

даемых труб непосредственно для выбранного объекта.

Процесс вакуумирования является важным для многих технологических процессов (особенно в химической промышленности).

Безинерционность, малые капитальные затраты и практически неограниченный ресурс работы дает вихревым вакуум-насосам преимущества перед остальными устройствами. В качестве примера можно привести возможность установки вихревого вакуум-насоса на линии пневмозолоудаления производственной котельной. Экономический расчет системы с вихревым вакуум-насосом позволил выявить целесообразность замены парового эжектора на вихревой вакуум-насос.

Результаты анализа пневмохозяйств и примеры применения вихревых устройств убедительно свидетельствуют о широких возможностях работы подобных аппаратов в местах, где требуется индивидуальный подход к каждому потребителю.

И.Л. Лейтес, Г.А. Комарова, М.А. Яидков

#### НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА И МЕТОДИКА ЕГО РАСЧЕТА

Экспериментальному и теоретическому исследованию вихревого эффекта (эффекта Ранка-Хилша) посвящено много работ. Однако, в настоящее время, ввиду сложности гидродинамики трехмерного вращающегося потока, задача расчета эффекта Ранка-Хилша чисто теоретическим путем не решена. Кроме того, теоретические уравнения не позволяют учесть все конструктивные особенности вихревой трубы и качество ее изготовления.

Эмпирические методы расчета вихревого эффекта, предложенные различными авторами [1], позволяют весьма точно конструировать вихревые трубы. Однако этим методам присущи все недостатки, свойственные эмпирическим уравнениям.

Наиболее перспективным представляется третий путь, который ни в коей мере не отвергает другие методики. Этот путь основан на анализе термодинамических закономерностей вихревого эффекта и на создании теоретически обоснованной методики расчета эффекта охлаждения по минимальному количеству экспериментальных данных. Такая методика является в конечном счете полуэмпирической, так как в теоретически обоснованные уравнения должны входить константы, определяемые эмпирическим путем.

К основным термодинамическим зависимостям вихревого эффекта можно отнести зависимость эффекта охлаждения от свойств реальных газов, отношения давления  $\pi = \frac{P_1}{P_2}$  ( $P_1$  - давление на входе в вихревую трубу,  $P_2$  - давление холодного потока газа на выходе из диафрагмы), температуры газа на входе в трубу  $T_1$ , доли холодного потока  $\mu$ . Некоторые из этих закономерностей были вскрыты в ряде работ [1]-[7].

Целью данной работы явился анализ зависимости эффекта охлаждения от отношения давлений и доли холодного потока. Для вывода аналитической зависимости  $\Delta T_x = f(\pi)$  процесс расширения газа в вихревой трубе с  $P_1$  до  $P_2$  можно рассматривать как политропический с некоторым показателем политропы  $n$ . Величина  $n$  для данного процесса должна находиться в области  $\kappa < n < \gamma$  ( $n = \kappa$  - при адиабатическом процессе;  $n = 1$  - при изотермическом процессе).

Тогда эффект охлаждения газа в вихревой трубе можно рассчитать по уравнению

$$\Delta T_x = \frac{U_n^2}{2c_p} \kappa, \quad (1)$$

где  $c_p$  - теплоёмкость газа, дж/кг.град;

$U_n$  - средняя скорость истечения газа при политропическом расширении с  $P_1$  до  $P_2$ .

Величина  $U_n$  может быть найдена по известному термодинамическому уравнению

$$U_n = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} z R T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad \text{м/сек}, \quad (2)$$

где  $\kappa$  - показатель адиабаты;

$z$  - коэффициент сжимаемости, учитывающий отклонение газа от идеальности;

$R$  - газовая постоянная, дж/кг.град;

$T_1, P_1$  - параметры газа на входе в вихревую трубу  $K$ , я/м<sup>2</sup>;

$P_2$  - давление холодного потока газа на выходе из диафрагмы, я/м<sup>2</sup>;

$n$  - показатель политропы - постоянная величина, характеризующая данный процесс расширения газа с  $P_1$  до  $P_2$ .

После подстановки уравнения (2) в уравнение (1) получим

$$\Delta T_x = \frac{2 \kappa}{\kappa-1} z R T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \kappa. \quad (3)$$

Уравнение (3) отражает зависимость эффекта охлаждения от отношения давлений  $\pi$ , температуры на входе, физических свойств газа, а также учитывает отклонение свойств газа от свойств идеального газа. Показатель политропы  $n$  - это единственный эмпирический коэффициент. Он позволяет учесть все виды потерь в вихревой трубе, в том числе и потери в сопле, связанные с несовершенством конструкции трубы.

Преобразовав уравнение (3), получим

$$\lg \left( 1 - \frac{\Delta T_x}{K_1} \right) = - \frac{n-1}{n} \lg \frac{p_1}{p_2}, \quad (4)$$

где

$$K_1 = \frac{\kappa z R T_1}{(\kappa-1) c_p} \quad \kappa. \quad (5)$$

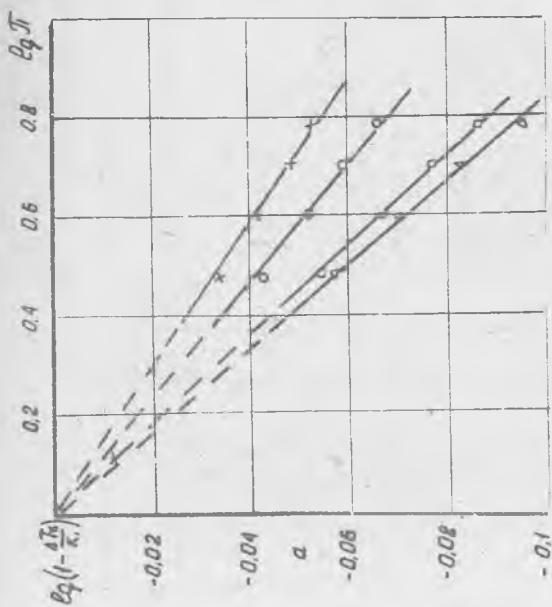
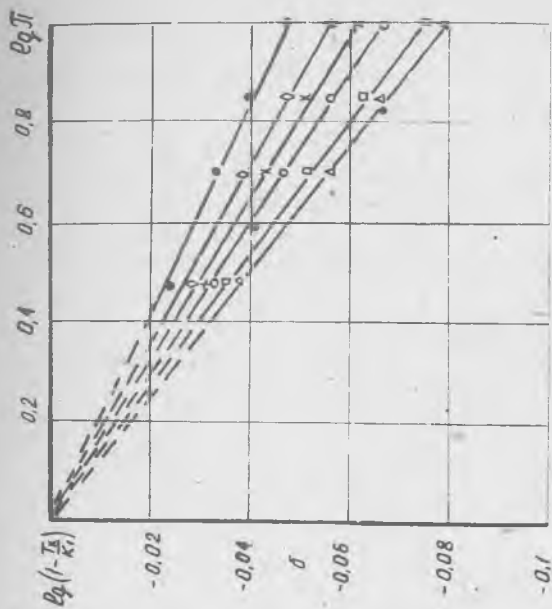
Таким образом, если уравнение (4) справедливо, то величина  $\lg \left( 1 - \frac{\Delta T_x}{K_1} \right)$  должна линейно зависеть от  $\lg \pi$ . По этому уравнению были обработаны экспериментальные данные ряда авторов [1], [5], [6].

На рис.1, в качестве примера, приведены зависимости  $\lg \left( 1 - \frac{\Delta T_x}{K_1} \right)$  от  $\lg \pi$ , полученные при обработке экспериментальных данных А.П. Меркулова [1] и авторов [5]. График представляет собой серию прямых. При каждом  $\mu$ , в исследуемой области  $3 < \pi < 10$ , все экспериментальные точки, в пределах ошибки эксперимента, укладываются на одну прямую. При экстраполяции на  $\lg \pi = 0$  все прямые сходятся в одной точке, в которой  $\lg \left( 1 - \frac{\Delta T_x}{K_1} \right) = 0$ , т.е., где  $\Delta T_x = 0$ . Тангенс угла наклона прямых, согласно уравнению (4), равен величине  $\frac{n-1}{n}$ . Как видно из графика, чем больше  $\mu$ , тем меньше тангенс угла наклона прямых, следовательно меньше показатель политропы  $n$ .

В соответствии с уравнением (4) показатель политропы процесса расширения газа в трубе с  $P_1$  до  $P_2$  равен

$$n = \frac{c_p \mu}{\lg \left( 1 - \frac{\Delta T_x}{K_1} \right) + c_p \mu} \quad (6)$$

В таблице приведены значения  $n$ , полученные при обработке экспериментальных данных ряда авторов [1], [5], [6] для значений  $\mu = 0,2; 0,4; 0,6; 0,7$ . Эти значения колеблются от 1,06 до 1,136.



Р и с. 1. Зависимость эффекта охлаждения газа в вихревой трубе от отношения давлений: экспериментальные данные А.П. Меркулова (а); экспериментальные данные авторов (б).

$\Delta - \mu = 0,2$ ;  $\square - \mu = 0,4$ ;  $\circ - \mu = 0,6$ ;  $\times - \mu = 0,7$ ;  $\circ - \mu = 0,8$ ;  $\bullet - \mu = 0,9$

Т а б л и ц а

Значение показателя политропы процесса расширения газа в вихревой трубе

Данные	Расо- чий газ	Температура газа на входе $T_1, K$	Интервал давлений			Значение показателя политропы процесса расширения газа в трубе с $P_1$ до $P_2$				
			на входе в трубу $P_1$	холодного потока на выходе из диафрагмы $P_2$	$K = \frac{K_2 R_1}{K_1 R_2}$ $(K-1) C_p$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0$
А. П. Меркулов (ЖТФ, т. 26, в. 6, 1956) <i>A. Mitsch, Zeitschrift für Naturforschungs- schem, 1946, N. 1, s. 206</i>	Воздух	303	3-6	1	301,6	1,135	1,125	1,10	1,075	1,145
	Воздух	293	2,5-11	1	291,7	1,08	1,09	1,07	1,06	1,10
В. П. Алексеев (Диссертация ОТИИ, 1954) Авторы (Хим. пром., № 4, с. 57, 1975)	Воздух	293	2-5	1	291,7	1,10	1,11	1,08	1,065	1,13
	Продук- ный газ синтеза аммиака	310	240	24-80	307,0	1,087	1,08	1,07	1,065	1,10
Авторы	Природ- ный газ	265	18-35	8	251,0	-	-	1,10	-	1,10

П р и м е ч а н и е: Значение  $\mu$  при  $\mu \rightarrow 0$  найдены при обработке по уравнению (6) значе-  
ний  $\Delta T_x$  равных значению  $A$ , уравнение (12).

Таким образом, измерив значения  $\Delta T_x$  при одном значении  $\pi$  и  $\mu$ , можно предсказать с достаточной точностью ход кривой  $\Delta T_x = f(\pi)$  в любой области  $\pi$  при данном  $\mu$ .

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость эффекта охлаждения от отношения давлений, полученные на продувочных газах синтеза аммиака авторами [5] при  $P_I = 240$  ат,  $T_I = 310$  К и  $\mu = 0,6$  (кривая I). Продувочные газы содержат (%):  $N_2$  - от 50 до 60,  $N_2$  - от 16 до 20,  $NH_3$  - от 5 до 10,  $CH_4$  - от 12 до 14,  $A_2$  - от 4 до 8. На этом же графике нанесены результаты расчета по уравнению (3). Значение  $n$  было рассчитано из эксперимента при  $\pi = 5$ . Как видно из графика, расчетная кривая в интервале  $3 \leq \pi \leq 10$  описывает результаты эксперимента с ошибкой не более  $2^\circ\text{C}$ .



Р и с. 2. Зависимость эффекта охлаждения газа в вихревой трубе от отношения давлений,  $\Delta T_x$ , К от  $\pi$ :

$\Delta$  - экспериментальные данные авторов; - - - расчетные данные,  $n = 1,07$

Таким образом, показатель политропы  $n$  является обобщенным параметром, характеризующим работу вихревой трубы в целом как

холодильное устройство и позволяющий учесть отклонение газа от идеальности. Влияние доли холодного потока на эффект охлаждения газа в вихревой трубе можно оценить на основе работ [4-6]. Ранее В.М. Бродяньским и И.Л. Лейтесом для расчета вихревого эффекта охлаждения было предложено уравнение

$$\Delta T_x = \frac{U_c^2}{2C_p} - \frac{U_r^2 - U_a^2}{2C_p} \quad \text{К}, \quad (7)$$

где  $U_c$  - средняя скорость истечения газа из сопла, м/сек;  
 $U_r$  - средняя тангенциальная скорость потока в диафрагме, м/сек;  
 $U_a$  - средняя аксиальная скорость в диафрагме, м/сек;  
 $C_p$  - теплоёмкость газа, дж/кг.град.

Второй член в этом уравнении учитывает потери, связанные с кинетической энергией холодного потока газа.

Для практического использования данного уравнения авторы ввели ряд допущений.

Скорость истечения газа из сопла авторы рассчитывали по известному уравнению

$$U_c = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} R T_c \left[ 1 - \left( \frac{P_c}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad \text{м/сек}, \quad (8)$$

где  $P_c$  - давление газа на выходе из сопла.

Для расчета  $U_r$  авторами было принято допущение, что радиальное распределение тангенциальной скорости подчиняется закону квазитвердого вихря, значение  $U_r$  находили по уравнению

$$U_r = 0,567 U_c \frac{d_g}{D_T} \quad \text{м/сек}, \quad (9)$$

где  $d_g$  - диаметр диафрагмы, мм;

$D_T$  - диаметр трубы, мм.

Значение средней аксиальной скорости  $U_a$  определяли по уравнению

$$U_a = \frac{\mu a f_c P_{кр} T_x}{\Gamma_g P_x T_{кр}} \quad \text{м/сек}, \quad (10)$$

где  $f_c, F_g$  - площади сечения соответственно сопла и диафрагмы,  $\text{мг}^2$ ;

$a$  - скорость звука, м/сек;

$P_{кр}, T_{кр}$  - параметры в критическом сечении сопла, н/м<sup>2</sup>, К;

$P_x, T_x$  - параметры газа на входе в диафрагму, н/м<sup>2</sup>, К.

Уравнение (7) после подстановки в него уравнений (8), (9) и (10) примет следующий вид:

$$\Delta T_x = \frac{\pi z R T_1}{(\kappa-1) G p} \left[ 1 - \left( \frac{p_c}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \left[ 1 - \left( 0,667 \frac{d_g}{D_T} \right)^2 \right] - \alpha^2 \left( \frac{p_{kp} T_x f_c}{p_x T_{kp} f_g} \mu \right)^2. \quad (II)$$

При постоянном  $\pi$ ,  $\alpha$  также  $T_1$ , для данной конструкции вихревой трубы и заданной газовой смеси, уравнение (II) можно представить в упрощенном виде:

$$\Delta T_x = A - B \mu^2, \quad (I2)$$

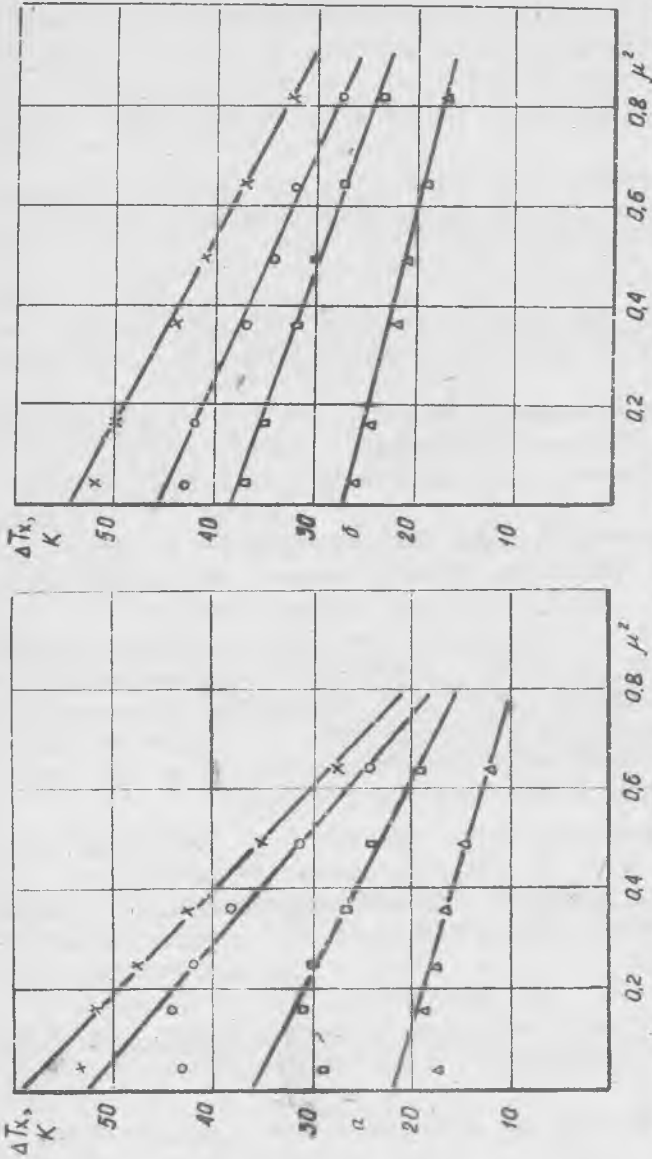
где  $A$  и  $B$  константы, зависящие от  $\pi$ ,  $T_1$  (свойств газа, конструкции трубы). Следовательно эффект охлаждения зависит линейно от  $\mu^2$ .

На рис.3 представлены зависимости  $\Delta T_x$  от  $\mu^2$  при разных значениях  $\pi$ , построенные по экспериментальным данным [5], [6]. Как видно из графиков, в пределах ошибки эксперимента, большая часть кривой  $\Delta T_x = f(\mu^2)$  (от  $\mu = 0,3$  до  $\mu = 1$ ) описывается уравнением (I2). Левый участок зависимости в области  $0 < \mu < 0,3$  не описывается данным уравнением. Это объясняется тем, что при  $\mu \rightarrow 0$  увеличивается доля тепловых и других потерь, в частности доля "паразитного" потока [4], [7]. Отрезки, отсекаемые графиками по оси ординат, в соответствии с уравнением (I2) равны численному значению константы  $A$ . Приведенные выше зависимости эффекта охлаждения газа в вихревой трубе от отношения давлений и доли холодного потока могут быть использованы при расчете вихревого эффекта. Порядок расчета может быть следующим.

Заданы два экспериментальных значения  $\Delta T_x$  при разных значениях  $\mu$  и любых  $\pi$  (можно при одинаковых значениях  $\pi$ ). По уравнению (6) определяем значение коэффициента  $n$  для каждого из  $\mu$ . Затем, используя уравнение (3), находим значение эффекта охлаждения  $\Delta T_x$  при любых  $\pi$  для заданных значений  $\mu$ . Зная значения  $\Delta T_x$  для двух значений  $\mu$ , при различных  $\pi$ , по уравнению (I2) можно определить значения констант  $A$  и  $B$  для любых  $\pi$ , а следовательно, и рассчитать значения  $\Delta T_x$  при любых  $\mu$ .

Таким образом, имея две экспериментальные точки при разных значениях  $\mu$  и любых  $\pi$ , можно рассчитать эффект охлаждения





Р и с. 3. Зависимость эффекта охлаждения газа в вихревой труб от  $\mu^2$ . Экспериментальные данные Р.ХИМПА (а);

-  $\Delta$  -  $\pi = 2,5$ ; -  $\square$  -  $\pi = 4$ ; -  $\circ$  -  $\pi = 7$ ; -  $\times$  -  $\pi = 11$ ;  
 экспериментальные данные авторов ( $\delta$ ); -  $\Delta$  -  $\pi = 3$ ; -  $\square$  -  $\pi = 5$ ; -  $\circ$  -  $\pi = 7$ ;  
 -  $\times$  -  $\pi = 10$

газа в вихревой трубе с точностью до  $1-2^{\circ}\text{C}$  в любом интервале  $\pi$  и в интервале  $\mu$  от 0,3 до 1. Эта методика справедлива не только для идеальных газов, но и для газов, физические свойства которых далеки от идеальности.

### Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М., "Машиностроение", 1969.
2. Бродянский В.И., Лейтес И.Л. О градиенте температур в трубе Ранка - Хилла. ИФЖ, 1960, т.3, № 12, с.72.
3. Бродянский В.И., Лейтес И.Л. Зависимость величины эффекта Ранка от свойств реальных газов. ИФЖ, 1962, т.5, №5, с.38.
4. Соколов Е.Я. Характеристика вихревой трубы. "Теплоэнергетика", 1966, №7.
5. Комарова Г.А., Лейтес И.Л. и др. Способ выделения аммиака из продувных газов синтеза. "Химическая промышленность", 1975, №4, с.37.
6. Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kälteprozess - "Zeitschrift für Naturforschung", 1946, №1, s. 208.
7. Ентов В.М., Калашников В.Н., Райских Ю.Д. О параметрах определяющих вихревой эффект. Известия АН СССР, "Механика жидкости и газа", 1967, № 3, с.32.

Ш.А. Пиралишвили

### К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ ВЫНУЖДЕННОГО ВИХРЯ

Принятые обозначения

$\mathcal{U}$ - окружной момент "количества движения	$p$ - давление
$v$ - скорость	$K$ - показатель изоэнтропы
$\mu$ - относительная доля холодного потока	$M$ - число Маха
$r$ - радиус	$R$ - газовая постоянная
$\rho$ - плотность	$n$ - показатель степени закрутки вынужденного вихря
$T$ - температура	$\pi$ - степень расширения газа