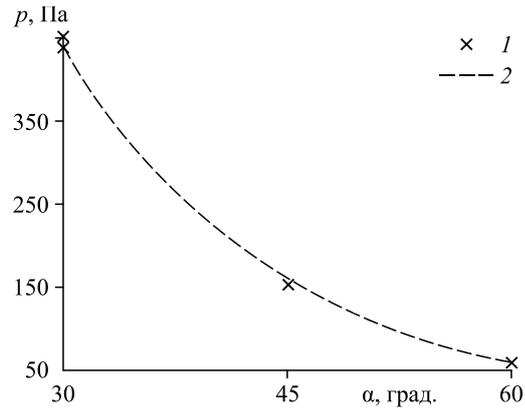


Рис. 1. Схема сопла с экраном.  
1 — сопло, 2 — экран, 3 — трубка отбора давления (трубка Пито), 4 — датчик полного давления ТДМ-А, 5 — датчик давления ТДМ-2Д.

Рис. 2. Зависимость давления  $p$  в полости между соплом и экраном от угла  $\alpha$  установки экрана.

1 — данные эксперимента, 2 — интерполяция.



Возникающая при этом за соплом структура течения относится к классу так называемых сильно недорасширенных струй и включает в себя начальный, ограниченный боковым и центральным скачками уплотнения (дискон Маха для струи за звуковым соплом и  $x$ -образной конфигурацией за сверхзвуковым), и основной участки. Положение центрального скачка уплотнения (длина начального участка струи  $L$ ) в струе за сверхзвуковым соплом может быть оценена по зависимости [5]

$$L/d_a = 0,69 \cdot M \sqrt{\kappa \frac{p_a}{p_\infty}},$$

где  $\kappa$  — отношение удельных теплоемкостей,  $p_a$  — давление на срезе сопла. Проведенные оценки для условий настоящей работы показали значения  $L/d_a = 7,04, 12,05$  и  $19,05$  для режимов с углами  $\alpha = 30, 45$  и  $60^\circ$  соответственно. При этом измерения профилей давления проводились в сечениях на относительных расстояниях от среза сопла  $L/d_a = 0,75, 0,37$  и  $0,19$ , то есть на расстояниях менее одного диаметра выходного сечения сопла.

Что касается режимов течения в недорасширенных струях, то в качестве определяющего параметра может быть принято число Рейнольдса  $Re_L = Re_* / N^{0.5}$  (здесь  $Re_* = 4 \cdot G / (\pi \cdot d_* \cdot \mu)$  — число Рейнольдса, определяемое по параметрам в критическом сечении сопла,  $N = p_0 / p_\infty$  — перепад давлений, определяющий, по сути, длину начального участка), позволяющее классифицировать режимы течения по видам: от турбулентного (при  $Re_L > 10^4$ ) до режима с эффектами разреженности (при  $Re_L < 10^2$ ) [6]. Заметим, что если число

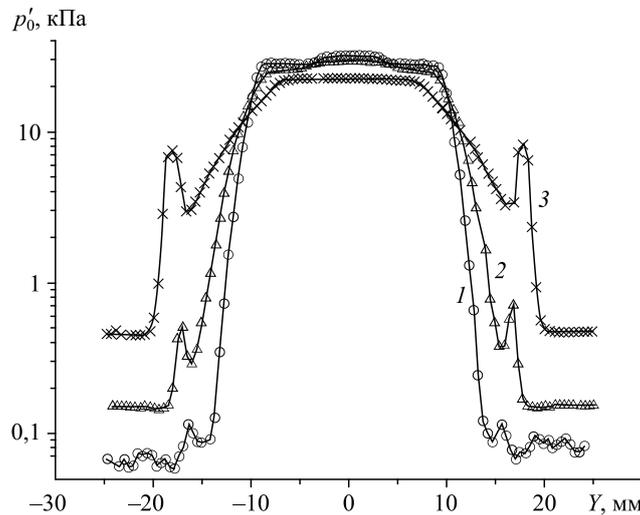


Рис. 3. Профили полного давления  $p'_0$  за соплом при разных давлениях  $p_\infty$  в вакуумной камере.

1 —  $p_\infty = 59$  Па ( $\alpha = 60^\circ$ ), 2 —  $p_\infty = 151$  Па ( $\alpha = 45^\circ$ ),  
3 —  $p_\infty = 451$  Па ( $\alpha = 30^\circ$ ).

Рейнольдса  $Re_*$  характеризует режим течения в пограничном слое внутри сопла и в условиях данных экспериментов сохранялось постоянным, то число Рейнольдса  $Re_L$  характеризует режим течения в слое смешения за боковым скачком и в недорасширенной струе в целом. В экспериментах данной работы число Рейнольдса  $Re_* = 1,4 \cdot 10^5$ , а число  $Re_L$  изменялось в диапазоне  $(3,3 \div 8,9) \cdot 10^3$ , что по классификации, представленной в работе [6], соответствует переходным режимам течения от турбулентного к ламинарному.

Вернемся теперь к обсуждению полученных результатов. Поскольку измерения проводились вблизи среза сопла, на расстояниях менее одного калибра, где только начинается формирование ударно-волновой структуры недорасширенной струи, за поперечный размер струи было принято расстояние между боковыми скачками уплотнения. Из приведенных результатов видно, что поперечные размеры струй, снятые на разных выбранных расстояниях от среза сопла и при различных давлениях в вакуумной камере, примерно одинаковы и достаточно близки к выходному диаметру экрана (35 мм). На рис. 3 видно также возрастание интенсивности бокового скачка уплотнения по мере удаления от сопла, связанное с отмеченным выше формированием недорасширенной струи. Из представленных результатов можно, по-видимому, сделать вывод, что при истечении газа из сопла с замкнутым экраном в область пониженного давления (в пределе — в вакуум) течение внутри экрана формируется таким образом, что граница струи совпадает с выходной кромкой экрана (её поперечный размер в выходном сечении экрана всегда равен диаметру экрана). Основной вывод, который следует из результатов проведенных исследований, заключается в том, что с помощью замкнутого экрана, устанавливаемого на выходную часть сопла, можно определяющим образом влиять на пространственную структуру течения в струе за соплом.

#### Список литературы

1. **Rebrov S., Gerasimov Y.** Investigation of the contamination properties of bipropellant thrusters // AIAA 35th Thermophysics Conf., 11–14 June 2001, Anaheim, California. AIAA Paper. 2001. No. 2001–2818.
2. **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.
3. **Lengrand J.C., Prikhodko V.G., Skovorodko P.A., Yarygin I.V., Yarygin V.N.** Outflow of gas from a supersonic nozzle with screen into vacuum // Proceedings 27th Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, July 10–15 2010, AIP Conf. Proc. 2011. Vol. 1333. P. 583–588.
4. **Yarygin V., Gerasimov Yu., Krylov A., Prikhodko V., Yarygin I.** Experimental study of the intern. space station contamination by its orientation thrusters jets // Microgravity Sci. and Technology. 2011. Vol. 23, Iss. 1. P. 15 – 23.
5. **Lewis C., Carlson D.** Normal shock location in underexpanded gas and gas-particle jets // AIAA J. 1964. Vol. 2, No. 4. P. 776–777.
6. **Авдеевский В.С., Иванов А.В., Карпман И.М., Трасковский В.Д., Юделович М.Я.** Влияние вязкости на течение на начальном участке сильно недорасширенной струи // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197, № 1. С. 46–49.

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.,  
после доработки — 5 мая 2021 г.,  
принята к публикации 18 мая 2021 г.*