

СИЛЫ ВЯЗКОСТИ И ЭНЕРГООБМЕН
В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Эффект Ранка объясняется с позиций идеальной и реальной жидкости. В гипотезах, основой которых служит реальная жидкость, принимается, что передача энергии от оси к периферии ВТ идет за счет вязкости и теплопроводности газового потока [1-7]. Однако доказательства возможности обмена энергией между слоями газа ВТ действием сил вязкости не приводятся. В связи с этим основной задачей данной работы является доказательство возможности энергообмена в ВТ за счет сил вязкости.

В противоточной ВТ к периферийным слоям газа энергия подводится при их движении от входного тангенциального сопла до вентиля, от осевых слоев газа энергия отводится при их движении от вентиля к диафрагме [4]. Угловая скорость газа по всей длине ВТ имеет переменное значение в фиксированных сечениях. При этом угловая скорость газа возрастает с уменьшением r [6].

Пусть частицы газа вращаются по двум соосным окружностям радиусов r_1 и r_2 с постоянными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 [5]. Движение жидкости считается стационарным, а внешние силы — отсутствующими. Вводя цилиндрические координаты r, φ, z , можно, очевидно, считать, что движение происходит по окружностям с центрами на оси Oz , так что

$$V_z = V_r = 0, \quad V_\varphi = Kr, \quad \rho = \rho(r) \quad (1)$$

С учетом условия (1) уравнения движения газа в ВТ принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} &= -\frac{V^2}{r} \\ \frac{d^2V}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнение для V есть уравнение типа Эйлера, поэтому два его частных решения должны иметь вид $V_r = r^k$. Подстановка в уравнение (2) даст $k(k-1) + k - 1 = 0$, откуда находятся зна-

чения $K_1 = K_2 = I$; $K_2 = -I$) и следующие частные решения:

$$V_1 = r, \quad V_2 = r^{-1}.$$

Общее решение уравнения (2) приводится к форме $V = Ar + Br^{-1}$. Произвольные постоянные A и B можно определить из условий $V = \omega_1 r_1$ при $r = r_1$; $V = \omega_2 r_2$ при $r = r_2$.

Вычисление A и B дает окончательное выражение для скорости

$$V = [(\omega_2 r_2^2 - \omega_1 r_1^2) r^2 + (\omega_1 - \omega_2) r_1^2 r_2^2] r^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \quad (3)$$

Сила трения, действующая на элементы жидкости, расположенные на расстояниях r_1 и r_2 от оси ВТ, найдена из системы уравнений для составляющих тензора напряжений в цилиндрических координатах [5]:

$$P_{rr} = \rho v (\partial v / \partial r - V r^{-2}) = -2 \rho v B r^{-2} = -2 \rho v (\omega_1 - \omega_2) r_1^2 r_2^2 r^{-2} (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \quad (4)$$

Рассмотрим, например, часть цилиндра C_1 , вдоль образующей которого вращается элемент жидкости. Высота цилиндра в направлении оси Oz принимается равной единице. На элемент $r dr$ этой части поверхности действует в направлении, касательном к цилиндру, сила $P_{r\theta} r_1 dr$, момент которой относительно оси цилиндра равен $P_{r\theta} r_1^2 dr$. Поэтому полный момент сил трения, приложенных к элементам рассматриваемой части цилиндрической поверхности C_1 , будет

$$M_1 = 4\pi r v (\omega_1 - \omega_2) r_1^2 r_2^2 (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \quad (5)$$

Точно так же полный момент относительно оси Oz сил трения, приложенных к части цилиндрической поверхности C_2 , отнесенный к единице длины этой цилиндрической поверхности, будет

$$M_2 = 4\pi r v (\omega_2 - \omega_1) r_1^2 r_2^2 (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \quad (6)$$

Таким образом, при вращении цилиндрических поверхностей газа в ВТ с начальными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 к цилиндрической поверхности C_1 на каждую единицу ее длины будет приложен вращающий момент M_1 , а к цилиндрической поверхности C_2 - вращающий момент M_2 . Сравнивая уравнения (5) и (6) видим, что вращающие моменты M_1 и M_2 равны между собой по абсолютной величине, но противоположны по знаку, т.е. $M_2 = -M_1 = M$.

Для вращения массы газа в каждую единицу времени необходимо затрачивать работы $L = M_1 \omega_1 - M_2 \omega_2$ или $L = M(\omega_1 - \omega_2)$. Таким образом, если осевые слои газа в ВТ будут иметь угловую скорость больше, чем периферийные ($\omega_1 > \omega_2$), то передача энергии будет идти от оси к периферии ($L > 0$). Осевые слои газа будут охлаждаться, периферийные – подогреваться. Если $\omega_1 < \omega_2$, то передача энергии будет идти от периферии к оси ($L < 0$), т.е. осевые слои будут подогреваться, периферийные – охлаждаться (происходит реверс ВТ). Реверс ВТ наблюдается всегда при малых значениях весовой доли холодного потока μ . В этом случае на оси ВТ создается разрежение, происходит подсосывание воздуха из атмосферы через диафрагму. К атмосферному воздуху подводится энергия, и через периферийное сечение диафрагмы он отводится в атмосферу. Периферийные слои газа затрачивают энергию на приведение во вращение воздуха, засасываемого из атмосферы по оси диафрагмы, и охлаждаются. Поскольку к осевым слоям подводится энергия, они подогреваются. Именно в этом и заключается сущность явления реверса ВТ.

Обмен работой отсутствует ($L = 0$), если $\omega_1 = \omega_2$. В этом случае $V = \omega_1 r$, и движение жидкости состоит в чистом вращении вокруг оси OZ , тождественном с вращением твердого тела. В этом случае оба момента M_1 и M_2 также обращаются в нуль.

Таким образом, в ВТ обмен энергией между осевыми и периферийными слоями газа при вращении их с разными угловыми скоростями ($\omega_1 \neq \omega_2$) может совершаться силами вязкости; реверс ВТ возникает тогда, когда угловая скорость периферийных слоев газа выше угловой скорости осевых слоев ($\omega_2 < \omega_1$), в результате чего передача энергии будет идти от периферии к оси (осевые слои газа при этом будут подогреваться, периферийные – охлаждаться).

Библиографический список

1. Вулис Л.А., Кострица А.А. Элементарная теория эффекта Ранка // Теплоэнергетика, 1962. № 10. С.72-77.
2. Гроздовский Г.А., Кузнецов Ю.Е. К теории вихревой трубы // Изв.АН СССР, ОТН. 1954. № 10.-С.112-118.
3. Дубинский М.Г. Течение вращающихся потоков газа в кольцевых каналах // Изв. АН СССР, ОТН. 1955. № 11.-С.125-128.
4. Барсуков С.И., Кузнецов В.И. Вихревой эффект Ранка. Иркутск: ИГУ, 1983.- 120 с.

5. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.П. М.:Физматгиз, 1963.- 728 с.

6. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.:Машиностроение, 1969.- 184 с.

7. Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kaeltenprozess; Zeitschrift für Naturforschung, Jan. 1946.-S203-208.

УДК 533.697.3

В.И.Славин

РАДИАЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОЛЕМ ДАВЛЕНИЯ -
ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА ТЕПЛООВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ
ПОТОКА ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Условные обозначения: λ - коэффициент теплопроводности, Вт·м/град; ζ - коэффициент пропорциональности при передаче тепла давлением, Вт·м/Па; h - высота сопла, м; c_p - теплоемкость газа при $p=const$, Дж/м³·град; R - универсальная газовая постоянная, Па·м³/град. Индексы: с - пристеночный слой газового потока; вх - питающая емкость; гр - внутренняя граница потока; ос - ось трубы.

В работе развито представление Ж.Ранка, утверждавшего (1931г.), что основной причиной эффекта является передача энергии полем центробежных сил (п.ц.с.) [1; 2]. Изучается идеальный газ в прямой трубе, пренебрегается теплопередачей через стенку. В обычной записи уравнение переноса энергии для зоны сформированного потока ($v_z = 0, v_r = v_\theta$) [3]

$$\frac{d}{dz} (z \vec{q}) = 0, \quad (\vec{q} = -\mu dT/dz) \quad (1)$$

Однако поток тепла может зависеть не только от ∇T , но и от ∇p : при этом должно выполняться условие: $\nabla T \cdot \nabla p > 0$ [4]. В вихревой трубе оно удовлетворяется автоматически: $\nabla p > 0$ (п.ц.с.), $\nabla T > 0$, так как T убывает с ростом v_θ , что является следствием закона Бернулли для элементарной струйки, а v_z - с ростом