

Сущность эффекта Ранка

*Д-р техн. наук В.И. КУЗНЕЦОВ, И.О. ШУКА
Омский государственный технический университет*

In this paper furnished experimental and theoretical demonstrations that in a vortex tube work from axial layers of gas is transferred to peripheral layers by forces of viscosity due to a gradient of angular speeds, and the thermal stream goes from periphery to an axis due to a difference of thermodynamic temperatures of peripheral and axial streams.

В настоящее время есть несколько гипотез относительно сущности эффекта Ранка [2 – 5, 8, 9 – 11]. Однако ни одна из гипотез пока не признана теорией, отражающей сущность эффекта Ранка.

Основная задача данной работы — экспериментально и теоретически обосновать сущность эффекта Ранка.

Для составления физической модели процесса энергетического разделения газа в вихревой трубе необходимо знать траекторию его движения. С этой целью проведены эксперименты по определению составляющих скорости потока газа в различных сечениях вихревой трубы, а также визуализация потока.

Анализ различных способов визуализации (с помощью источников света высокой интенсивности, теневых методов, подмешивания дыма к потоку, трассирующих частиц, голографии, спектроскопии, интерферометрии, лазерных методов измерения скорости и размеров частиц, подачи горящих частиц на вход тангенциального сопла вихревой

трубы с фиксацией их движения с помощью скоростной кинокамеры) позволил найти оптимальный метод определения траектории движения потока газа в вихревой трубе, а именно метод подачи горящих частиц на вход тангенциального сопла вихревой трубы с фиксацией их движения с помощью скоростной кинокамеры [7].

Была изготовлена вихревая труба (ВТ) длиной 250 мм из прозрачного оргстекла. Диаметр соплового сечения ВТ 34 мм, диаметр диафрагмы 17 мм; угол конусности камеры энергетического разделения $3^{\circ}122'$; ширина входного тангенциального сопла 11 мм; высота входного тангенциального сопла 5,5 мм.

Чтобы кинокамера могла фиксировать траекторию движения горящих частиц, стенки камеры энергетического разделения и плоский дроссель горячего потока вихревой трубы были выполнены из прозрачного оргстекла. В качестве горящих частиц использовались продукты горения смеси типа «бенгальский огонь». Кинокамера произво-

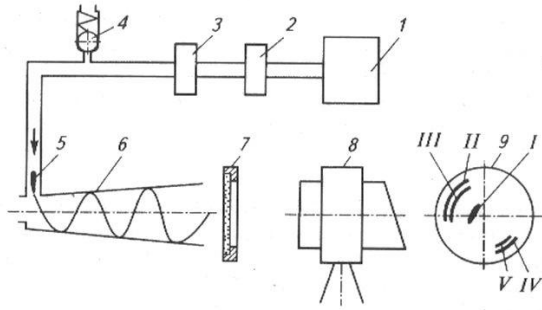


Рис. 1. Съемка движения горячих частиц при совмещении оси кинокамеры с осью вихревой трубы:
1 — компрессор; 2 — маслоотделитель;
3 — влагоотделитель; 4 — предохранительный клапан;
5 — горючая смесь типа «бенгальский огонь»;
6 — прозрачная камера энергетического разделения, прозрачный дроссель; 8 — кинокамера; 9 — кадр киносъемки; I — V — горячие частицы

дила съемку с частотой 4000 кадр/с, время экспозиции одного кадра составляло $5 \cdot 10^{-5}$ с.

Съемка производилась в двух положениях кинокамеры:

- ✓ вдоль оси вихревой трубы (рис. 1);
- ✓ перпендикулярно оси вихревой трубы (рис. 2).

Скоростная киносъемка показала, что поток газа в вихревой трубе движется по винтовой линии, шаг которой увеличивается по мере удаления потока газа от входного тангенциального сопла. Траектория движения горячей частицы имела форму окружности при съемке вдоль оси вихревой трубы (рис. 1), при съемке перпендикулярно оси — форму синусоиды (рис. 2).

Скоростная киносъемка показала, что чем ближе частицы к оси вращения, тем с большей угловой скоростью они движутся. Так, например, частица I (см. рис. 1) за время $5 \cdot 10^{-5}$ с сместилась на угол 130° , частица II — на 95° , частица III — на 80° , частица IV — на 32° , частица V — на 30° . Характер изменения угловой скорости по радиусу вихревой трубы (рис. 3) позволяет сделать вывод, что в вязкой жидкости энергетическая энергия может передаваться от газа, вращающегося с большей угловой скоростью, газу, вращающемуся с меньшей угловой скоростью, т.е. оси к периферии.

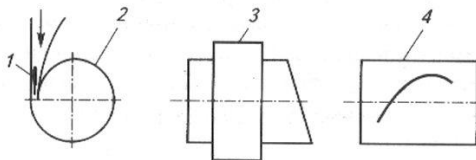


Рис. 2. Съемка движения горячих частиц при перпендикулярном расположении оси кинокамеры с осью вихревой трубы:

- 1 — горючая смесь типа «бенгальский огонь»;
- 2 — прозрачная стенка камеры энергетического разделения, прозрачный дроссель; 3 — кинокамера;
- 4 — кадр киносъемки

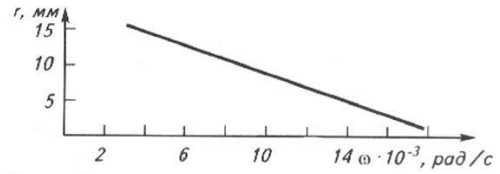


Рис. 3. Изменение угловой скорости потока газа ω по радиусу вихревой трубы r (съемка сечения на расстоянии от среза входного тангенциального сопла, равном четырем диаметрам трубы)

Тарировка движения частиц в потоке проводилась при истечении газа из дозвукового сопла со сверхкритическим отношением давлений до и после сопла с фиксацией его на пленку скоростной кинокамеры.

При наличии радиальной составляющей скорости круговой поток идеального сжимаемого и вязкого несжимаемого газа образует свободный вихрь [11]. Деформация профиля скорости может возникнуть только из-за сил вязкости (не за счет сжимаемости и теплопроводности), поэтому можно заключить, что вязкий сжимаемый газ также должен образовывать в этих условиях течения свободный вихрь.

После формирования свободного вихря радиальные скорости в нем становятся незначительными, и он начинает перемещаться вдоль оси трубы. Вихрь является устойчивым к силам внутреннего трения и не разрушается ими [2]. Действительно, если считать градиенты радиальной и осевой составляющей скорости пренебрежительно малыми по сравнению с градиентом окружной составляющей, напряжение среза от сил трения можно выразить так:

$$\tau = \mu' \left(\frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r} \right), \quad (1)$$

где μ' — динамическая вязкость;

V_φ — окружная скорость;

r — радиус.

Учитывая, что

$$V_\varphi = \omega r, \quad (2)$$

выражение (1) преобразуется к виду

$$\tau = \mu' r \frac{\partial \omega}{\partial r}. \quad (3)$$

Анализ рис. 3 и уравнения (3) показывает, что поток с развитой турбулентностью при обратном осевом движении расширяется и передает свою избыточную энергию посредством сил вязкости периферийными слоями газа. При подходе к диафрагме распределение окружной скорости в потоке по радиусу из-за сил вязкости близко к законам, соответствующим вращению твердого тела (или вынужденного вихря), т.е.

$$V_\varphi / r = \omega = \text{const}. \quad (4)$$

Этот вихрь устойчив к силам трения, так как для него

$\frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = \omega$ и согласно (3) $\tau = 0$, т.е. силы вязкости полностью проявили себя.

Кроме передачи кинетической энергии от вынужденного вихря к свободному происходит процесс теплообмена между ними.

Величина энергообмена между периферийными и осевыми слоями газа определяется из первого начала термодинамики – в тепловой и механической форме [1]:

$$q_{\text{пар } i-j} - i_{i-j} = i_{0j} = i_{0i}, \quad (5)$$

где q – удельная тепловая энергия;

i – энтальпия;

индексы i – начало процесса, j – окончание процесса, 0 – параметры заторможенного потока газа.

$$-l_{i-j} = l_{\text{тр } i-j} + \int_i^j \frac{d\rho_0}{\rho_0}$$

$$\text{или } l_{i-j} + l_{\text{тр } i-j} = -\frac{n}{n-1} \frac{p_{0i}}{p_{0i}} \left[\left(\frac{p_{0j}}{p_{0i}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (6)$$

где l – удельная работа;

ρ – плотность;

p – давление;

n – показатель политропы;

индекс «тр» – трение.

К уравнениям (5) и (6) добавляются уравнения состояния

$$\rho_i = \frac{p_i}{RT_i}, \quad (7)$$

неразрывности (сплошности)

$$G_i = \rho_i F_i V_i, \quad (8)$$

где G – расход газа;

F – площадь сечения;

V – скорость газа,

и теплового потока, идущего от периферийных слоев газа к осевым за счет разности термодинамических температур [11]:

$$Q = K_{\text{ц}} F_{\text{с}} (T_2 - T_1), \quad (9)$$

где Q – тепловой поток;

$K_{\text{ц}}$ – коэффициент теплопроводности;

T – температура;

$F_{\text{с}}$ – площадь теплопередачи.

Система уравнений (5) – (9) является основной для определения параметров газа на выходе из вихревой трубы. Из этой системы уравнений видно, что полное теплосодержание газа изменяется в том случае, если есть обмен работой и теплотой. Работа от оси периферии передается силами вязкости, в результате чего полная температура осевых слоев падает, а периферийных – растет. За счет разности термодинамических температур тепловой поток идет от периферии к оси, что приводит к уменьшению подогрева периферийных слоев и охлаждения осевых слоев.

Экспериментальные данные о закономерностях течения жидкости и газа в вихревых камерах различных устройств позволяют принять некоторые допущения при

исследовании распределения скоростей и давлений в потоке. Одним из возможных является допущение о применимости системы уравнений движения Навье-Стокса к описанию течения жидкости в вихревой трубе с заменой кинематического коэффициента вязкости ν на турбулентный кинематический коэффициент вязкости μ_T [11].

После этого уравнения установившегося осесимметричного течения жидкости в вихревой трубе запишутся в цилиндрической системе координат в виде

$$V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (10)$$

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (11)$$

$$V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_r V_\varphi}{r} = \mu_T \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right); \quad (12)$$

$$\frac{\partial(rV_z)}{\partial z} + \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} = 0, \quad (13)$$

где V_z – осевая составляющая скорости;

V_r – радиальная составляющая скорости.

Введена такая функция тока ψ , что

$$V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad \text{и} \quad V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}.$$

Тогда уравнение (12) преобразовывается к виду

$$\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \left(1 + \frac{\Psi_z^1}{\mu_T} \right) - \frac{V_\varphi}{r^2} \left(1 - \frac{\Psi_z^1}{\mu_T} \right) = 0, \quad (14)$$

где Ψ_z^1 / μ_T аналогично числу Рейнольдса.

Из уравнения (14) видно, что окружная составляющая скорости зависит только от радиуса, если Ψ_z^1 / μ_T зависит от координаты z линейно. В соответствии с этим для получения автомодельного решения принято

$$V_z = \varphi(r)z, \quad 0 \leq z \leq l_T, \quad (15)$$

где l_T – длина вихревой трубы.

С другой стороны, при $z = l_T$ осевая скорость

$$V_z = \frac{G_1}{\pi r_T^2 \varepsilon \rho}, \quad (16)$$

где r_T – радиус вихревой трубы;

неизвестная пока величина $\varepsilon = 1 - (r_c/r_T)^2$,

r_c – радиус соприкосновения периферийных и осевых слоев газа.

Полагая $z = l_T$, из уравнений (15) и (16) получим

$$\varphi(r) = G_1 / (\pi r_T^2 \varepsilon l_T \rho). \quad (17)$$

Окончательно закон распределения осевой скорости по длине вихревой трубы запишется так:

$$V_z = G_1 z / (\pi r_T^2 \varepsilon l_T \rho). \quad (18)$$

Подставив полученное значение V_z в уравнение (13) и решив его относительно V_r , находим радиальную скорость движения газа в вихревой трубе:

$$V_r = G_1 (r_c^2 - r^2) / \{2\pi r_T^2 l_T \rho_1 [1 - (r_c / r_T)^2] r\}. \quad (19)$$

Из уравнения (19) следует:

если $r_c > r$, то $V_r > 0$;

если $r_c < r$, то $V_r < 0$;

если $r_c = r$, то $V_r = 0$.

Таким образом,

- если частица газа находится в осевых слоях, то ее радиальная скорость больше нуля и она движется от оси к периферии;

- если частица газа находится в периферийных слоях, то ее радиальная скорость меньше нуля и она движется от периферии к оси;

- если частица газа расположена на радиусе соприкосновения периферийного и осевого потоков газа, то ее радиальная скорость равна нулю.

Следовательно, через границу вихря ($r = r_c$) жидкость не течет, и поэтому расчет теплообмена между периферийными и осевыми слоями газа можно вести по формулам теплообмена при течении потока жидкости в трубах (через стенку нулевой толщины).

В вихревой трубе процесс переноса теплоты идет только за счет теплопроводности, и для этого случая справедлива формула (9).

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований была предложена уточненная физическая модель процесса энергетического разделения газа в вихревой трубе, основой которой является гипотеза о передаче избыточной энергии за счет разности угловых скоростей от осевых слоев газа к периферийным силами вязкости. На базе этой физической модели была составлена математическая модель, учитывающая обмен работой и теплом между осевыми и периферийными потоками газа.

Решение и анализ математической модели позволили создать методику расчета оптимальных геометрических параметров вихревой трубы для получения наибольшей холодопроизводительности вихревой трубы и методику расчета термогазодинамических параметров при известных геометрических размерах.

В заключение можно отметить, что аналогом вихревой трубы среди хорошо известных устройств можно считать эжектор, в котором все процессы идут наоборот. В эжекторе два газовых потока с различной энергией смешива-

ются в один поток со средней энергией, в вихревой трубе один газовый поток разделяется на два потока с различной энергией (полная температура одного из потоков выше, а другого — ниже полной температуры первоначального потока).

В эжекторе энергия передается от высокоэнергетического газа к низкоэнергетическому силами вязкости за счет разности линейных скоростей. В вихревой трубе энергия передается от низкоэнергетического к высокоэнергетическому газу силами вязкости из-за наличия градиента угловых скоростей.

Таким образом, эффекту Ранка и устройству, работающему на его основе (вихревой трубе), можно дать такое определение: вихревая труба — это антиэжектор, в котором температурное разделение (эффект Ранка) возникает из-за градиента угловых скоростей осевого и периферийного потоков газа.

Список литературы

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969.
2. *Бареуков С.И., Кузнецов В.И.* Вихревой эффект Ранка. — Иркутск: ИГУ, 1983.
3. *Кузнецов В.И.* Теория и расчет эффекта Ранка: Науч. издание. — Омск: изд. ОмГТУ.
4. *Мартьянов А.В., Бродянский В.М.* Что такое вихревая труба? — М.: Энергия, 1976.
5. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. — М.: Машиностроение. 1969.
6. *Меркулов В.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. — Изд. 2-е перераб. и доп. — Самара: Оптима, 1997.
7. *Патент №-2117298, РОСПАТЕНТ.* Способ определения траектории вихревого движения газа/В. И. Кузнецов, Макаров В. В., Яковлев А. Б. // Открытия. Изобретения. 1998. Бюл. № 22.
8. *Пирамишвили Ш.А.* и др. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения/Ш. А. Пирамишвили, В. М. Пол, М. Н. Сергеев; Под ред. А. И. Леонтьева. — М.: Энергомаш. 2000.
9. *Суслов Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В.* Вихревые аппараты. — М.: Машиностроение, 1985.
10. *Штым А.Н.* Аэродинамика циклонно-вихревых камер. — Владивосток: изд. ДВУ, 1985.
11. *Щукин В.К.* Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. — М.: Машиностроение, 1980.