



К ВОПРОСУ О СУЩНОСТИ ЭФФЕКТА РАНКА

В. И. Кузнецов, В. В. Макаров

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Рассмотрен вопрос работы вихревой трубы. Исследован вопрос по влиянию расслоения периферии и осевых слоев газа по полной температуре за счёт обмена работой и теплотой между ними. Определен механизм передачи кинетической энергии от оси к периферии. Проверено влияние сил вязкости градиента угловых скоростей на энергообмен в вихревой трубе. Экспериментально найдены зависимости энергообмена от теплофизических свойств газа, величины давления газа на входе в вихревую трубу и выхода из вентили и диафрагмы, от весовой доли холодного потока, геометрических параметров основных элементов вихревой трубы. Проведены работы по выявлению зависимости температурной эффективности от длины вихревой трубы. Проведены исследования по выявлению сущности вихревого эффекта — расслоения слоев газа по температуре.

Ключевые слова: эффект Ранка, вихревая труба, энергообмен, периферийный поток, осевой поток, вязкость, градиент угловых скоростей.

Эффект Ранка реализуется в вихревой трубе — устройстве, разделяющем входной газовый поток на два, в одном из которых полная температура выше полной температуры входного газового потока, у другого — ниже.

Полные температура и давление жидкости (сжимаемой и несжимаемой) могут изменяться только при обмене работой и теплотой [1, 2].

Каким образом это происходит, пока неизвестно.

В связи с вышеизложенными основными задачами данной работы являются:

- определить наличие у осевого потока избыточной энергии для передачи ее периферийному потоку;
- выяснить возможности теплового обмена между осевым и периферийным потоками газа;
- найти механизм передачи энергии от оси к периферии;
- обосновать принцип действия вихревой трубы и на его основе показать сущность эффекта Ранка.

Для определения возможности обмена работой и теплотой, а также механизма передачи энергии от оси к периферии в вихревой трубе и обоснования сущности эффекта Ранка были проведены эксперименты с измерением полных и статических величин давления и температуры в различных сечениях вихревой трубы (рис. 1). Угловая скорость периферийных и осевых слоев газа определялась по результатам скоростной киносъемки. Киносъемка производилась в двух положениях скоростной кинокамеры:

- скоростная кинокамера и вихревая труба были расположены соосно;
- ось скоростной кинокамеры располагалась перпендикулярно оси вихревой трубы.

Для визуализации течения подавались горячие частицы (типа бенгальского огня) на вход в тангенциальное сопло вихревой трубы с фиксацией их движения с помощью скоростной кинокамеры.

Для верификации используемых в расчетах математических моделей выполнены экспериментальные исследования на различных вихревых трубах. Достоверность и обоснованность результатов обеспечена за счет применения сертифицированного измерительного оборудования, средств для обработки экс-

периментальных данных и проведения численного анализа, соблюдения критериев подобия. Подтверждается соответствием полученных результатов известным достоверным данным, описаниям и наблюдениям других авторов.

Степень достоверности научных положений, результатов и выводов, содержащихся в данной работе, подтверждается:

- верификацией математических моделей посредством сопоставления расчетных и экспериментальных данных;
- применением положений теории подобия и размерностей, статистической обработки результатов экспериментальных исследований, применением тарированного измерительного оборудования;
- использованием признанных научных положений, апробированных методов и средств исследования, применением современных математических методов;
- применением фундаментальных положений механики сплошной среды, постановкой опытов с применением аттестованного метрологического оборудования и датчиков.

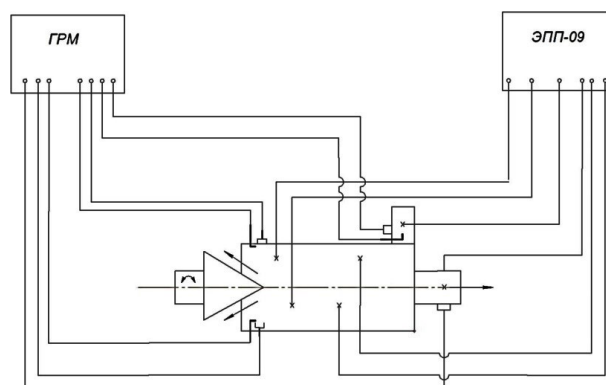


Рис. 1. Схема препарирования вихревой трубы:
ГРМ — групповой регистрационный манометр ГРМ-2,
ЭПП-09 — электронный потенциометр
Fig. 1. Scheme of Vortex tube preparation:
GRM — group registration pressure gauge GRM-2,
EPP-09 — electronic potentiometer

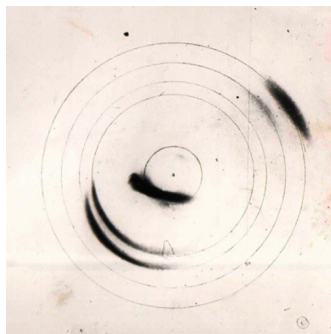


Рис. 2 Определение угловой скорости по результатам скоростной киносъемки
Fig. 2. The definition of angular velocity on the results of high-speed filming

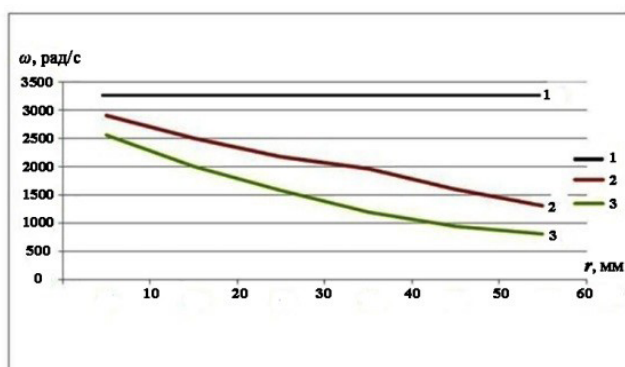


Рис. 3. Распределение угловой скорости газа по радиусу вихревой трубы:
1 — $l=0$; 2 — $l=d_t$; 3 — $l=12d_t$
Fig. 3. Distribution of angular velocity of the gas along the radius of the Vortex tube:
1 — $l=0$; 2 — $l=d_t$; 3 — $l=12d_t$

Полученные результаты исследований движения потоков в вихревой трубе, а также результаты других исследователей приведены на рис. 2 и рис. 3 [3, 4].

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что на всем пути движения осевых слоев газа от дросселя до диафрагмы их угловая скорость выше, чем у периферийных слоев. Только в сопловом сечении $\left(\bar{l} = \frac{l}{d_t} = 0\right)$ после передачи всей избыточной энергии периферийным слоям газа осевые начинают вращаться с постоянной угловой скоростью ($\omega = const$). Следовательно, кинетическая энергия передается от осевых слоев газа периферийным слоям силами вязкости за счет градиента угловых скоростей.

Возможность передачи кинетической энергии от оси к периферии можно проиллюстрировать следующим образом (рис. 4).

Как видно из рис. 3 и рис. 4, в сечении I-I (у дросселя) угловая скорость осевых слоев значительно больше угловой скорости периферийных слоев. Частицы газа, расположенные ближе к оси вихревой трубы, будут передавать часть своей энергии периферийным слоям за счет вязкости. Этот процесс идет в течение всего времени движения осевого потока газа от дросселя к диафрагме. При подходе к диафрагме осевые слои газа передадут всю свою избыточную энергию периферийным слоям и в сопловом сечении станут вращаться по закону квазитвердого тела ($\omega_{oc} = const$) (сечение III-III рис. 4 и горизонтальная линия рис. 3).

Количество передаваемой энергии от оси к периферии вихревой трубы определяется отношением полных давлений перед дросселем и на выходе из диафрагмы. Распределение полного давления газа по относительному радиусу $\bar{r}$ в различных зонах вихревой трубы показано на рис. 5.

Относительный радиус $\bar{r}$ — это отношение текущего радиуса к радиусу рабочей камеры вихревой трубы $\bar{r} = \frac{r}{r_T}$. Самый большой перепад полных

давлений по относительному радиусу находится в сопловом сечении (рис. 5, кривая 1). При удалении от соплового сечения к дроссельному крану перепад полных давлений по относительному радиусу уменьшается. Перед дроссельным краном полное давление газа очень мало изменяется по радиусу. Подобное распределение полных давлений газа по относительному радиусу можно объяснить следующим образом. На входе в тангенциальное, сопло полное давление газа имеет наибольшее значение. По мере движения периферийного потока газа от входного сопла к дросселю на газ производится два противоположных воздействия:

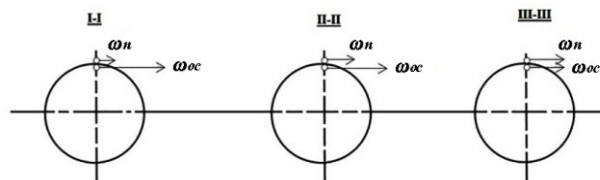


Рис. 4. Изменение угловой скорости части газа под действием сил вязкости при движении осевого потока от дросселя к диафрагме.
I-I — сечение перед дросселем;

II-II — сечение в центре вихревой трубы;

III-III — сечение на входе в вихревую трубу $\left(\bar{l} = \frac{l}{d_t} = 0\right)$

Fig. 4. Change in the angular velocity of a part of the gas under the influence of viscosity forces during the movement of the axial flow from the throttle to the diaphragm.

I-I — cross-section before throttle;

II-II — cross section in the center of the Vortex tube;

III-III — cross section at the inlet Vortex tube $\left(\bar{l} = \frac{l}{d_t} = 0\right)$

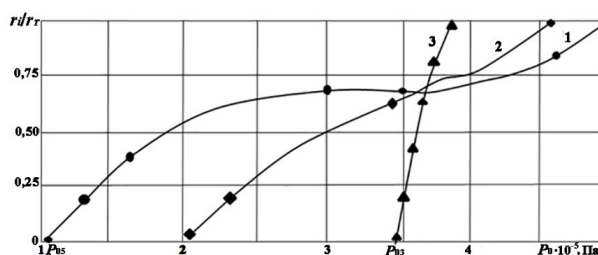


Рис. 5. Распределение полного давления по относительному радиусу в различных зонах вихревой трубы:

1 — в сопловом сечении $\left(\bar{l} = \frac{l}{d_t} = 0\right)$;

2 — на расстоянии $4d_t$ от плоскости диафрагмы;

3 — на расстоянии $8d_t$ от плоскости диафрагмы

Fig. 5. Distribution of full pressure on relative radius in the various zones of the Vortex tube:

1 — in the nozzle section $\left(\bar{l} = \frac{l}{d_t} = 0\right)$;

2 — at a distance of $4d_t$ from the plane of the diaphragm;

3 — at a distance of $8d_t$ from the plane of the diaphragm

— подвод кинетической энергии от осевых слоев газа силами вязкости за счет градиента угловых скоростей, приводящий к повышению полного давления периферийного потока;

— падение полного давления периферийного потока газа из-за гидравлического сопротивления на трение и местные сопротивления.

Падение полного давления периферийного потока газа из-за гидравлических сопротивлений больше роста полного давления от подвода кинетической энергии со стороны осевых слоев газа. В результате этого взаимодействия полное давление периферийного потока газа перед дросселем ниже полного давления на входе в тангенциальное сопло.

Осевой поток газа начинает свое движение от дросселя к диафрагме и представляет собой часть периферийного потока, перешедшего с большого радиуса на меньший перед дросселем (площадь дросселя меньше необходимой для выхода из него всего периферийного потока). Поэтому полное давление осевого потока перед дросселем незначительно отличается от полного давления периферийного потока в этом же сечении. По мере своего движения от дросселя к диафрагме осевой поток силами вязкости за счет градиента угловых скоростей передает избыточную энергию периферийным слоям. В результате этого взаимодействия осевой поток газа изменяет свое полное давление от максимального перед дросселем до минимального — перед выходом из диафрагмы.

Таким образом, периферийный поток газа имеет максимальное давление в сопловом сечении, минимальное — перед дроссельным краном; осевой поток газа, движущийся в противоположном направлении, имеет максимальное давление перед дроссельным краном, минимальное — в сопловом сечении. В результате в сопловом сечении полное давление газа имеет наибольший перепад по относительному радиусу, а по мере удаления от соплового сечения эпюра полных давлений по относительному радиусу сглаживается.

Из рис. 5 видно, что осевые слои газа совершают работу, так как их полное давление падает от P_{03} у дросселя до P_{05} (это отражено на рис. 5) на выходе из диафрагмы. Величину удельной работы, которая передана от осевых слоев газа к периферийным, можно определить по уравнению [1]:

$$L_{3-5} = C_p T_{03} \left[1 - \left(\frac{P_{05}}{P_{03}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \dot{m}_{03} - \dot{m}_{05} \quad (1)$$

Величина удельной работы, которая подведена к периферийным слоям газа, определяется уравнением [1]

$$L_{1-3} = \mu_x L_{3-5}, \quad (2)$$

где $\mu_x = \frac{G_x}{G_1}$ — весовая доля холодного потока.

Экспериментальные данные распределения полной температуры газа по относительной длине вихревой трубы (рис. 6) говорят о том, что полная температура периферийных слоев газа растет при движении от соплового сечения к дросселю (данные приведены для вихревой трубы со следующими геометрическими размерами $d_7 = 21,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d_5 = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_1 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b_1 = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 0,192 \text{ м}$). Рост полной температуры газа периферийных слоев вызван обменом работой и теплотой с осевыми слоями газа.

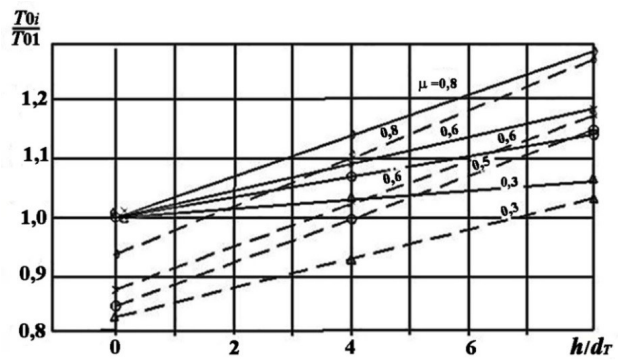


Рис. 6. Измерение полной относительной температуры газа по длине вихревой трубы в зависимости от μ :

— относительная температура периферийных слоев;
----- относительная температура осевых слоев

Fig. 6. Measurement of the total relative gas temperature along the length of vortex tubes depending on the μ :

— relative temperature of peripheral layers
----- relative axial temperature layers

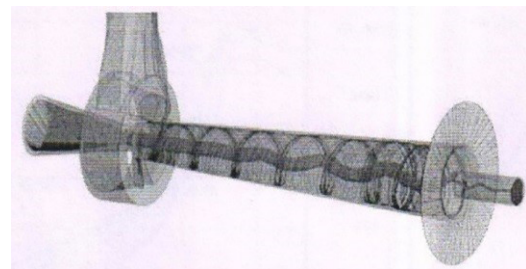


Рис. 7. Формирование вращающихся вихрей в двухконтурных энергоразделителях (9 калибров)

Fig. 7. Formation of rotating vortices in two-circuit energy separators (9 caliber)



Рис. 8. Структура газового потока в вихревой трубе
Fig. 8. Structure of the gas flow in the Vortex tube

Осевые слои газа начинают свое движение от дросселя после перехода части периферийного потока на меньший радиус, поэтому температура осевых слоев газа перед дросселем близка температуре периферийных слоев (рис. 6). При движении осевых слоев от дросселя к диафрагме они совершают работу над периферийными слоями силами вязкости за счет градиента угловых скоростей, падает их полное давление и полная температура. В сопловом сечении заканчивается энергообмен между осевыми и периферийными слоями газа, в результате чего в сопловом сечении перед диафрагмой температура газа имеет минимальное значение.

Низший уровень температуры имеет место у соплового сечения. «Из подобного распределения полной температуры газа в вихревой трубе можно сделать следующие выводы. К периферийному потоку газа энергия подводится равномерно при его движении от входного тангенциального сопла до дроссельного крана. В сопловом сечении подведенная энергия равна нулю, поэтому полная температура периферийных слоев газа равна полной температуре газа перед входом в вихревую трубу» [5–9]. На выходе из дроссельного крана подведенная энергия будет максимальной, поэтому полная температура периферийных слоев газа в этом сечении максимальна. Осевой поток газа формируется перед дроссельным краном из части периферийного потока, поэтому его полная температура перед дроссельным краном равна температуре периферийного потока. Осевой поток газа совершает работу над периферийным потоком. Величина этой работы определяется отношением расходов газа $\mu = \left(\frac{G_x}{G_1} \right)$,

отношением полных давлений подогретого и охлажденного газов, их теплофизическими свойствами и температурой подогретого потока газа. Механизм передачи кинетической энергии от осевых слоев газа к периферийным — градиент угловых скоростей и силы вязкости. При подходе к диафрагме осевой поток газа передает всю свою избыточную энергию периферийному потоку, в результате чего в сопловом сечении полная температура газа будет минимальной, поэтому расчет теплообмена между периферийными и осевыми слоями газа можно ввести по формулам теплообмена при течении потока жидкости в трубах через стенку нулевой толщины.

Экспериментальные данные о закономерностях течения жидкости и газа в вихревых камерах различных устройств позволяют принять некоторые допущения при исследовании распределения скоростей и давления в потоке. Одним из возможных является допущение о применимости системы уравнений движения Навье — Стокса к описанию течения жидкости в вихревой трубе с заменой кинематической вязкости ν на турбулентную вязкость μ_T [1, 10].

После замены ν на μ_T уравнения установившегося осесимметричного течения жидкости в вихревой трубе запишутся в цилиндрической системе координат в виде [3]:

$$V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (3)$$

$$V_z \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (4)$$

$$V_z \frac{\partial V_\phi}{\partial r} + \frac{V_r V_\phi}{r} = \mu_T \left(\frac{\partial^2 V_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial r} - \frac{V_\phi}{r^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial (rV_z)}{\partial z} + \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Вводится функция тока ψ такая, что $V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ и $V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$.

Тогда уравнение (5) преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 V_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial r} \left(1 + \frac{\Psi'_z}{\mu_T} \right) - \frac{V_\phi}{r^2} \left(1 - \frac{\Psi'_z}{\mu_T} \right) = 0, \quad (7)$$

где $\frac{\Psi'_z}{\mu_T}$ аналогично числу Рейнольдса.

Из уравнения 7 видно, что окружная составляющая скорости зависит только от радиуса, если $\frac{\Psi'_z}{\mu_T}$ зависит от координаты Z линейно.

Решение систем уравнений (3)–(7) позволило определить радиальную скорость газа в вихревой трубе в зависимости от ее геометрических размеров и расположения частицы газа в ней [3].

$$V_r = \frac{G_1 (r_c^2 - r^2)}{2\pi \cdot r_T^2 \cdot l_T \cdot \rho_1 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_T} \right)^2 \right] r}. \quad (8)$$

Из уравнения 8 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 осевых потоков газа, то ее радиальная скорость равна нулю.

Следовательно, через границу соприкосновения периферийного и осевых потоков ($r=r_c$) жидкость не течет. Аналогичный результат получен О. А. Соколовой путем визуализации картины течения в камере энергоразделения двухконтурной вихревой трубы (рис. 7) [11, 12].

Жерняков В. С. и Целищев А. В., исследуя вихревую трубу, определили структуру газового потока, которая показала, что через границу соприкосновения периферийного и осевого потоков жидкость не течет (рис. 8) [13, 14].

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 теплопроводностью [3, 15, 16].

Обмен работой и теплотой приводит к расслоению периферийных и осевых потоков газа по величине полных давлений и температур. Механизмом передачи кинетической энергии от оси к периферии служат силы вязкости при наличии градиента угловых скоростей.

В данной статье представлены результаты теоретического и экспериментального исследования эффекта Ранка. На базе этих исследований описана сущность эффекта Ранка и сформулирован принцип действия вихревой трубы.

Эффект Ранка возникает в вихревой трубе при обмене работой и теплотой между периферийным и осевым потоками газа.

Механизм передачи кинетической энергии от оси к периферии — силы вязкости при наличии градиента угловых скоростей.

Условные обозначения

P — давление, Па; T — температура, К; Δt — разность температур; G — массовый расход газа, кг/с; ρ — плотность, кг/м³; μ_x — весовая доля холодного потока; F — площадь, м²; r — радиус, м; d — диаметр, м; b — ширина, м; h — высота, м; l — длина, м; V , V_φ , V_r , V_z — абсолютная, окружная, радиальная и осевая скорости движения газа, м/с; g — ускорение силы тяжести, м/с²; L — удельная работа, Дж/кг; Δp — потеря полного давления газа, Па; k — показатель адиабаты; C_p — изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); ω — угловая скорость, 1/с.

Индексы

- 0 — параметры заторможенного потока газа;
- 1 — параметры газа на входе в вихревую трубу;
- 2 — параметры газа в среднем сечении периферийного потока;
- 3 — параметры газа перед дросселем;
- 4 — параметры газа в среднем сечении осевого потока;
- 5 — параметры газа на выходе из диафрагмы.

Список источников

1. Самойлович Г. С. Гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
2. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование // Сборник научных трудов SWORLD (Научные труды SWorld). 2013. Т. 3, № 3. С. 79–99.
3. Кузнецов В. И., Макаров В. В. К вопросу о сущности эффекта Ранка // Научно-технические проблемы современного двигателестроения: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2016. С. 351–359.
4. Гуцол А. Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. 1997. Т. 167, № 6. С. 665–687. DOI: 10.3367/UFNr.0167.199706e.0665.
5. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Вихревая труба: эксперимент и теория: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 240 с.
6. Мартыновский В. С., Алексеев В. П. Вихревой эффект охлаждения и его применение // Холодильная техника. 1953. № 3. С. 63–67.
7. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А. И. Леонтьева. М.: Энергомаш, 2000. 412 с. ISBN 5-8022-0006-5.
8. Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И. Численное моделирование течения газа в вихревых устройствах // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 2 (72). С. 66–73.
9. Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И., Свистунов А. В. [и др.]. Анализ параметров смешения стратифицированных потоков в вихревом регуляторе давления газа // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 8–15.

10. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Эффект Ранка: эксперимент, теория, расчет. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 376 с. ISBN 978-5-9500364-2-2.

11. Соколова О. А. Исследования термогазодинамических характеристик вихревой трубы с дополнительным потоком с использованием численных методов // Прикладная математика, механика и процессы управления. 2013. Т. 1. С. 258–268.

12. Калашник М. В., Вишератин К. Н., Васильев В. И. [и др.]. Исследование процессов температурной стратификации в трубке Ранка // Фундаментальные основы инженерных наук. 2011. № 8. С. 278–282.

13. Жернаков В. С., Целищев А. В. Методика численного и физического моделирования процесса фазоразделения жидкости и газа при вихревом течении // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 193–198.

14. Белявский Я. Д. Влияние звука на теплоперенос в газах // Техническая акустика. 2014. № 3. URL: <http://www.ejta.org/2014.6> (дата обращения: 01.02.2018).

15. Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. [и др.]. Тепло-техника. М.: Высшая школа, 2008. 671 с. ISBN 978-5-0600395-8-0.

16. Бетлинский В., Жидков М., Овчинников В. [и др.]. Экспериментальное исследование термодинамической эффективности регулируемой вихревой трубы на природном газе // Нефтегазовые технологии. 2008. № 2. С. 2–6.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 1763-0468

AuthorID (РИНЦ): 161955

ResearcherID: N-9618-2016

Адрес для переписки: vik.kuznetsov@yandex.ru

МАКАРОВ Владимир Вячеславович, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан факультета «Информационные технологии и компьютерные системы», доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 9846-7090

AuthorID (РИНЦ): 374195

AuthorID (SCOPUS): 57193513945

Адрес для переписки: makarov@omgtu.ru

Для цитирования

Кузнецов В. И., Макаров В. В. К вопросу о сущности эффекта Ранка // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 48–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-48-54.

Статья поступила в редакцию 23.03.2018 г.

© В. И. Кузнецов, В. В. Макаров