

03;12

©1993 г.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ ИЗ КОЛЬЦЕВОГО ЗВУКОВОГО СОПЛА

*Б.М.Добрынин*, *В.Г.Масленников*, *В.А.Сахаров*, *Е.В.Серова*

На ударной трубе проведено экспериментальное исследование истечения тетрафторметана и аргона из кольцевого звукового сопла. Исследовано влияние размера центрального тела на газодинамическую структуру начального участка кольцевой звуковой струи в широком диапазоне изменения нерасчетности истечения ( $0.7 < n < 10^3$ ). Методом сдвиговой интерферометрии получены радиальные распределения плотности в различных сечениях струи при истечении в форвакуум. Проведено исследование процесса перехода от течения с открытой донной областью к течению с закрытой и обратно. Установлена зависимость определяющих параметров истечения от размера центрального тела в условиях перехода.

Развитие авиационной и ракетной техники тесно связано с разработкой экономичных реактивных двигателей. Большой исследовательский интерес в этой связи проявляется к соплам, обладающим саморегулированием по высоте. Это так называемые сопла с центральным телом или кольцевые сопла. Наличие поверхности свободного расширения и вязкого отрывного течения за центральным телом такого сопла позволяет течению подстраиваться под изменяющиеся внешние условия. Это уменьшает потери тяги на малых высотах по сравнению с аналогичным соплом Лавалея. Использование сопел с укороченным центральным телом уменьшает их габариты и вес. Применяемые в качестве ракетных двигателей многосопловые компоновки приближенно могут рассматриваться как кольцевое сопло. Кольцевые струйные течения находят применение также в различных технологических процессах, например в порошковой металлургии.

Возможны два режима истечения газа из кольцевого сопла. При малом отношении давления на срезе сопла к внешнему давлению область отрывного течения за центральным телом является открытой. Параметры газа в отрывной области в этом случае существенно зависят от свойств затопляющей струю среды. Второй режим — истечение с закрытой донной областью характеризуется зависимостью параметров газа за центральным телом только от состояния истекающего газа. Этот режим реализуется при сравнительно малом давлении внешней среды. Значение нерасчетности истечения, при котором происходит переход от одного режима к другому, называется критическим.

В теоретических исследованиях последних лет достаточно полно представлены приближенные и точные методы расчета течений в коль-

цевых соплах [1,2] и струях [3], позволяющие определить как интегральные, так и локальные характеристики таких течений. Экспериментальные исследования истечения из кольцевых сопел в основном посвящены определению тяговых характеристик [1]. Число экспериментальных исследований локальных параметров таких течений невелико. Так, в работе [4] исследовалось истечение газа из кольцевого сверхзвукового сопла при различной относительной длине центрального тела и степени расширения потока. Показано, что с увеличением относительной длины центрального тела в режиме истечения с закрытой донной областью донное давление уменьшается, а значение критической нерасчетности истечения увеличивается. Исследованию влияния числа Маха сверхзвукового потока на структуру течения вблизи среза кольцевого сопла посвящена работа [5], в которой показано, что увеличение числа Маха струи приводит к уменьшению донного давления в режиме истечения с закрытой донной областью. Значение критической нерасчетности при этом также уменьшается. Анализируются ударно-волновая структура начального участка струи, распределение давления вдоль оси следа, размеры струи и отрывной зоны. Отмечается, как и в работе [4], возникновение низкочастотных колебаний донного давления при переходе к режиму истечения с открытой донной областью. Установлено, что при подходе к режиму перехода со стороны больших или меньших значений нерасчетности величины ее критических значений отличаются на 10–20%.

Возможность реализации двух режимов истечения из кольцевого сопла выдвигает на первый план задачу изучения влияния определяющих параметров истечения на процесс перехода. До сих пор детальное исследование этой задачи не проводилось. С учетом сложности изучаемого явления объектом исследования было выбрано истечение из кольцевого звукового сопла. Такой выбор был продиктован, с одной стороны, отсутствием экспериментальных данных о влиянии относительного размера центрального тела на газодинамику течения и, с другой стороны, возможностью сохранения постоянства параметров газа на срезе сопла при изменении размера центрального тела. В этом случае единственным параметром, характеризующим геометрию сопла, является относительный размер центрального тела.

Исследования проводились на ударной трубе. Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую трубу с внутренним диаметром 100 мм и общей длиной 18 м. Истечение из сопловой приставки, расположенной в торце канала ударной трубы, происходило в барокамеру объемом 6 м<sup>3</sup>. Длина камеры высокого давления в зависимости от требований эксперимента может изменяться от 1,5 до 11 м. Давление толкающего газа в камере, достигающее 50 МПа, обеспечивается с помощью баллонной и компрессорной станций. Остаточное давление в канале трубы и барокамере перед заполнением их рабочими газами составляет 1 Па. Установка может работать в двухдиафрагменном режиме с созданием в канале ударной трубы ударных волн различной интенсивности и истечением газа из области за отраженной ударной волной. Реализуется также режим работы трубы Людвига, когда процесс истечения начинается при разрушении диафрагмы, перекрывающей вход в сопло, при постепенном повышении давления рабочего газа в канале трубы. Наконец, на установке может быть реализован процесс адиабатического сжатия газа в канале трубы с помощью поршней различной массы. Анализ протекания исследуемых процессов ведется на основе результатов измерения рас-

пределений плотности, получаемых в различные моменты времени с помощью поляризационного интерферометра сдвига. В различных точках поля течения ведется также измерение импульсно меняющихся давлений с помощью пьезодатчиков.

Во всех экспериментах радиус выходной кромки звукового кольцевого сопла  $R_a$  оставался постоянным и равным 20 мм, а радиус центрального тела  $r_0$  изменялся и был равен 3.5, 7.5 и 15 мм. Относительный размер центрального тела  $r = r_0/R_a$  при этом был соответственно равен 0.18, 0.38 и 0.75. В качестве рабочих газов использовались тетрафторметан и аргон, а истечение происходило в воздухе, давление которого в барокамере изменялось в диапазоне 0.1–100 кПа.

При работе экспериментальной установки в режиме трубы Людвига осуществлялось квазистационарное истечение из сопла в течение 3–5 мс с последующим уменьшением давления в волне разрежения. В этом случае проводилось исследование ударно-волновой структуры начального участка кольцевой струи и особенностей перехода от режима истечения с закрытой донной областью к течению с открытой. Давление рабочего газа на срезе сопла в квазистационарной фазе истечения составляло 300 кПа. В режиме адиабатического сжатия газа поршнем в сопле реализовывался колоколообразный профиль давления того же порядка, что и в предыдущем случае. Длительность импульса давления на половинном уровне амплитуды составляла 2–5 мс. В этом режиме работы трубы исследовался процесс последовательного перехода от течения с открытой донной областью к течению с закрытой и обратно. Измерение давления на очи центрального тела и внутри сопла вблизи выходного сечения осуществлялось миниатюрными пьезодатчиками с диаметром чувствительного элемента менее 4 мм. В результате обработки осциллограмм давления определялись нерасчетность истечения, донное давление, а также момент перехода от одного режима течения к другому.

Обработка сдвиговых интерферограмм поля течения [6] и последующий их анализ показывают, что при истечении в форвакуум возникает симметричная относительно оси сопла ударно-волновая поверхность. Эта поверхность, берущая начало вблизи кромки центрального тела, по мере удаления от сопла приближается к оси течения, а затем плавно переходит в поверхность обратного конуса. При увеличении противодавления ударно-волновая структура начального участка струи заметно изменяется. Происходят отражение волновой поверхности от внешней границы струи и образование прямого скачка уплотнения — диска Маха. Донная область в этом случае еще остается закрытой. Дальнейшее увеличение противодавления и приближение нерасчетности истечения к критическому значению сопровождается изменением формы центрального скачка. Когда внешнее давление становится больше донного, граница струи отклоняется к оси. Это приводит к прогибу в сторону сопла приосевой части диска Маха. При достижении режима истечения с открытой донной областью центральный скачок приобретает форму неплоского кольца. При такой ударно-волновой структуре донная область оказывается открытой для воздействия со стороны затопляющего струю пространства.

В результате обработки интерферограмм зонным методом были определены поля плотности при истечении газов из кольцевых сопел в форвакуум. На рис. 1 показано радиальное распределение безразмерной плотности в различных сечениях струи тетрафторметана, истекающей из

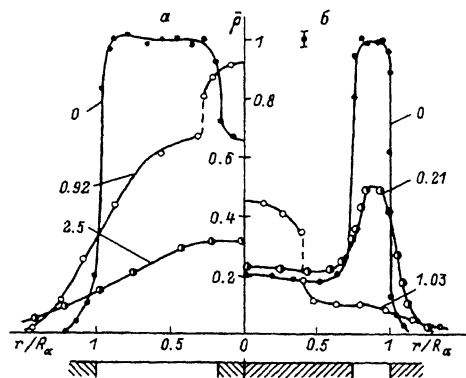


Рис. 1. Радиальное распределение безразмерной плотности тетрафторметана в различных сечениях струи, истекающей из кольцевого звукового сопла с  $\bar{r} = 0.18$  (а) и 0.75 (б).

Цифры у кривых — значения  $\bar{x}$ .

кольцевых звуковых сопел со значением  $\bar{r} = 0.18$  и 0.75. За единицу плотности было принято ее значение на срезе сопла, а координата сечения струи  $\bar{x}$  нормирована на величину  $0.5(R_\alpha + r_0)$ . Из приведенных распределений плотности видно, что на срезе сопла ( $\bar{x} = 0$ ) основная масса газа сосредоточена вблизи выходной кольцевой щели. При приближении к оси течения плотность резко уменьшается. По мере удаления от сопла профиль плотности сглаживается ( $\bar{x} = 0.21$  и 2.5). Распределение плотности остается также гладким и по обе стороны от волновой поверхности ( $\bar{x} = 0.92$  и 1.03). Положение ее на распределениях в этих сечениях отмечено штриховой линией. Как показал анализ интерферограмм течения, максимум плотности на оси течения реализуется вблизи горловины волновой поверхности, а положение этой горловины на оси определяется только размером центрального тела и не зависит от рода истекающего газа.

На рис. 2 представлено распределение безразмерной плотности вдоль оси при истечении тетрафторметана из трех исследуемых кольцевых сопел. Видно, что с увеличением размера центрального тела значения плотности на оси уменьшаются. Как оказалось, положение максимума плотности для профилей, соответствующих значениям  $\bar{r} \geq 0.38$ , реализу-

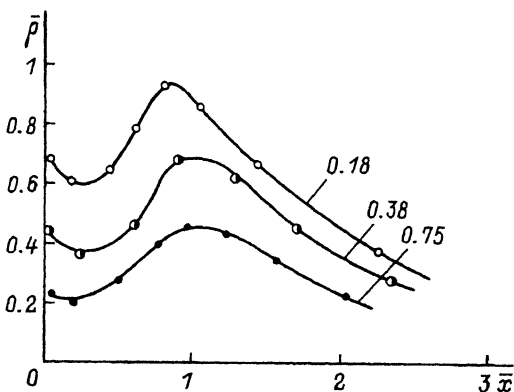


Рис. 2. Распределение безразмерной плотности тетрафторметана вдоль оси кольцевых звуковых сопел.

Цифры у кривых — значения  $\bar{r}$ .

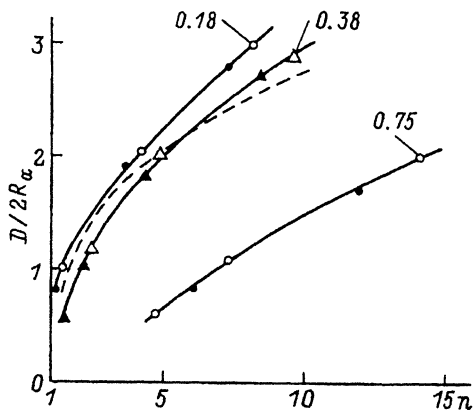


Рис. 3. Положение диска Маха в зависимости от нерасчетности истечения.

Цифры у кривых — значения  $\bar{r}$ .

ется при  $\bar{x} = 1$ , а для профиля с  $\bar{r} = 0.18$  максимум плотности реализуется при  $\bar{x} = 0.9$ . Аналогичный характер распределения плотности имеет место и при истечении аргона в форвакуум.

На рис. 3 представлены зависимости удаления диска Маха  $D$  от значения нерасчетности истечения  $n$  в струях тетрафторметана (светлые значки) и аргона (темные), истекающих из кольцевых сопел с различным значением  $\bar{r}$ . Видно, что для значений  $\bar{r} \leq 0.38$  указанные зависимости в области малых значений нерасчетности истечения  $n < 10$  приближаются к аналогичной зависимости для осесимметричной одиночной звуковой струи [7], обозначенной на графике штриховой кривой. Для тонкой кольцевой струи  $\bar{r} = 0.75$  имеет место сильное отличие от данных, полученных для одиночной струи.

На рис. 4 представлена зависимость безразмерного донного давления  $\bar{P}_i$  от величины нерасчетности истечения. Значения донного давления нормированы на величину давления в выходном сечении сопла. Светлые значки соответствуют истечению тетрафторметана, темные — аргона. Сплошной кривой на графике обозначена линия равенства донного давления внешнему. Режим истечения с открытой донной областью реализуется при малых значениях нерасчетности. Этому случаю на графике соответствует расположение экспериментальных точек вблизи сплошной кривой. С увеличением  $n$  донное давление становится меньше внешнего (экспериментальные точки расположены ниже кривой) и, начиная с некоторого значения  $n_*$ , безразмерное донное давление перестает зависеть от нерасчетности истечения, что свидетельствует о достижении режима истечения с закрытой донной областью. Видно, что отличие донного давления при  $n = n_*$  от внешнего возрастает по мере увеличения размера центрального тела и достигает 50% для сопла с  $\bar{r} = 0.75$ . Критическое значение нерасчетности истечения  $n_*$  также возрастает с увеличением размера центрального тела. Заметного влияния рода истекающего газа на эти параметры при  $n = n_*$  не обнаружено.

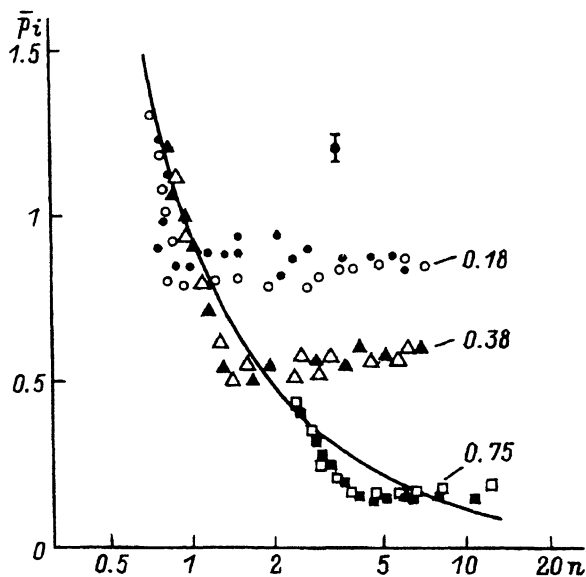


Рис. 4. Зависимость безразмерного донного давления от нерасчетности истечения. Цифры — значения  $\bar{r}$ .

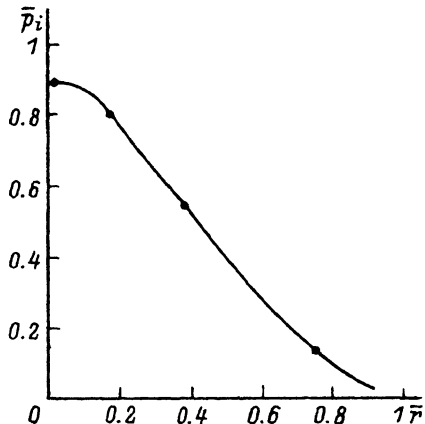


Рис. 5. Зависимость безразмерного донного давления от относительного размера центрального тела при  $n = n_*$ .

На рис. 5 представлена зависимость безразмерного донного давления при  $n = n_*$  от относительного размера центрального тела. Значение донного давления при  $\bar{r} = 0$  взято из работы [1] и соответствует результатам измерения донного давления на торце цилиндра, обтекаемого звуковым потоком. Во всем исследуемом диапазоне изменения  $0.18 \leq \bar{r} \leq 0.75$  донное давление можно считать линейно зависящим от относительного размера центрального тела. Режим истечения с открытой донной областью будет реализовываться до тех пор, пока внутренняя граница кольцевой струи не достигнет оси течения. Так как геометрическим масштабom поперечного размера одиночной струи является размер выходного сечения сопла, то применительно к кольцевому соплу логично рассмотреть зависимость критического значения нерасчетности истечения от отношения размера центрального тела к размеру выходной щели. Эта зависимость может быть описана соотношением  $n_* = 0.5 + \bar{r}/(1 - \bar{r})$ . Отсюда видно, что при  $\bar{r} < 0.33$  изменение режима течения реализуется при перерасширении потока газа в сопле ( $n < 1$ ), а для значений  $\bar{r} > 0.33$  — в недорасширенном потоке ( $n > 1$ ).

При истечении газов в форвакуум, как показали измерения, величина донного давления примерно на 15% больше величины донного давления при  $n = n_*$  для всех исследуемых кольцевых сопел. На этих режимах истечения проявляется влияние рода рабочего газа на величину донного давления. Различие значений донного давления при истечении различных газов увеличивается по мере увеличения размера центрального тела. Для сопла с  $\bar{r} = 0.75$  значение донного давления при истечении аргона оказалось на 15% меньше соответствующей величины при истечении тетрафторметана.

В режиме адиабатического сжатия газа поршнем проведены измерения донного давления при подходе к критическому значению нерасчетности истечения со стороны больших и меньших значений. Сравнение результатов измерений показало, что значения донного давления в обоих случаях совпадают, а значение нерасчетности истечения при переходе от течения с открытой донной областью к течению с закрытой приблизительно на 15% больше, чем при обратном переходе.

## Список литературы

- [1] Степанов Г.Ю., Гогиш Л.В. Квазиодномерная газодинамика сопел ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1973. 168 с.
- [2] Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 368 с.
- [3] Авдучевский В.С., Ашратов Э.А., Иванов А.В., Пирумов У.Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй. М.: Машиностроение, 1989. 320 с.
- [4] Сьюл В., Мюллер Т. // Вопр. ракетн. техн. 1974. № 2. С. 34-48.
- [5] Швец А.И. // ПМТФ. 1975. № 2. С. 59-69.
- [6] Добрынин Б.М., Ковалев П.И., Комиссарук В.А. и др. // Сб. докл. III Всесоюз. школы по методам аэрофизических исследований. Новосибирск, 1982. С. 3-6.
- [7] Авдучевский В.С., Иванов А.В., Карпман И.М. и др. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. Т. 3. С. 63-69.

Физико-технический  
институт им.А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
24 августа 1992 г.