

УДК 621.9

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА К БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАМЕРЫ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

© 2015 Ш. А. Пиралишвили, А. А. Соколова

Рыбинский государственный авиационный технический  
университет имени П.А. Соловьёва

Представлены результаты исследования теплоотдачи от интенсивно закрученного потока газа к боковой поверхности камеры энергоразделения вихревой трубы, уточнено распределение коэффициента теплоотдачи по длине камеры энергоразделения с учётом влияния затухания окружного компонента скорости и наличия эффекта подогрева периферийного потенциального вихря. Численные расчёты, результаты которых представлены в данной работе, показали наличие в камере энергоразделения прецессирующего приосевого вихревого жгута и периодически расположенных по периферии вдоль всей оси крупномасштабных вихревых структур – тороидальных вихрей. Приведена зависимость коэффициента теплоотдачи от значения степени расширения газа в вихревой трубе, а также изменение температурной эффективности с ростом диаметра камеры энергоразделения. Показано, что неадиабатность оказывает большее влияние на термодинамическую эффективность вихревых труб малого масштаба из-за роста относительной доли энергии, отводимой от боковой поверхности, в форме тепла.

*Вихревая труба, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.*

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-162-167

Среди многообразия способов интенсификации теплообмена одним из наиболее простых и распространённых является применение вихревого течения теплоносителя. Это связано с тем, что закрутка потока усиливает процесс тепло- и массообмена, способствует выравниванию температурных неравномерностей.

В приведённых в литературе результатах численных и экспериментальных опытов по оценке эффективности теплоотдачи от закрученного потока в камере энергоразделения вихревых труб к ограничивающим их поверхностям имеются существенные расхождения.

В связи с этим необходимо провести уточнение распределения коэффициента теплоотдачи по длине камеры энергоразделения с учётом влияния масштабного фактора, затухания окружного компонента скорости, эффектов подогрева периферийного квазипотенциального вихря, а также определить степень влияния неадиабатности вихревых труб на эффективность процесса энергоразделения в за-

висимости от внутреннего диаметра.

Для визуализации картины течения и оценки термогазодинамических параметров в работе использованы компьютерные технологии, позволяющие моделировать достаточно сложные процессы стационарного и нестационарного течений.

Эффективность неадиабатных вихревых труб во многом зависит от характеристик закрученного потока, формирующегося в камере энергоразделения. Для возможности их сравнения приведены исследования характеристик труб в адиабатном приближении и при охлаждении воздухом.

Предмет исследования – противоточная вихревая труба с внутренним диаметром 20, 10, 5, 2 мм и длиной 9 калибров, снабжённая на выходе подогретого потока крестовиной длиной 1,5 калибра, на выходе охлаждённого потока установлена диафрагма с углом раствора  $15^\circ$  и диаметром центрального отверстия  $\overline{d}_0 = 0,5$  (рис.1).



Рис.1. Исследуемая модель вихревой трубы

Для обеспечения максимального отвода тепла от стенки камеры энергоразделения выбран высокотеплопроводный материал модели (медь,  $\lambda=380$  Вт/(м\*К)).

С использованием программного пакета UniGraphics построены трёхмерные модели вихревых энергоразделителей, на базе которых осуществлялась генерация сеток с помощью универсального сеткопостроителя ICEM CFD. Сетки неструктурированные, тетрагональные, максимальный размер ячеек 0,6 мм. Имеется сгущение в области пограничного слоя. Толщина первого призматического слоя (размер первой ячейки от стенки в пограничном слое) –  $10^{-5}$  мм. Генерация сетки осуществлена в декартовых координатах.

Численное моделирование выполнено в стационарной трёхмерной постановке для установившегося вязкого турбулентного течения с учётом сжимаемости и неизотермичности, при отсутствии химических реакций и фазовых переходов. Термодинамические свойства газа и твёрдого тела определены как функции от температуры. Свойства рабочей среды описывались моделью Air Ideal Gas (молярная масса  $\mu = 0,029$  кг/моль (воздух)). Зависимости теплопроводности и динамической вязкости учитывались по формулам Саттерленда:

$$\mu = \frac{1,45774 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,5}}{110,4 + T};$$

$$\lambda = \frac{0,00250139 \cdot T^{1,5}}{194,4 + T}.$$

Твёрдое тело предполагалось изотропным.

Процесс теплообмена происходит вблизи стенки камеры энергоразделения. Необходимо выполнить более точный расчёт в пристенной области модели. Течение газа в камере энергоразделения описывается системой дифференциальных уравнений неразрывности, движения (в форме Навье-Стокса), энергии и состояния, а теплоперенос в твёрдом теле – уравнением Фурье:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_j) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_j H) = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j}(U_i \tau_{ij} + Q_j) + \rho U_i f_i, \\ P = \rho R_\mu T. \end{cases}$$

Для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая SST модель турбулентности, так как она является комбинацией k-ε и k-ω моделей, благодаря чему может хорошо считать как пристеночные течения, так и свободные течения вдали от стенок.

Начальное значение физического шага по времени  $10^{-5}$  с. В ходе расчёта шаг по времени увеличивался до  $5 \cdot 10^{-4}$  с (промежуточные значения  $5 \cdot 10^{-5}$ ;  $10^{-4}$  с).

Интенсивность теплоотдачи от закрученного потока к стенке вихревой трубы обусловлена высокими значениями окружной компоненты скорости периферийного вихря, а также подогревом пе-

риферийных масс газа в результате энергоразделения.

Численные расчёты, представленные в виде компьютерной визуализации, показали наличие в камере энергоразделения прецессирующего приосевого вихревого жгута и периодически расположенных по

периферии вдоль всей оси крупномасштабных вихревых структур – тороидальных вихрей (рис. 2, 3), описанных в работах Ю. А. Кныша [1] и С. В. Лукачёва [2] и экспериментально подтверждённых в опытах по визуализации течения Н. Н. Новикова и Ш. А. Пиралишвили [3].

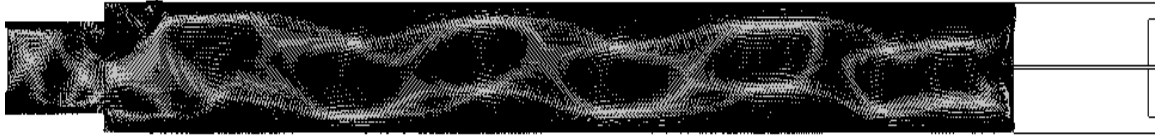


Рис. 2. Прецессия вихревого жгута в вихревой трубе

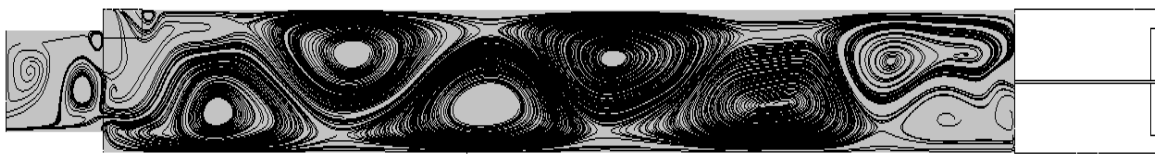


Рис. 3. Формирование крупномасштабных вихревых структур в противоточной вихревой трубе

Перенос массы вихрями в направлении радиального градиента давления вносит основной вклад в температурное разделение за счёт реализации холодильных циклов. Прецессионное движение волнового типа происходит по всей длине приосевого вихря от места установки крестовины на дросселе до соплового ввода.

По длине трубы от соплового ввода к дросселю происходит уменьшение коэффициента теплоотдачи примерно на 70 % вследствие уменьшения значений окружной компоненты скорости.

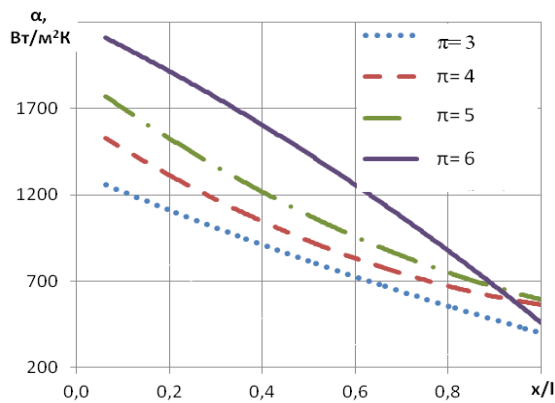
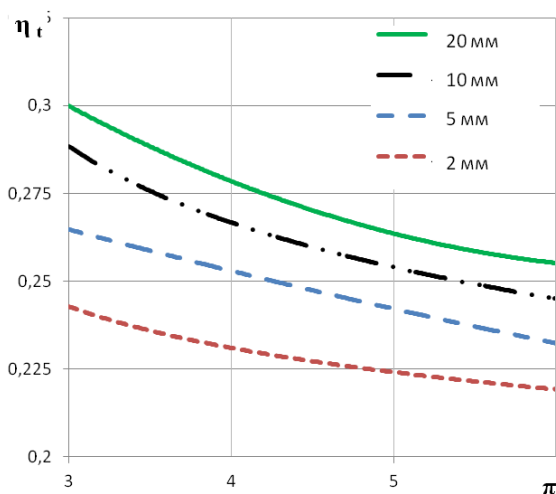
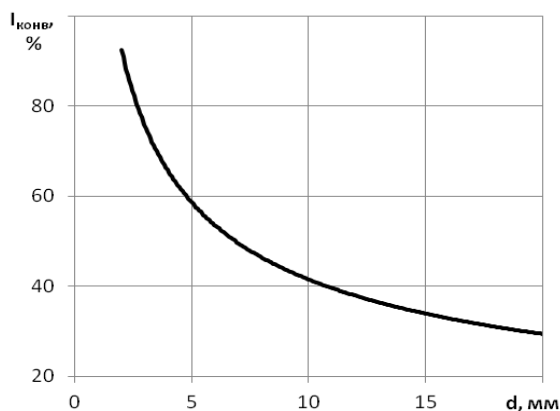
С ростом давления на входе в вихревую трубу наблюдается некоторое возрастание коэффициента теплоотдачи. Повышение уровня окружных скоростей в какой-то степени обуславливает рост величины градиента радиального давления. Подогрев стенки трубы происходит из-за диссипации энергии. Гидравлика модели (протяжённость камеры энергоразделения, величина отверстия диафрагмы, наличие крестовины на выходе подогретого потока) определяет интенсивность затухания окружного момента импульса и, следовательно, изменение величины коэффициента теплоотдачи по длине камеры энергоразделения (рис. 4).

Отвод теплоты охлаждающим воздухом приводит к снижению температуры газа в периферийных слоях закрученного потока. Вследствие этого снижается температура газа, поступающего в приосевую область с периферии. Таким образом, снижается температура газа, формирующего приосевую вихрь, что при прочих равных условиях позволяет увеличивать холодопроизводительность вихревой трубы.

Сравнение охлаждаемых вихревых труб различных диаметров показало, что в диапазоне степеней расширения газа  $\pi=3\dots 6$  с уменьшением масштаба вихревой трубы падает её температурная эффективность. Возрастание неадиабатности позволяет в некоторой степени компенсировать наблюдаемое снижение эффектов энергоразделения за счёт генерации крупномасштабных вихревых структур, реализующих холодильные циклы.

Температурная эффективность рассчитывается как

$$\eta_t = \frac{\Delta T_x^*}{\Delta T_s^*}, \text{ где } \Delta T_s^* = T_1^* \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

Рис. 4. График зависимости  $\alpha=f(x)$ Рис. 5. График зависимости  $\eta_t=f(\pi)$  для охлаждаемых вихревых трубРис. 6. Зависимость  $I_{конв}=f(d)$ 

Численные расчёты показали, что для всех диаметров вихревых труб с увеличением степени расширения падает температурная эффективность. Это связано с большим ростом абсолютных эффектов охлаждения при изоэнтропном расширении (так как  $\Delta T^*_s$  зависит в данном случае только от  $\pi$ ) по сравнению с ростом температуры охлаждённого потока (рис. 5).

Зависимость эффективности процесса энергоразделения от диаметра камеры была впервые обнаружена Хилшем, а затем подтверждена опытными результатами А.Д. Сулова, Л.М. Дыскина, А.В. Мартынова, А.П. Меркулова и др. С уменьшением масштаба вихревой трубы эффективность процесса энергоразделения падает. Отсюда следует, что в вихревых трубах малого диаметра целесообразно использовать камеру энергоразделения большей длины.

В микротрубах теплообмен будет оказывать более существенное влияние на процесс энергоразделения, чем в трубах больших размеров, так как доля энергии, передающаяся от ограждающих стенок трубы, растёт. На рис.6 показана зависимость доли конвективной составляющей энтальпии, передаваемой через неадиабатные стенки в окружающую среду, от диаметра камеры энергоразделения (за 100 % принята доля энтальпии для вихревой трубы 2 мм).

Доля конвективной составляющей энтальпии у трубы  $d=10$  мм практически равна доле энтальпии у трубы  $d=20$  мм. Это связано с увеличением площади теплоотдающей поверхности при незначительном уменьшении плотности теплового потока.

С ростом давления на входе в вихревую трубу наблюдается рост доли энергии, переносимой в форме тепла через боковые поверхности (в 2, 3 раза), в связи с увеличением трения потока о стенки и, соответственно, более интенсивным тепловыделением.

Из-за передачи части энергии периферийного потенциального вихря в окру-

жающую среду эффект подогрева уменьшается (рис. 7). Эффект охлаждения возрастает в связи с тем, что в возвратное течение из периферийного потока попадают более холодные по сравнению с адиабатной вихревой трубой массы газа. С уменьшением диаметра наблюдается увеличение разности между относительными

эффектами в адиабатных и неадиабатных вихревых трубах (10–14% в микротрубах, 4–6% в трубе 20 мм). Это связано с тем, что у вихревых микротруб больше доля энергии, передаваемой от стенок камеры энергоразделения в окружающую среду, чем у труб диаметра 10 и 20 мм.

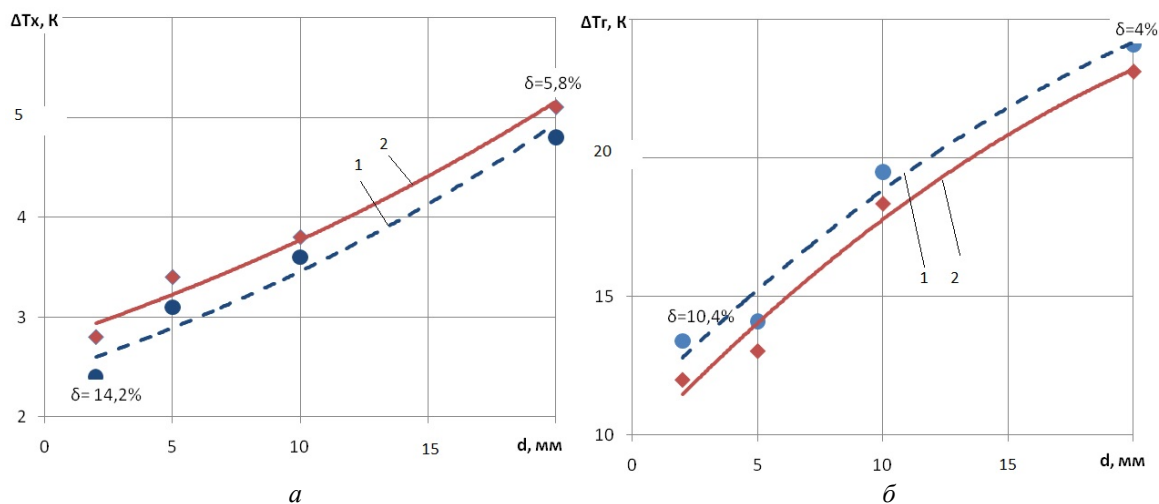


Рис. 7. Графики зависимостей  $\Delta T_x=f(d)$  и  $\Delta T_r=f(d)$ :  
1 – адиабатная вихревая труба; 2 – неадиабатная вихревая труба

### Библиографический список

1. Кныш Ю.А. Физическая модель энергопереноса в вихревой трубе // Материалы V всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1988. С. 71-74.

2. Лукачев С.В. Исследование неустойчивых режимов течения газа в вихревой трубе Ранка // Инженерно-физический журнал. 1981. Т. 41, № 5. С. 784-790.

3. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М.,

Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНЦП Энергомаш, 2000. 412 с.

4. Бродянский В.М., Мартынов А.В. Вихревая труба с внешним охлаждением. М.: Холодильная техника, 1964. 154 с.

5. Алексеенко В.П. Экспериментальные исследования охлаждаемой вихревой трубы как элемента системы термостатирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 10, № 3. С. 870-875.

### Информация об авторах

**Пиралишвили Шота Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и технической физики, Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А.Соловьёва. E-mail: [piral@list.ru](mailto:piral@list.ru). Область научных интересов: аэрокосмическая теплофизика, энергетика, гидрога-

зодинамика и теплообмен в закрученных потоках, вихревой эффект.

**Соколова Анна Александровна**, студент магистратуры, Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва. E-mail: [annasokolova1991@mail.ru](mailto:annasokolova1991@mail.ru). Область научных интересов: вихревой эффект, теплообмен в закрученных течениях.

## NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER FROM A SWIRLING FLOW TO THE LATERAL SIDE OF THE VORTEX TUBE ENERGY SEPARATION CHAMBER

© 2015 Sh. A. Piralishvili, A. A. Sokolova

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation

The results of investigation of heat transfer from an intensive swirling flow of gas to the lateral side of the vortex tube energy separation chamber are presented in the paper. The distribution of the heat transfer coefficient along the energy separation chamber is specified taking into account the effect of damping of the circumferential velocity component and the effect of heating of a potential peripheral whirl. Numerical calculations, the results of which are presented in this paper show the presence of a paraxial precessing vortex core and large-scale vortex structures - toroidal vortices periodically arranged on the periphery along the axis in the energy separation chamber. The dependence of the heat transfer coefficient on the value of the ratio of expansion of gas in the vortex tube, as well as changes in the temperature efficiency caused by increasing the energy separation chamber diameter is presented. It is shown that non-adiabacy has a greater effect on the thermodynamic efficiency of small-scale vortex tubes due to the increase of the relative fraction of the energy rejected from the lateral side in the form of heat.

*Vortex tube, heat transfer, heat transfer coefficient.*

### References

1. Knish Y.A. Fizicheskaya model' energoperenosa v vikhreвой трубе. *Materialy Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhreвой effekti I ego primeneniye v tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1988. P. 71-74. (In Russ.)
2. Lukachev S.V. Unstable gas flow modes in a Ranque vortex tube. *Journal of Engineering Physics*. 1981. V. 41, no. 5. P. 1171-1175.
3. Piralishvili Sh. A., Polyayev W.M., Sergeev M.N. *Vikhreвой effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya* [Vortex effect. Experiment, theory, technologies]. Moscow: Energomash Publ., 2000. 412 p.
4. Brodyansky V.M., Martynov A.V. *Vikhrevaya truba s vneshnim okhlazhdeniem* [Outside-cooled vortex tube]. Moscow: Kholodil'naya tekhnika Publ., 1964. 154 p.
5. Alexeenko V.P. The cooled vortex pipe experimental research as an element of avionics vortical system. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2008. V. 10, no. 3. P. 870-875. (In Russ.)

### About the authors

**Piralishvili Shota Alexandrovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of General and Applied Physics, Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation. E-mail: [piral@list.ru](mailto:piral@list.ru). Area of Research: aerospace thermal physics, power engineering, fluid and gas dynamics and heat transfer in swirling flows, vortex effect.

**Sokolova Anna Aleksandrovna**, Master Student, Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation. E-mail: [annasokolova1991@mail.ru](mailto:annasokolova1991@mail.ru). Area of Research: vortex effect, heat transfer in swirling flows.