

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве методических
указаний
к лабораторной работе № 4.

КУЙБЫШЕВ 1984

УДК 536.2 621.438

В лабораторной работе описана конструкция лабораторной установки, изложена методика проведения эксперимента и обработки полученных данных при исследовании истечения воздуха через сопло.

Работа предназначена для студентов I, 2, 3-го факультетов, изучающих курс "Техническая термодинамика" по специальностям 0537, 0538, 1610.

Составители: А.И.Меркулов, Н.Н.Огородников, В.В.Бирюк,
А.И.Толстоногов

Рецензент А.А. Ж и р н о в

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментальное изучение процесса адиабатного истечения воздуха через суживающееся сопло, подтверждение теоретической зависимости изменения расхода газа.

З а д а ч а р а б о т ы: исследовать изменение расхода воздуха, вытекающего из суживающегося сопла, в зависимости от степени расширения по давлению.

Теоретические основы процесса

Процессы движения газов по каналам осуществляются во многих машинах и аппаратах. Поэтому изучение этих процессов и связанных с ними различных преобразований энергии в движущемся потоке газа приобретает важное значение.

Основной задачей термодинамического анализа применительно к газовому потоку является определение скорости истечения, секундного расхода газа, а также установление условий, существенно влияющих на процесс истечения и его эффективность.

В данной работе считаем, что течение газового потока изоэнтропное и стационарное.

При адиабатном течении газа увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения его энтальпии, а следовательно, и внутренней энергии. Увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры, а следовательно, и при уменьшении местной скорости звука. Теоретически расход газа через сопло определится по выражению

$$m_T = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

Здесь f - сечение сопла, м^2 ;
 k - показатель адиабаты для газа;
 ρ - плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 p - давление, Па.

Если в формуле (1) рассмотреть выражение, находящееся под знаком корня, то можно увидеть, что оно представляет собой плотность тока через сопло - расход через единицу площади в единицу времени. Это понятие определяется из уравнения постоянства расхода

$$\rho c = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} p_1 \rho_1 \sqrt{\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (2)$$

Размерность левой и правой части уравнения (2) будет $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$. Если принять, что в (2) $p_1 = \text{const}$, $\rho_1 = \text{const}$, а p_2 изменяется, оставаясь постоянным во время процесса истечения, то плотность тока обращается в нуль дважды: при значении $p_2 = p_1$ (так как $\frac{p_2}{p_1} = \beta = 1$) и $p_2 = 0$ (когда $\beta = 0$).

Подставляя при этих условиях в (2) ряд значений β , промежуточных между 1 и 0, можно рассмотреть график плотности тока $0-k-1$ (рис. 1): график имеет максимум при $\beta_{кр}$. Здесь производная $\frac{d(\rho c)}{d\beta}$ обращается в нуль, что приводит к следующему выражению для $p_2 = p_{кр}$:

$$\frac{2}{k} \left(\frac{p_{кр}}{p_1}\right)^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} \left(\frac{p_{кр}}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} = 0.$$

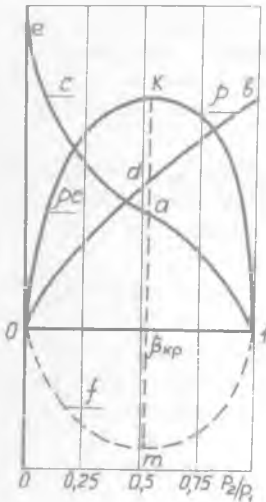
откуда следует, что

$$\frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \beta_{кр}.$$

Если на графике плотности тока (рис. 1) показать изменение параметров: скорости истечения c и плотности ρ , то они выразятся кривыми $0ac$ и $0db$ соответственно. Причем плотность будет изменяться от значения ρ_{max} при $\beta = 1$ до $\rho \rightarrow 0$ при $\beta \rightarrow 0$. Это следует из уравнения состояния идеальных газов

$$\rho = \frac{p}{RT}.$$

Скорость будет возрастать от значения $c=0$ (при $\beta=1$, $p_1=p_2$ истечения



Р и с. 1. График изменения параметров газа для сопла

нет) до значения C_{max} при $\beta \rightarrow 0$, где $C_{max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1}$. Для обеспечения изменения скорости, плотности газа и плотности тока согласно рис. I необходимо специальным образом профилировать канал сопла. Так как расход газа через сопло будет величиной постоянной, то из уравнения расхода получим $f = \frac{m}{\rho C}$. График изменения площади представлен на рис. I, кривая $Om1'$.

Так как при $\beta_{кр}$ плотность тока имеет максимальную величину, то расход газа в этом случае будет максимален для данной площади сопла.

Опыт показывает, что расходу газа, соответствует правая ветвь графика (рис. I, кривая I-a), совпадающая с результатами, следующими из уравнения (I). Это объясняется тем, что давление на срезе сопла p_2 и давление среды p_2' , куда истекает газ, в каждом опыте оказываются равными ($p_2 = p_2'$) вплоть до достижения критического отношения давлений $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2'}{p_1} = \beta_{кр}$, когда при дальнейшем понижении давления среды p_2' расход газа остается максимальным и неизменным. В этом случае давление газа на срезе сопла p_2 равно критическому $p_{кр}$, при котором скорость истечения становится равной местной скорости звука.

Изменение расхода по левой ветви графика рис. I (кривая a-0) вследствие вышеизложенного не может быть обеспечено, так как эта ветвь построена при предположении, что давление в устье сопла p_2 продолжает изменяться (уменьшаться) одновременно с понижением давления p_2' среды, куда истекает газ. В действительности же $p_2 = const$ при сверхкритическом режиме истечения, следовательно, согласно уравнению (I), $m_T = const$.

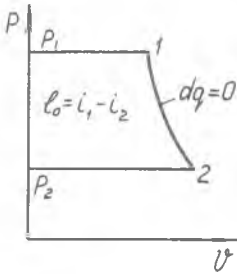
Таким образом, понижением давления в среде ниже критического нельзя добиться такого же понижения давления в устье суживающегося сопла, а значит - нельзя в нем получить скорость выше скорости звука и увеличить расход газа через него.

Используя аналитическое выражение первого начала термодинамики в форме $dq = di - vdp$, можно определить, что при истечении обратимого адиабатного потока $di = -vdp$, и, следовательно, располагаемая работа, которая может перейти в кинетическую энергию потока, определяется через энтальпию газа:

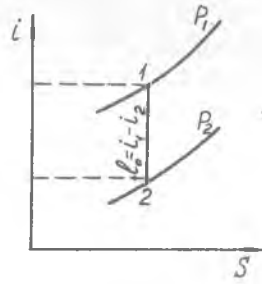
$$l_0 = - \int_{i_1}^{i_2} di = i_1 - i_2. \quad (3)$$

Графически располагаемая работа газа в $p-v$ диаграмме для процесса истечения I-2 изображается в виде площади, ограниченной кривой

процесса, линиями $p=p_1$ и $p=p_2$ и осью ординат (рис.2). Располагаемый теплоперепад (3) удобно изображать в i - S диаграмме (рис. 3).



Р и с.2. Располагаемая работа газа

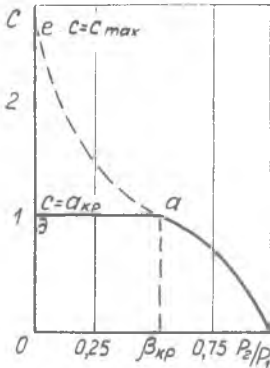


Р и с.3. Располагаемый теплоперепад потока

Скорость истечения из резервуара определяется располагаемым теплоперепадом $C = \sqrt{2(i_1 - i_2)}$, или для случая адиабатного истечения при $C_T=0$

$$C = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4)$$

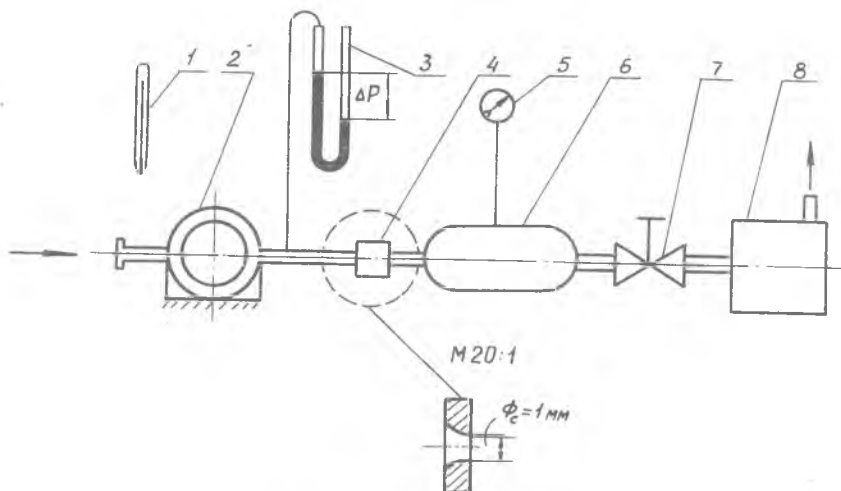
Графически теоретическое изменение скорости при истечении газа через сопло изображается кривой I-a-e (рис. 4). Эксперимент показывает, однако, что значение скорости хорошо согласуется с правой частью кривой I-a, а затем остается постоянным $a-d$, т.е. значение скорости истечения достигает своего максимального значения, равного местной скорости звука при $\beta = \beta_{кр}$, а затем для сужающегося сопла остается постоянным, так как перераспределения давления внутри сопла при $\beta < \beta_{кр}$ не происходит, и, следовательно, не изменяется давление на срезе сопла.



Р и с. 4. Скорость истечения через сопло

Описание лабораторной установки

На рис. 5 приведена схема экспериментальной установки. На ней показано исследуемое суживающееся сопло 4, через которое происходит истечение воздуха при перепаде давлений $\beta = \frac{P_2}{P_1}$. Объемный расход воз-



Р и с. 5. Схема установки

духа на установке измеряется с помощью лабораторного газового счетчика 2. Воздух из окружающего помещения (резервуара неограниченной емкости) поступает через газовый счетчик по воздухопроводу к соплу. Перед счетчиком измеряется температура поступающего воздуха с помощью ртутного термометра. Замер давления перед соплом и давления в ресивере 6 осуществляется водяным пьезометром 3 и вакуумметром 5. Требуемый перепад давления на сопловом устройстве и установка режимов при работе осуществляются с помощью вентиля 7. Воздушный поток создается вакуумным насосом 8.

Порядок выполнения работы

Перед началом опыта необходимо проверить работу газового счетчика и вакуумметра. Для этого включают вакуумный насос при полностью

открытом вентиле 7, который затем слегка прикрывают, наблюдая за работой приборов. Спыт предусматривает 12-14 замеров при различных режимах.

Перед экспериментом необходимо измерить атмосферное давление и рассчитать значение показания вакуумметра при $\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_1}$. При эксперименте необходимо обязательно провести измерение при $\beta_{кр} = 0,528$ и несколько измерений при $\Delta\beta = 0,05$ в окрестности критической точки.

Начало опыта необходимо провести при $\beta = 0,98 \dots 0,97$. Последующее увеличение перепада давлений, регистрируемого вакуумметром 5, устанавливают путем плавной регулировки его вентилем 7. Рекомендуются следующие значения β : 0,95; 0,9; 0,85; 0,75. Далее следует изменять режим так, чтобы значение β в каждом последующем опыте уменьшалось приблизительно на 0,1 по сравнению с предыдущим, до значений $\beta = 0,25$ (до полностью открытого вентиле 7). Режим истечения воздуха через сопло при различных значениях устанавливается достаточно быстро, необходимо лишь следить за показаниями вакуумметра 5, которые должны быть постоянными в течение замера расхода воздуха.

Для каждого перепада давлений с помощью электросекундомера измеряется время истечения 5 дм^3 воздуха (стрелка газового счетчика совершает один полный оборот). Данные Δp , τ , p_2 записываются в протокол наблюдений. После окончания опыта установку отключают.

Обработка результатов эксперимента

Объемный расход воздуха определится соотношением

$$m_v = \frac{5}{\tau \cdot 10^3}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вычисляя давление перед соплом $p_1 = p - \Delta p$, определим фактический массовый расход воздуха

$$m_{\phi} = m_v \rho, \tag{6}$$

где ρ - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho = \frac{6 \cdot 10 p_1}{R T_1}$;
 p - давление, мПа ;
 R - газовая постоянная, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$;
 T - температура, К .

Течение газа в сопловом канале считаем адиабатным (энергетический обмен между окружающей средой и воздухом практически отсутствует, так как время контакта газовых частиц со стенками очень мало). Для расчета скорости истечения используем уравнение адиабатного течения, откуда теоретическая скорость истечения в м/с определится уравнением

$$C = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{D_1}{D_2}} \quad (4)$$

Величина теоретического расхода воздуха в кг/с, через сопло определится по формуле

$$m_T = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho_1 \rho_1 \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

где f - сечение сопла, м².

Расчеты m_T следует провести для всех значений β . Для воздуха критическое отношение давления $\beta_{кр} = 0,528$. При $\beta \leq \beta_{кр}$, m_T постоянен и равен m_T максимальному.

По полученным опытным данным и результатам проведенных расчетов построить графики зависимости расхода воздуха через сопло, как функцию отношения давления $m_{\phi} = \varphi_1(\beta)$; $m_T = \varphi_2(\beta)$. По этим графикам определить значение критического отношения давлений. Построить график скорости $C = \varphi(\beta)$ по протоколу испытаний.

Протокол испытаний

| Номер измерений | Измеренные величины | | | | Расчитанные величины | | | | |
|-----------------|----------------------|---------------|-----------------|---------|----------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------|--------------|
| | Δp , ммга | τ , с | p_2 , ммга | β | p_1 , ммга | m_{V_3} , м ³ /с | m_{ϕ} , кг/с | m_T , кг/с | C , м/с |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная схема и описание установки.
2. Протокол эксперимента.
3. Расчеты скорости, расходов, коэффициента расхода.
4. Графики m_{ϕ} , m_T , C как функции β .

Составители: Александр Петрович М е р к у л о в,
Николай Николаевич О г о р о д н и к о в,
Владимир Васильевич Б и р ю к,
Арлен Петрович Т о л с т о н о г о в

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА
ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Редактор Т.К. К р е т и н и н а
Техн.редактор Н.М. К а л е н ю к
Корректор М.В. П а в л о в а

Подписано в печать 18.12.84 г.

формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.

Оперативная печать. Усл.п.л. 0,46. Уч.-изд.л. 0,4.

Т. 500 экз. Заказ 476 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография им. В.И.Мяги, г. Куйбышев,
ул. Венцека, 60.