

А. А. СЕМЕРЧАН, М. А. ПЛОТНИКОВ, А. А. АНТАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОБРАЗНОГО АЗОТА ПОД ДАВЛЕНИЕМ ОТ 4 ДО 12 КБАР ЧЕРЕЗ СОПЛО С МАЛЫМ ОТВЕРСТИЕМ

(Представлено академиком Л. Ф. Верещагиным 30 VI 1971)

Процессы истечения газов под давлением более 1000 бар в настоящее время мало изучены. Возможность реализации изоэнтропического истечения имеет прикладное значение для целей современной экспериментальной аэродинамики. С другой стороны, в экспериментальной практике нашего института известны случаи, когда истечение сильно сжатого газа, имеющего большую вязкость, происходило при изоэнтальпическом расширении газа в потоке, сопровождавшемся интенсивным повышением энтропии и температуры газа в результате проявления эффекта Джоуля — Томсона. Выходной канал из резервуара, наполненного газом, в атмосферу в этих случаях имел цилиндрическую форму с диаметром 2 мм и отношением длины к диаметру ~ 10 . Целью настоящей работы является исследование возможности реализации изоэнтропического истечения газа через сопла с отверстиями не более 0,1 мм.

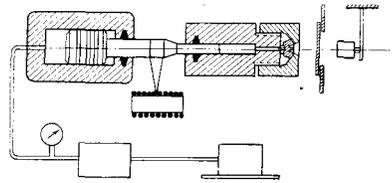


Рис. 1. Схема установки

Схема использованной установки изображена на рис. 1. Эта схема в принципиальном отношении мало отличается от схемы установки для исследования процессов истечения жидкостей (⁴). Основным элементом схемы является мультипликатор давления с питанием большого цилиндра сжатым воздухом от резервуара определенной емкости. Основное отличие этой схемы от предыдущей состоит в том, что разрывное мембранное устройство, предназначенное для приведения установки в действие, которое в случае истечения жидкости было расположено перед входом воздуха в большой цилиндр мультипликатора, установлено на газодинамической установке непосредственно за соплом, на выходе рабочего газа из малого цилиндра.

Для того чтобы средняя продолжительность истечения газа в исследуемом диапазоне давлений составляла ~ 1 сек, диаметр выходного отверстия сопла был уменьшен до 0,06 мм, а объем малого цилиндра увеличен до 3,14 см³. В качестве сопел для истечения газа были использованы выпускаемые промышленностью алмазные фильеры для волочения проволоки (ГОСТ 6271-60Т). Конфигурация внутреннего канала фильеры показана на рис. 2. Очевидно, что при такой конфигурации канала сопла сверхзвуковой участок потока должен иметь форму свободной затопленной струи. Отношение длины цилиндрической части канала h к ее диаметру d составляет 0,75. Герметичная заделка алмазных фильер в металлические оправки для использования их в качестве сопел осуществлялась при помощи эпоксидной смолы.

В результате периодического контроля возможной эрозии материала стенок отверстия в соплах в процессе длительной их эксплуатации при суммарной продолжительности истечения до нескольких минут не было обнаружено заметного изменения формы и размеров отверстий. Контроль

производился при помощи инструментального микроскопа, имеющего погрешность измерений не более 0,001 мм.

Конфигурация и размеры фасонных разрывных мембран, изготовленных из стали ЭИ 654, подобранные экспериментальным путем, показаны на рис. 3. В табл. 1 приведена зависимость давления, при котором происходил разрыв мембран, от ее размера.

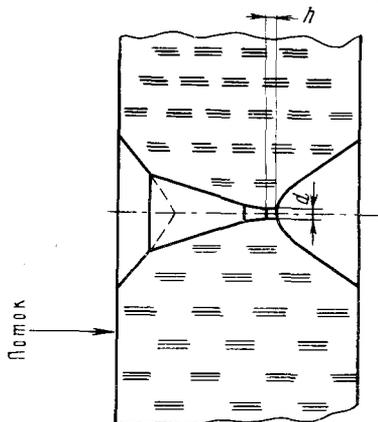


Рис. 2. Конфигурация внутреннего канала сопла. $d = 0,02 - 1,2$ мм

Установка была оснащена специально разработанным уплотнением малого поршня мультипликатора, которое обеспечивает полную герметичность цилиндра, заполненного газом, при давлениях до 20 кбар и сравнительно небольшую величину силы трения ⁽²⁾.

Для создания предварительного давления в малом цилиндре мультипликатора был использован эффект повышения давления при изохорическом изменении агрегатного состояния рабочей среды. С этой целью жидкий азот заливали в малый цилиндр мультипликатора, корпус которого был предварительно охлажден до температуры кипения азота. В результате испарения азота в замкнутом объеме при нагревании его до комнатной температуры давление повышалось до $\sim 2,8$ кбар.

По мере закачки воздуха в большой цилиндр, сообщенный с резервуаром, медленно перемещались поршни мультипликатора, производя дополнительное сжатие газа в малом цилиндре до требуемого давления. При достижении требуемой величины давления происходил разрыв мембраны, запирающей цилиндр. Истечение газа сопровождалось соответствующим перемещением поршней мультипликатора, обеспечивающим постоянное давление газа перед соплом в период истечения.

В процессе истечения были измерены расход газа и полный поток импульса свободной струи, равный полному потоку импульса в критическом сечении сопла ⁽³⁾. Для измерения расхода газа установка была оборудована устройством, позволяющим записывать закон движения поршня. Это устройство представляет реохорд, катушка которого расположена параллельно оси установки, а скользящий контакт жестко скреплен с поршнем. Расход газа определяли по измеренным значениям скорости перемещения и площади поперечного сечения поршня, а также по экспериментальным данным о плотности азота при соответствующем давлении и комнатной температуре ⁽⁴⁾.

Давление газа перед соплом в процессе истечения определяли по результатам соответствующих измерений давления в большом цилиндре мультипликатора и коэффициенту мультипликации с учетом экспериментальных данных о силе трения в уплотнениях ⁽²⁾.

Результаты экспериментов показывают, что так же, как и в случае истечения жидкости, поршни мультипликатора в процессе истечения газа двигались с постоянной скоростью, что свидетельствует о постоянстве давления перед соплом в процессе истечения.

Для измерения полного потока импульса газовых струй был использован специально разработанный прибор «импульсометр» ⁽³⁾. Для предохранения прибора от удара сердцевины мембраны, летящей с большой скоростью, применяли устройство, представляющее заслонку, которая автоматически открывалась после попадания в нее сердцевины.

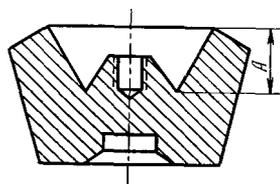


Рис. 3. Конфигурация разрывных мембран

На рис. 4 приведены полученные результаты экспериментального определения расхода газа и полного потока импульса струи в критическом сечении сопла, отнесенных к единице площади поперечного сечения потока. Экспериментальные данные сопоставлены с соответствующими расчетными. Расчетные кривые получены графическим методом при использовании $(I-S)$ -диаграммы, построенной на основе экспериментальных данных о термодинамических свойствах азота в диапазоне давлений 0,6—12 кбар и температур 180—300° К⁽⁴⁻⁶⁾.

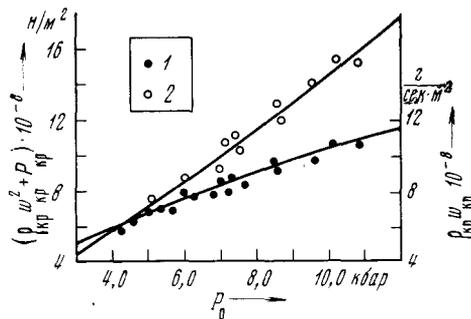


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений расхода газа и полного потока импульса струи в критическом сечении сопла: 1 — расход, 2 — импульс

Для определения термодинамических параметров газа в критическом сечении потока и критической скорости звука при изэнтропическом истечении были построены вспомогательные зависимости плотности тока ρw от энтальпии газа по ряду изэнтропических сечений диаграммы. При этом скорость потока w определяли по соответствующему перепаду энтальпий. Критические параметры потока определяли по координатам точек экстремума на кривых плотности тока. Как показывают результаты соответствующего анализа, полученные таким методом значения скорости звука в газе хорошо согласуются с расчетными и экспериментальными данными^(7, 8).

Таблица 1

Зависимость давления разрыва мембран от их размеров

A, мм	P, кбар
11,5	4,2—6,5
11,0	6,1—8,7
10,5	8,3—10,7
10,0	10,0—12,3

Из рассмотрения данных, приведенных на рис. 4, видно, что результаты экспериментального и расчетного определения двух комплексов газодинамических величин в критическом сечении сопла — $\rho_{кр} w_{кр}$ и $\rho_{кр} w_{кр}^2 + P_{кр}$ — хорошо согласуются. При этом расчетные значения рассматриваемых комплексов определены лишь при использовании экспериментальных данных о термодинамических свойствах рабочего газа и предположения об изэнтропическом изменении параметров газа в процессе истечения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при использованной конфигурации канала сопла закон изменения параметров газа в процессе истечения на дозвуковом участке потока остается близким к изэнтропическому при увеличении давления газа перед соплом до ~ 12 кбар и при уменьшении диаметра критического сечения сопла вплоть до 0,06 мм.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность акад. Л. Ф. Верещагину за ценные советы в процессе выполнения работы и при обсуждении результатов.

Институт физики высоких давлений Академии наук СССР

Поступило 15 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. А. Семерчан, М. А. Плотников, Инж.-физ. журн., № 8, 82 (1963).
² М. А. Плотников, В. Г. Новожилов, А. А. Антанович, Приборы и техн. эксп., № 2, 195 (1969).
³ М. А. Плотников, А. А. Антанович, А. А. Семерчан, Инж.-физ. журн., 14, № 1, 144 (1968).
⁴ F. Din, Thermodynamic Functions of Gases, 3, London, 1961.
⁵ А. А. Вассерман, Я. З. Казавчинский, В. А. Рабинович, Теплофизические свойства воздуха и его компонентов, «Наука», 1966.
⁶ Д. С. Циклис, Е. В. Поляков, ЖФХ, 41, № 12, 3145 (1967).
⁷ А. А. Вассерман, В. И. Селеванюк, Акустич. журн., 8, № 1, 131 (1967).
⁸ A. Michels, R. J. Lunbeck, G. J. Wolkers, Physica, 17, 801 (1951).