

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Ольшанский А.И.; Ольшанский В.И.; Ротенберг В.Е.

Исследование закрученных потоков в вихревых трубах и связанный с этим вихревой эффект, в последние годы вызывает большой интерес. При тангенциальном вводе вязкой сжимаемой жидкости через специальное сопло газ совершает сложное поступательно-вращательное движение, при этом образуется интенсивный круговой поток. Происходит энергоразделение потока на периферийный (горячий) и осевой (холодный), которые могут двигаться как в одном, так и в противоположном направлениях. Поток газа с высокой температурой используется для нагрева с низкой - для охлаждения.

С ростом интереса к вопросам энергосбережения, возросло внимание к прикладным вопросам расчета и применения вихревых труб для интенсификации технологических процессов и создание оригинальных технических устройств различного назначения.

Вихревой эффект, несмотря на внешнюю простоту, представляет очень сложный газодинамический пространственный процесс в турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа, поэтому в вопросах теоретического описания явления и по сей день нет единого мнения и отсутствует строгое аналитическое решение задачи.

Имеется достаточно большое количество теоретических работ [1, 2, 3], в которых делаются попытки выявить физическую сущность вихревого эффекта и дать его аналитическое решение. Большинство работ [1, 2] основано на гипотезе преобразования, возникающего во входном сечении вихревой трубы свободного вихря, в вынужденный вихрь. Преобразование вихря и процесс энергоразделения осуществляется за счет вязкости и теплопроводности спирально движущегося газового потока. В области потока от оси до определенного радиуса поток вращается с практически постоянной скоростью $\omega = \text{const.}$ и образует вынужденный вихрь с радиусом вихря r_0 . В периферийной области угловая скорость резко снижается с возрастанием радиуса до радиуса трубы. Эта область потока называется свободным вихрем.

При анализе процессов в противоточной вихревой трубе наиболее часто применяется гипотеза взаимодействий вихрей, предложенная Меркуловым [1].

Течение газа описывается известной системой дифференциальных уравнений движения, сплошности, энергии и состояния в цилиндрических координатах. Меркулов [1] полагает, что после истечения из тангенциальных сопел закрученный поток распространяется по радиусу до тех пор, пока статистическое давление на его внутренней границе не уравнивается с давлением, заполняющего приосевую область газа и образует свободный вихрь с радиальным распределением тангенциальной скорости $v_{\tau} \cdot r = \text{const.}$

Система дифференциальных уравнений в частных производных [1] имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_r \cdot \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_r^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (1) \\ v_r \cdot \frac{dv_r}{dr} + v_r \frac{v_r}{r} = 0 \quad (2) \\ \frac{d(\rho \cdot r \cdot v_r)}{dr} = 0 \quad (3) \\ \frac{dT}{dr} = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (4) \\ p = q \cdot \rho \cdot R \cdot T \quad (5) \end{array} \right.$$

Решение данной системы дифференциальных уравнений позволяет получить распределение скорости свободного вихря, распределение температуры по радиусу, изменение температуры элемента газа за счет адиабатного расширения или сжатия в поле сил давления:

$$\left(\frac{dT}{dr} \right) = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T}{P} \cdot \frac{dP}{dr}, \quad (6)$$

$k=1,4$ - показатель адиабаты.

Решения, полученные А.П. Меркуловым [1], позволяют утверждать, что ни сжимаемость, ни вязкость, ни теплопроводность не могут изменить в радиально-круговом потоке закон потенциального течения, т.е. закон преобразования свободного вихря. Принятая гипотеза взаимодействия вихрей А.П.Меркулова [1], хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями.

На рис.1 представлено изображение процесса энергоразделения потоков газа в T-S - диаграмме.

- 1-2' - процесс адиабатного расширения газа в сопле.
- 1-2 - процесс политронного расширения газа в сопле.
- 2-3 - торможение центрального холодного потока.
- 3-4 - торможение пристеночного горячего потока.
- T_1 - температура газа на входе в сопло.
- P_1 - давление газа на входе в сопло.

Давление периферийного горячего потока за счет действия центробежных сил выше, чем центрального.

Показатель политропы вихревых труб на сжатом воздухе [4] $n=0,95 \div 1,15$, что значительно отличается от показателя адиабатного $k=1,4$ для воздуха. Процесс перераспределения энергии между элементами газа и перехода в приосевую область очень сложен и связан с интенсивной турбулизацией потока, и вязкостью. Возникает обратный приосевой вынужденный (вихрь) поток, который при своем движении закручивается еще более интенсивным свободным вихрем. Вукалович М.П. [2], рассматривая поступательно-вращательное течение несжимаемой вязкой жидкости в вихревых трубах, утверждает, что эффект приосевого охлаждения потока имеет место, а нагрев пристенного слоя жидкости практически отсутствует. Очевидно, что в этом случае вязкость, теплопроводность, и несжимаемость жидкости (отсутствие адиабатного расширения жидкости в сопле) оказывает существенное влияние на формирование вихря, и приводит к его деформации.

Многочисленные экспериментальные исследования вихревого эффекта в трубах, показывают, что характеристики вихревой трубы и ее термодинамическая и экономическая эффективность существенно зависят как от геометрических параметров трубы, так и от термодинамических параметров газа. Поэтому до сих пор нет единого мнения о максимальных пределах эффекта охлаждения и нагрева газа.

Меркулов А.П. [1] считает, что вихревой эффект в вихревых аппаратах может быть использован для получения холода до температуры порядка -80°C и получения тепла с температурой до 120°C .

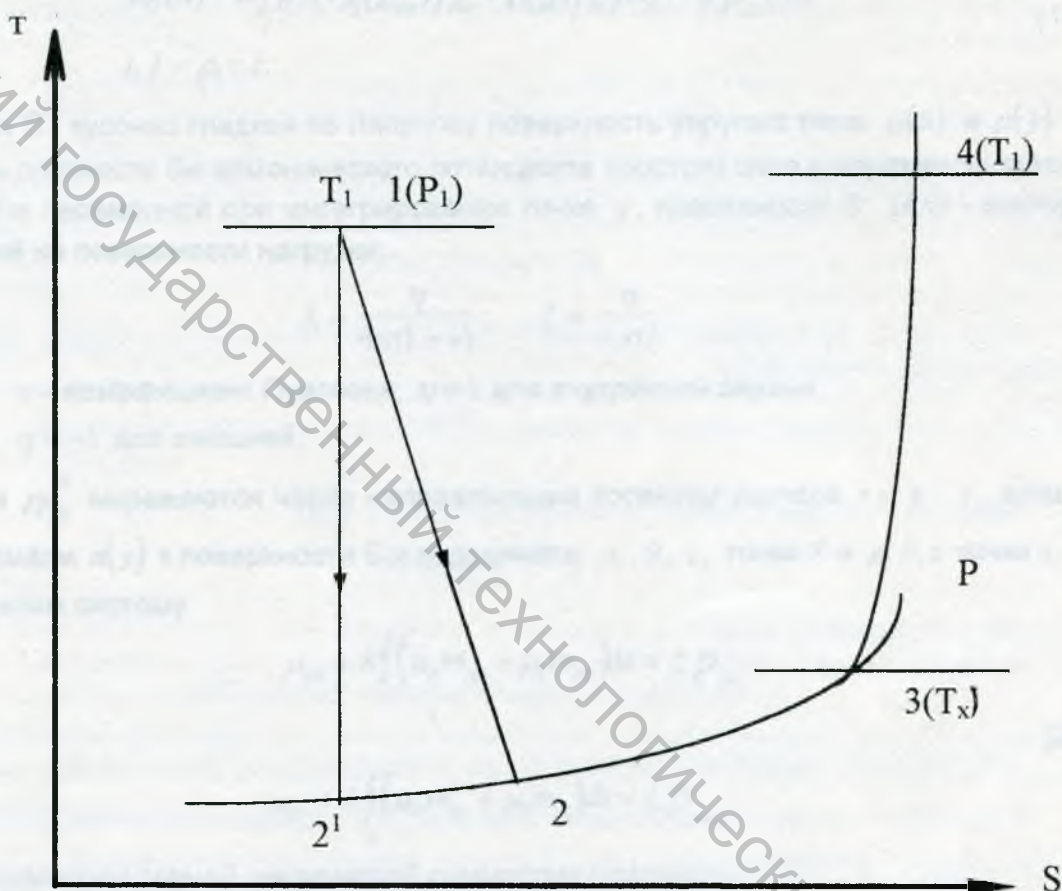


Рис. 1. Процесс энергоразделения потока газа

На кафедре "Технология и оборудование машиностроительного производства" ВГТУ разработана и изготовлена вихревая труба с диаметром 35 мм. Планируется проведение как экспериментального, так и теоретического исследования вихревого эффекта, для создания вихревых аппаратов и применения их в текстильной и легкой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Изд. "Машиностроение" - М.: 1969 г., стр. 182.
2. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. Изд. "Машиностроение" - М., 1972 г., стр. 670.

3. Поляев В.М., Пиралишвили Ш.А. Взаимосвязь микроструктуры потока с характеристиками процесса энергоразделения в вихревых трубах. Вестник МГТУ, "Машиностроение", 1996 г. №1, стр. 45-47.
4. Крамаренко П.Т. Оценка возможностей вихревого эффекта. Теплотехника, 1989 г., Т.11. №2, стр.53-55.

SUMMARY

In the work the authors study the problem of theoretical foundations of the process of vortical gas motion. It is shown that vortical effect has a complex gas dynamic character and can be described with the system of differential equations within cylindrical coordinates.

