

вать влияние геометрии и режимов работы на расходные характеристики вихревых устройств.

#### Библиографический список

1. Дыскин Л.М., Крамаренко П.Т. О коэффициенте расхода вихревых труб /Горьковский университет им. Н.И.Лобачевского.-Горький, 1976.-10 с.-Деп. в ВИНТИ 04.06.76, № 4015-76.
2. Балалаев А.Н., Вилякин В.Е. Полуэмпирический метод расчета самовакумирующейся вихревой трубы/Куйбышевский авиационный институт.-Куйбышев, 1984.-19 с.-Деп. в ВИНТИ 05.09.84, № 6079-84.
3. Балалаев А.Н. Экспериментальное определение расходных характеристик вихревых устройств/Куйбышевский авиационный институт.-Куйбышев, 1985.- 9 с.-Деп. в ВИНТИ 04.02.85, № 954-85.
4. Девич М.Е. Техническая газодинамика.-М.:Энергия, 1974.-592 с.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике.-М.:Машиностроение, 1969.- 183 с.

УДК 532.537.007.16

П.Т.Крамаренко

#### ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИЛОВОМ ПОЛЕ

В закрученном потоке газа возникает перепад температуры по радиусу вихря. Анализ устройств, реализующих вихревой эффект, в подавляющем большинстве случаев ведется в предположении, что температура по радиусу вихря распределяется по адиабате [1]. Однако значительные различия между экспериментальными и теоретическими результатами вызывают сомнение в соответствии предложенного механизма энергообмена действительному.

Схема потока газа, движущегося спирально вдоль трубы, описывается системой уравнений движения, сплошности, энергии и состояния. Для рассматриваемого случая упростим систему уравнений, основываясь на следующем. Вязкость и теплопроводность могут проявить себя только при возникновении градиентов температуры и скорости, поэтому для

выбранного момента времени ими можно пренебречь. Осевые скорости потока могут влиять только на совершенство процесса энергообмена, поэтому их можно принять равными нулю. Процесс энергообмена стационарен, т.е. движение потока установившееся. Система уравнений примет вид

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\tau^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(v_\tau \rho)}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

$$\rho c_v v_r \frac{\partial T}{\partial r} = -\rho \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad (3)$$

$$P = \rho RT, \quad (4)$$

где обозначения общепринятые.

Уравнение энергии (3) записано в форме обмена для внутренней энергии. Согласно работам [2,3] полная температура газа по радиусу вихря в момент его формирования при линейном законе распределения тангенциальной скорости

$$v_\tau / r = const \quad (5)$$

величина постоянная, поэтому в уравнении (4)  $T = const$ .

В уравнении (2) заменим величину  $\rho$  на  $P/RT$  согласно уравнению (4). Так как  $RT = const$ , получим

$$v_r \frac{\partial P}{\partial r} = -P \frac{\partial v_r}{\partial r}. \quad (6)$$

Тогда на основании формул (3) и (6) находим

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\rho c_v} \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (7)$$

Для решения уравнения (1) используем зависимость  $P = v_\tau^2 \rho / 2$ , которая в дифференциальной форме

$$\partial P / \rho = v_\tau \partial v_\tau \quad (8)$$

может служить связью между скоростью  $v_r$  и градиентом давления  $P$ . Это обусловлено тем, что давление газа по радиусу вихря состоит из суммы динамического и статического. Динамическая составляющая давления характеризуется изменением радиальной скорости.

Совместное решение (I) и (8) дает

$$2v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{v_r^2}{r} ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{v_r^2}{2r} . \quad (10)$$

В уравнения (9) и (10) вместо значения тангенциальной скорости  $v_r$  на текущем радиусе вихря подставим значение тангенциальной скорости  $v_1$  на периферии вихря согласно уравнению (5), получим

$$2v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{v_1^2 r}{r_0^2} ; \quad (11)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{v_1^2 r}{2r_0^2} \quad (12)$$

На основании формул (7) и (12) получим

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{v_1^2 r}{2r_0^2 C_V} . \quad (13)$$

После интегрирования уравнения (13) с граничными условиями  $T = T$  при  $r = I$  и  $T = T_0$  при  $r = r$ , а уравнения (II) -  $v_r = 0$  при  $r = I$  и  $v_r = v_r$  при  $r = r$  и учитывая, что  $r/r_0 = \bar{r}$ , получим

$$T - T_0 = \frac{v_1^2}{4C_V} (1 - \bar{r}^2) ; \quad (14)$$

$$v_r^2 = \frac{v_1^2}{2} (1 - \bar{r}^2) . \quad (15)$$

На основании выражений (14) и (15) находим

$$T - T_0 = \frac{v_r^2}{2C_V} . \quad (16)$$

Следовательно, возникающий перепад температуры в закрученном потоке газа по радиусу вихря является результатом перехода тепловой энергии в энергию направленного движения частиц, а механизм энергообмена представляется следующим.

В круговом течении газа под действием центробежного ускорения возникает радиальная скорость. Так как величина центробежного ускорения растет по радиусу вихря в направлении к его оси, то соответственно этому изменяется и скорость  $U_r$ . Частицы газа, движущиеся со скоростью  $U_r$ , снижают свою тепловую энергию за счет перехода ее в энергию направленного движения. Так как скорость растет по мере удаления от периферии вихря, то соответственно этому снижается термодинамическая температура и достигает своего минимума на оси вихря. В результате этого и возникает перепад термодинамической температуры по радиусу закрученного потока газа.

Если периферийные и осевые слои газа закрученного потока движутся в одном направлении, то устанавливается перепад термодинамической температуры, который по мере продвижения потока по вихревой трубе в сторону дросселя уменьшается. Это снижение вызывается уменьшением радиального градиента давления за счет сил трения. А как известно, в изолированной системе работа сил трения не меняет полной энергии частицы, меняется только соотношение между энергией направленного движения и тепловой энергией, поэтому полная температура периферийных слоев газа при такой схеме течения остается постоянной, а температура приосевых — повышается и при исчезновении радиального градиента давления достигает температуры периферийных слоев газа.

В прямоточных вихревых трубах, которые реализуют рассмотренную схему течения, по мере удаления места отбора охлажденного потока газа от соплового сечения уменьшается эффект охлаждения, что соответствует экспериментальным данным работы [4].

Если же периферийные и приосевые слои газа движутся в разных направлениях, т.е. периферийный поток — в сторону дросселя, а осевой — в обратном направлении, то такая схема течения соответствует движению потоков в прямоточной вихревой трубе.

При такой схеме течения объемы газа по мере их приближения к сопловому сечению все время будут попадать в зоны с меньшей термодинамической температурой, чем их собственная. При смещении поступившего объема газа с приосевыми слоями зоны термодинамическая температура на оси вихря в этой зоне повысится. А так как величина ра-

диальной скорости для данного сечения является неизменной, то и величина перепада термодинамической температуры по радиусу вихря должна остаться постоянной, что в итоге приведет к повышению температуры на периферии вихря. Следовательно, при противоточном движении потоков в вихревой трубе происходит транспорт энергии от приосевых слоев газа к периферийным. При этом температура периферийных слоев газа растет, а приосевых - снижается и в пределе может достигнуть температуры в сопловом сечении. Такое распределение температуры для противоточной вихревой трубы подтверждается экспериментальными данными [1,4].

Перепад термодинамической температуры, подсчитанный по формуле (14) для тангенциальной скорости, равной скорости звука, составляет  $41^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальный результат [4]  $35^{\circ}\text{C}$ .

#### Библиографический список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969. - 182 с.
2. Вулис Л.А. Об эффекте Ранка // Изв. АН СССР. Сер. ОТН. 1957. № 10. - С. 105-107.
3. Дубинский М.Г. О вращающихся потоках газа // Изв. АН СССР. Сер. ОТН. 1954. № 8. - С. 75-79.
4. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Что такое вихревая труба? - М.: Энергия, 1976. - 152 с.

УДК 532.527

А.П. Толстоногов, А.Ю. Цыбров, С.П. Чернышев

#### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

На некоторых режимах работы вихревой трубы (ВТ), особенно при малых относительных долях холодного потока ( $\mu = 0,05 \dots 0,25$ ), статическое давление в сопловом аппарате на малых радиусах вихря может оказаться ниже давления окружающей среды. В этом случае неизбежен подсос газа из окружающей среды [1] (рис. 1), вследствие чего в диафрагме по оси ВТ возникают два противоположно направленных