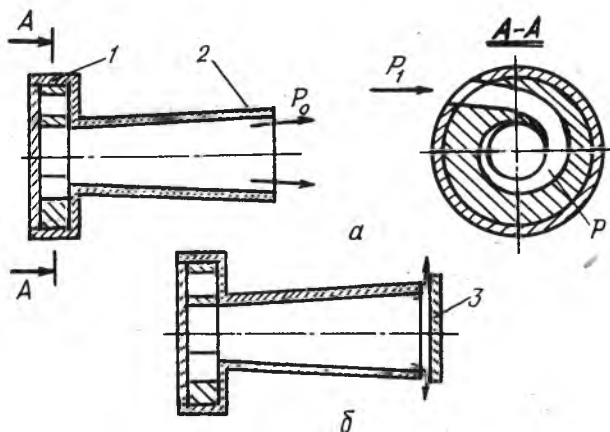


С.Н.Савельев, В.И.Метенин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА
ИЗ СОПЛА В ВИХРЕВУЮ КАМЕРУ

Рассмотрим истечение газа в коническую вихревую камеру (ВК), по всей длине которой происходит процесс температурного разделения.



Р и с. 1. Модели, принятые для исследования процессов истечения газа из сопла в ВК: 1 - сопловой ввод; 2 - вихревая камера; 3 - цилиндрическая стенка

Если истечение газа происходит в ВК, полностью открытую с горячего конца (рис. 1, а), то при движении его вдоль камеры создается противодействие на выходе из сопла, обусловленное только периферийной скоростью, обеспечивающей равновесие закрученного потока. При этом завихритель является своего рода направляющим аппаратом, обеспечивающим равномерный периферийный ввод в ВК газа [1]. В этом случае периферийное статическое давление, обеспечивающее равновесие закрученного потока при отсутствии каких-либо потерь, может быть определено из уравнения Бернулли:

$$\int_a^b \frac{dp}{\gamma} + \frac{u_b^2 - u_a^2}{2g} = 0, \quad (1)$$

где a и b - соответственно начальное и конечное состояние газа в камере.

В предположении, что расширение газа от начального давления P_1 до давления на срезе сопла P осуществляется адиабатно, полная скорость истечения газа из сопла W определяется по уравнению

$$W = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (2)$$

Будем считать, что дальнейшее расширение газа в ВК от давления P до давления газа на выходе из ВК P_0 происходит политропически с показателем политропы n . Тогда при принятых допущениях уравнение (1) будет иметь вид

$$u^2 = u_0^2 - \frac{2n}{n-1} pV \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (3)$$

где u , u_0 - скорости в начальном и конечном состояниях газа.

Так как состояние газа на начальном участке ВК соответствует конечному состоянию при расширении его в сопле, то можно считать, что $W = u$; тогда из (2) и (3) будем иметь

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{u_0^2}{2P_1 V_1} - \frac{pV}{P_1 V_1} \frac{n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (4)$$

Учитывая, что процесс расширения газа в сопле принят адиабатным, используя уравнение состояния идеального газа и обозначая $P/P_1 = \beta_c = 1/\pi_c$, где π_c - степень расширения газа в сопле, получим

$$\kappa(n-1) \left[1 - \beta_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{u_0^2}{2RT_1} (\kappa-1)(n-1) - n(\kappa-1) \beta_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_1} \frac{P_1}{P} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right].$$

Обозначим $\frac{P_0}{P_1} = \beta_T = \frac{1}{\pi_{BT}}$, где π_{BT} - степень расширения газа в БТ. Произведя соответствующие выкладки, получим

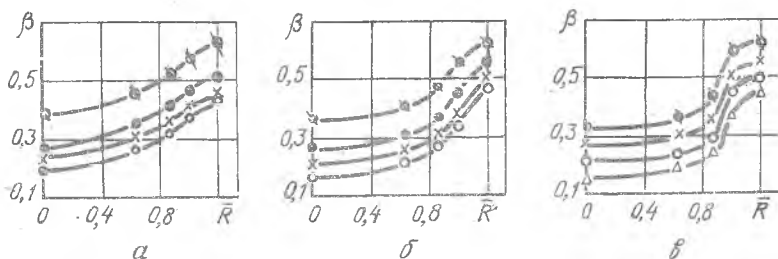
$$\beta_c^{\frac{n-\kappa}{\kappa n}} \left[\kappa(n-1) - (\kappa-1)(n-1) \frac{u_0^2}{2RT_1} \right] - (n-\kappa) \beta_c^{\frac{n-1}{\kappa}} = n(\kappa-1) \beta_T^{\frac{n-1}{n}}. \quad (5)$$

В ряде случаев при исследовании процессов, протекающих в БТ, необходимо знать связь между степенью расширения газа в сопле и

степень расширения газа в ВК $\beta_k = \frac{1}{\beta_k} = \frac{P}{P_0}$. Эту связь легко установить, принимая во внимание, что $\beta_T = P_0/P_1 = \beta_c \beta_k$. Окончательно уравнение, связывающее β_k , β_c , имеет вид

$$\beta_c^{\frac{n-k}{k(n-1)}} \left[k(n-1) - (k-1)(n-1) \frac{u_0^2}{2RT_1} \right] - (n-k) = n(k-1)\beta_k^{\frac{n-1}{n}} \quad (6)$$

Для определения возможности применения уравнений (5) и (6) нами проведены экспериментальные исследования в диапазоне $P_1 = 0,20-0,4$ МПа. Результаты исследований представлены на рис. 2 в виде зависимости $\beta = \frac{P}{P_1}$, где P - давление в точке замера от относительного радиуса $\bar{R} = R/R_{вк}$, R - расстояние от оси камеры до точки замера; $R_{вк}$ - начальный радиус ВК.



Р и с. 2. Изменение β в сопловом сечении вихревой камеры $\chi = 3^\circ 40'$: а) $f_c = 0,12$; б) $h = 21:5$ - с плоской стенкой; в) $f_c = 0,0975$; г) $h = 5:7$ - с плоской стенкой; в) $f_c = 0,0975$; б) $h = 5:7$ - открытая камера. $\phi - P_1 = 0,2$ МПа; $\circ - P_1 = 0,25$ МПа; $\times - P_1 = 0,3$ МПа; $\circ - P_1 = 0,35$ МПа; $\Delta - P_1 = 0,4$ МПа

При использовании односопловых вводов с прямоугольными конфузорными соплами степень расширения газа изменяется в зависимости от отношения сторон сопла в выходном сечении $h:b$ даже при неизменной площади проходного сечения, что связано с перераспределением эпюр давления и скорости по высоте сопла.

Характерной особенностью истечения газа в полностью открытую с широкого конца ВК при $\mu = 0$ является наличие зоны пониженного давления в приосевой области. При этом атмосферный воздух через открытый торец камеры устремляется в зону пониженного давления и интенсивно перемешивается с газом, выходящим из сопла, что приводит к уменьшению скорости его движения и к некоторому по-

вышению давления. Зона смешения, находящаяся на некотором расстоянии от сопла и имеющая повышенное давление, является своего рода сопротивлением для вытекающего из сопла газа, в результате чего давление на срезе сопла β_c увеличивается.

Если на выходе установить плоскую круглую стенку диаметром больше выходного диаметра камеры (рис. 1, б), а газ пропустить через щель, образованную стенкой и торцом камеры, то возможность присоса в присосевую зону исчезает. При этом β_c уменьшается, что хорошо иллюстрируется графиками. Такой случай истечения газа из сопла в ВК соответствует работе ВТ при $\mu = 0$, когда весь вытекающий через сопло газ выбрасывается через горячий конец, а в присосевой области камеры образуется зона с пониженными температурой и давлением.

Экспериментально полученные величины β_c для $\mu = 0$ хорошо согласуются с величинами β_c , рассчитанными по формуле (5) с учетом экспериментальных величин β_r и U_0 .

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований [2, 3] с учетом исследований аэродинамики ВТ показывает, что полученные формулы могут использоваться для определения β_c при расчете ВТ в диапазоне изменения $0 \leq \mu < 0,1$ с достаточной степенью точности. Однако для расчета ВТ, работающих в качестве генератора холода при $\mu > 0,1$, необходимо связывать величину β_c с μ , учитывая специфические особенности работы.

Л и т е р а т у р а

1. Савельев С.Н. К определению степени расширения газа в сопле вихревой трубы. - Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодые ученые Куйбышевской области - производству". - Куйбышев, 1977.
2. Бобров В.В., Савельев С.Н. Исследование двухступенчатого вихревого холодильного аппарата. - Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодые ученые Куйбышевской области - производству". - Куйбышев, 1977, с. 103-104.
3. Савельев С.Н., Бобров В.В. Экспериментальное исследование конических вихревых труб. - Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодые ученые Куйбышевской области - производству". - Куйбышев, 1977, с. 106-107.