

УДК: 5.628; 536.46.38; 502

## Энергоразделение в вихревых трубах при ламинарном течении в сопловом вводе\*

Ш.А. Пиралишвили, О.В. Василюк

*Рыбинский авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск, 152934, Россия  
e-mail: piral@list.ru; kazanch\_3004@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2018

После доработки 23.04.2019

Принята к публикации 29.05.2019

Проведено численное моделирование рабочего процесса вихревой трубы при ламинарном режиме течения на входе. Проанализировано влияние геометрических и режимных параметров на эффекты энергоразделения. Определены характерные параметры газодинамики течения, влияющие на структуру потока. Выявлены причины процесса переноса энергии в форме тепла от приосевых слоев газа к периферийным.

**Ключевые слова:** вихревая труба, ламинарный режим, энергоразделение, турбулентность, вторичные вихревые структуры.

### Введение

Попытки теоретического объяснения процесса энергоразделения в закрученном потоке сжимаемых сред, выполненные учеными разных стран и поколений, начиная с Ранка, Хилша и по настоящее время, не привели к единому мнению о физической сущности явления, несмотря на достаточно большое количество предложенных гипотез [1–9]. Наиболее достоверной по своей сути и описанию наблюдаемых в опытах физических явлений, сопутствующих процессу энергоразделения, является гипотеза взаимодействия вихрей, основополагающаяся на основном переносе энергии от приосевых слоев к периферийным крупномасштабным турбулентными структурам [8–12]. В работах Хилша Р., Меркулова А.П. [2, 10] использовался термин «турбулентные моли» без объяснения условий их генерации, что привело к большому количеству споров и дискуссий [4–9]. Обоснованием достоверности гипотезы взаимодействия вихрей явились работы [8–17], в которых численными расчетами и экспериментально подтверждено влияние на энергоперенос крупномасштабных вихревых структур,

генерируемых прецессией приосевого вихря в периферийном потоке, соприкасающимся со стенками проточной части камеры энергоразделения, и реализующими перенос энергии от приосевых слоев к пристенным по принципу обратного теплового цикла за счет кинетической энергии турбулентности закрученного потока с переносом тепла от низкотемпературных слоев к высокотемпературным в радиальном направлении.

Не до конца изучена возможность организации эффекта энергоразделения при ламинарном течении потока газа, подаваемого в вихревую трубу через сопловое устройство, с объяснением его физической сущности. Не выявлена причина переноса энергии от приосевых слоев к периферийным.

Как правило, авторы доступных публикаций [21, 22] считают, что в рассматриваемом варианте ламинарность течения сохраняется в проточной части камеры без генерации турбулентности. Некоторый рост эффекта энергоразделения до  $\Delta t \approx 10\text{--}15^\circ$  у подогреваемого периферийного газа достигается, по их мнению, за счет повышения интенсивности диффузии молекул в процессе периодического дрейфа от приосевых слоев к периферийным и обратно в поле радиального градиента давления, направ-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-00974.

ленного от оси к периферии. При этом в отмеченных публикациях отсутствует аналитическая оценка этой возможности, что делает ее несколько недоказательной. Вместе с тем вытекает предположение о возможной генерации турбулентности непосредственно в проточной части камеры энергоразделения с образованием вихревых структур [20, 21], возникающих на апробированных турбулентных режимах подвода газа через сопловой ввод.

### Численное исследование рабочего процесса вихревой трубы

Рассматриваемый объект исследования – противоточная вихревая труба цилиндрической формы диаметром 20 мм, входное закручивающее устройство тангенциального типа в форме прямоугольника с относительной площадью  $\bar{F}_c = 0.1$ , отвод охлажденного потока осуществляется через отверстие диафрагмы с безразмерной величиной радиуса камеры энергоразделения  $\bar{r}_d = 0.7$ , относительная длина которой составляет 3, 6 и 9 калибров (рис. 1). Выбор геометрических параметров обусловлен тем, что при любых граничных условиях турбулентного режима течения они приводят к наибольшим эффектам энергоразделения [4].

Разработка 3D-расчетной области выполнена в среде CAD/CAM системы КОМПАС–3D с построением структурированных гексагональных сеточных моделей с числом ячеек по диаметру порядка 100, с параметром  $y^+$  от 0.5 до 1.

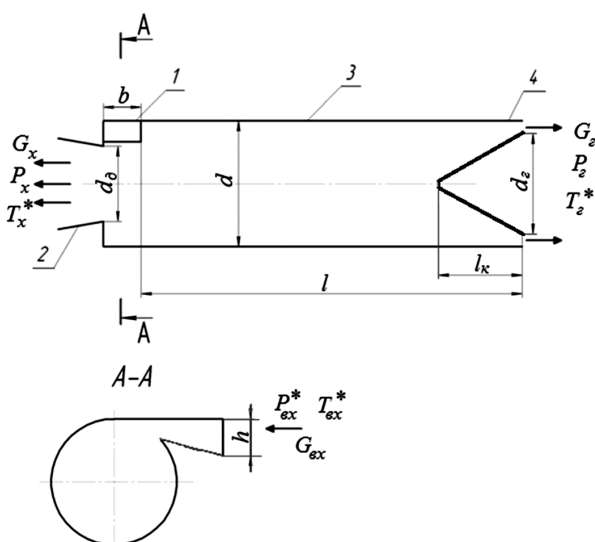


Рис. 1. Схема противоточной вихревой трубы: 1 – сопловой ввод; 2 – диафрагма; 3 – камера энергоразделения; 4 – дроссель

Математическая модель состоит из системы трехмерных уравнений Навье–Стокса в стационарной постановке, уравнений энергии (для полной энтальпии) и состояния. С использованием программного пакета ANSYS-CFX проведен ряд расчетов, исследующих структуру течения, с определением воздействия граничных и геометрических параметров на интенсивность процесса энергоразделения.

Численная визуализация течения подтвердила формирование в камере энергоразделения вихревой трубы двух вращающихся в одном направлении вихрей (рис. 2), перемещающихся в противоположных осевых направлениях и обеспечивающих основное перераспределение полной энтальпии на турбулентных режимах работы с подтверждением гипотезы взаимодействия вихрей [19].

На рис. 3 представлены линии тока. Видно, что режим течения несколько отличается от ламинарного и носит псевдотурбулентный характер несмотря на низкие числа Рейнольдса. С увеличением перепада давления возрастает величина зоны рециркуляции (с 2 калибров до 4.2).

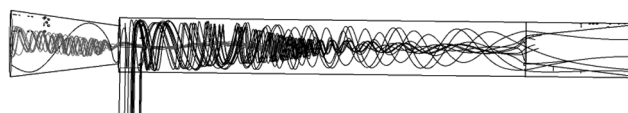


Рис. 2. Периферийный и приосевой вихри

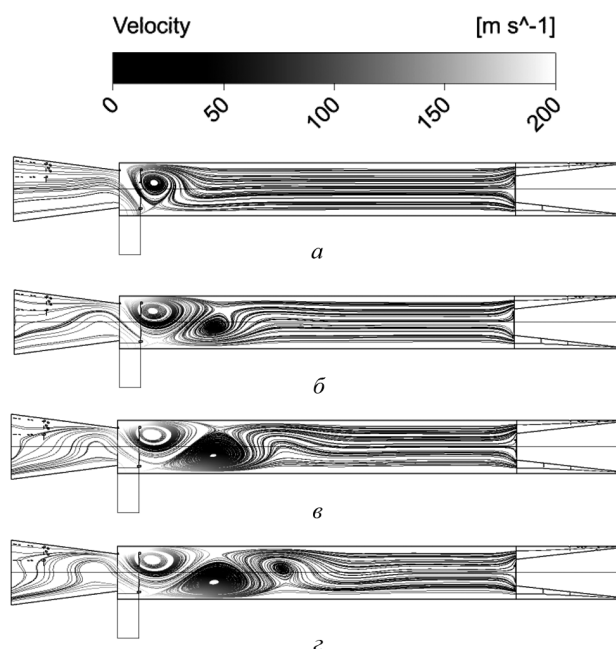


Рис. 3. Линии тока в вихревой трубе с длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 9$  и конусом при различных значениях давления на входе: а – 100 Па; б – 200; в – 300; г – 400

График зависимости относительных эффектов подогрева и охлаждения для различных вихревых труб от значений числа Рейнольдса во входном сопле представлен на рис. 4. Просчитано несколько вариантов вихревых труб, отличающихся длиной камеры энергоразделения. Наибольший эффект подогрева обеспечивает вихревая труба с крестовиной на «горячем» конце и относительной длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 6$  калибров (см. рис. 4, а), а охлаждения – труба с конусом на «горячем» конце и относительной длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 3$  калибра (см. рис. 4, б). Крестовина позволяет максимально преобразовать энтальпию закрученного потока в тепловую энергию, но повышает гидравлическое сопротивление, что оказывает существенное влияние на течение при малых числах Рейнольдса.

На рис. 5 представлена зависимость доли охлажденного потока от давления на входе. Конструктивное исполнение «горячего» выхода (крестовина или конус) влияет несущественно на величину доли охлажденного потока, основное влияние оказывает радиус проходного сечения диафрагмы.

Численные расчеты характеристик рабочего процесса вихревой трубы с камерой энергоразделения длиной  $\bar{l} = 6$  и 9 калибров и установкой конуса на «горячем» конце подтвердили, что увеличение давления во входном сопле от 100 до 400 Па (при одинаковом относительном перепаде) приводит к росту доли охлажденного потока на 13.8%. При изменении длины камеры энергоразделения от трех до шести калибров доля охлажденного потока уменьшается на 15.7%.

Наибольшее значение относительного эффекта охлаждения ( $\Delta t_x = 10.5$  К) получено для вихревой трубы с конусом на «горячем» конце и длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 3$  калибра. Максимальные величины относительного эффекта подогрева ( $\Delta t_r = 26$  К) достигались при исследовании вихревой трубы с крестовиной на «горячем» конце и длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 6$  калибров.

На рис. 6 представлено распределение температуры торможения в продольном сечении вих-

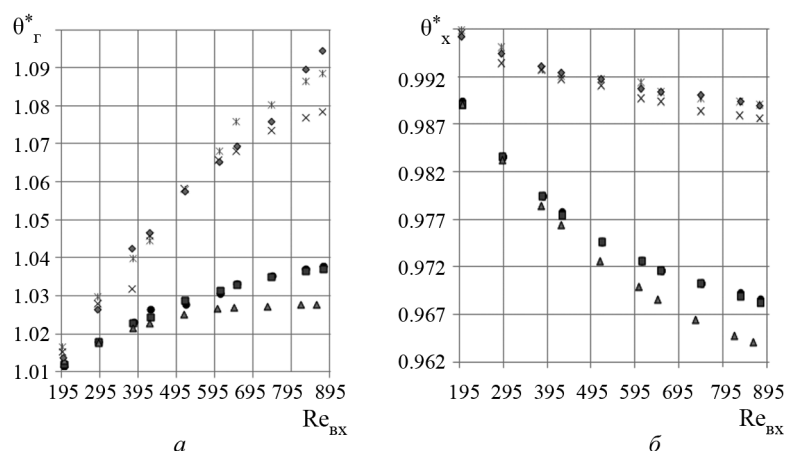


Рис. 4. Зависимость относительного эффекта подогрева  $\theta_r^*$  (а) и относительного эффекта охлаждения  $\theta_x^*$  (б) от числа Рейнольдса  $Re_{вх}$  во входном сопле:  $\blacktriangle$  – длина камеры энергоразделения 3 калибра, с конусом,  $\bullet$  – 9 калибров, с конусом,  $\blacksquare$  – 6 калибров, с конусом,  $\blacklozenge$  – 3 калибра, с крестовиной,  $\blackstar$  – 6 калибров, с крестовиной,  $\times$  – 9 калибров, с крестовиной

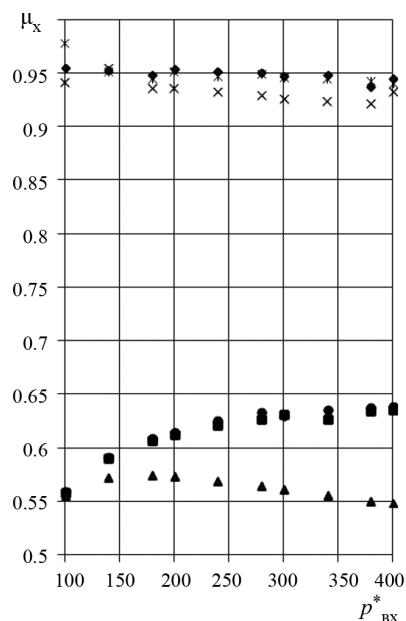


Рис. 5. Зависимость доли охлажденного потока  $\mu_x$  от давления  $p_{вх}^*$ , Па, во входном сопле:  $\blacktriangle$  – длина камеры энергоразделения 3 калибра, с конусом,  $\bullet$  – 9 калибров, с конусом,  $\blacksquare$  – 6 калибров, с конусом,  $\blacklozenge$  – 3 калибра, с крестовиной,  $\blackstar$  – 6 калибров, с крестовиной,  $\times$  – 9 калибров, с крестовиной

ревой трубы. С повышением давления во входном сопле от 100 до 400 Па область минимальной температуры увеличивается, а ее численное значение снижается, т.е. относительный и абсолютный эффекты охлаждения возрастают. Это объясняется возрастанием интенсивности вторичных вихревых структур, работающих по типу обратного цикла [17, 18] и обеспечивающих переход энергии турбулентности в тепло.

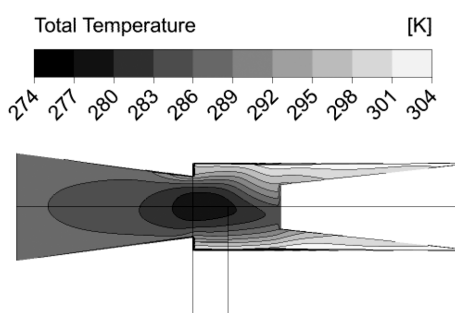


Рис. 6. Распределение полной температуры потока в вихревой трубе с длиной камеры энергоразделения  $\bar{l} = 3$  и конусом при  $P_{\text{вх}}^* = 400$  Па

### Заключение

Энергоразделение в вихревой трубе осуществляется в процессе переноса массы вихревыми структурами в условиях существования радиального градиента давления, величина которого зависит от интенсивности закрутки потока. В процессе переноса на более высокую радиальную позицию массы воздуха сжимаются и, как следствие, нагревают окружающий газ, отдавая ему тепло. В то же время крупномасштабные вихревые структуры перемещаются на более низкие радиальные позиции со снижением полной температуры в процессе расширения, отбирая тепло у окружающего газа. Вклад теплопроводности в перераспределение энергии не превышает 3–5%. Процесс энергоразделения на ламинарном режиме течения частично осуществляется за счет бародиффузии.

Получено подтверждение, что процесс энергоразделения в вихревых трубах с ламинарным подводом сжимаемой среды в сопловом сечении осуществляется крупномасштабными вихрями, но с меньшей эффективностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ranque G.J.** Experiences sue la detentegirataire avec productions simultanecs d'un echappementd'airfroid // J. de Physique et de Radium. 1933. V. 7. N 4. P. 112–115.
2. **Hilsch R.** Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kolterprozeb // Z. fur Naturforschung. 1946. Bd. 1. N 4. P. 203–208.
3. **Scheper G.W.** The vortex tube-internal flow data and a heat transfer theory // Refrigerating Engineering. 1951. V. 59. Oct. P. 985–988.

4. **Чарный И.А.** К теории вихревого холодильника // Изв. АН СССР ОТН. Механика жидкости и газа. 1962. № 6. С. 148–153.
5. **Van-Deemter J.J.** On the theory of the Ranque-Hilsch cooling effect // Applied Scientifics Research, Netherland. Sec. A. 1953. V. 3. P. 174–196.
6. **Алексеев Т.С.** О природе эффекта Ранка // ИФЖ. 1964. Т. 7. № 4. С. 121–130.
7. **Гольдштик М.А.** К теории эффекта Ранка // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. 1969. № 4. С. 153–162.
8. **Rusa X., Homutescu C., Bujor C.** Theoretical and experimental confederations recording the Ranque effect // Bue Inst. Politehn. Jasi, 1987. Sec. 4. V. 33. N 1-4. P. 51–54.
9. **Schults-Grunow F.** How the Ranque-Hilsch vortex tube operates // Refr. Engineering. 1951. Jan. N 1. P. 52.
10. **Меркулов А.П.** Гипотеза взаимодействия вихрей // Изв. вузов. Энергетика. 1964, № 3. С. 74–82.
11. **Хинце И.О.** Турбулентность. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. 680 с.
12. **Пиралишвили Ш.А.** Физико-математические модели процесса энергоразделения в вихревых термотрансформаторах Ранка // АнаТИ. Андропов. 1985. Деп. в ВИНТИ 04.01.85. № 160-85.
13. **Schmidt W.** Der Massenaustansch in freier Luft. Hamburg: H. Grandverlag, 1925. P. 18.
14. **Пиралишвили Ш.А.** Модифицированная гипотеза взаимодействия вихрей как физико-математическая модель эффекта Ранка // Процессы горения и охрана окружающей среды: Мат. I Всесоюзной науч.-техн. конф. РГАТА. Рыбинск. 1993. С. 87–88.
15. **Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M.** Flow and thermodynamic characteristics of energy separation in a double-circuit vortex tube // Experimental Thermal and Fluid Science, 1996. N 12. P. 399–410.
16. **Frohlingendorf W., Under H.** Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque–Hilsch vortex tube // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1999. N 42. P. 415–422.
17. **Kim C.S., Sohn C.H.** Dynamic characteristics of an unsteady flow through a vortex tube // Journal of Mechanical Science and Technology. 2006. V. 20. N 12. P. 2209–2217.
18. **Hartnett J.P., Eckert E.R.G.** Experimental study of the velocity and temperature distribtyon in a high velocity vortex – type flow // Transections of the ASME. Ser. C. 1957. May. P. 751–758.
19. **Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: УНЦП «Энергомаш», 2000. 412 с.
20. **Piralishvili Sh.A., Azarov A.I.** Vortex effect theory, experiment, industrial application, prospects // Heat Transfer Research. 2006. V 37. P. 707–730.
21. **Зайцев Д.К., Смирнов Е.М.** Влияние сжимаемости на разрушение вихря при течении газа по круглой трубе // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1996. № 5. С. 37–43.
22. **Баранов В.А., Смирнов Е.М., Видульцев Ю.А., Зайцев Д.К.** Эффект Ранка в ламинарном потоке. Санкт-Петербург: СПбГУ, 1996. С. 291–306.

## Energy separation in vortex tubes with laminar flow in the nozzle input

Sh.A. Piralishvili, O.V. Vasilyuk

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, 152934, Russia  
e-mail: piral@list.ru; kazanch\_3004@mail.ru

The Ranque effect theory still remains incompletely solved notwithstanding the attempts of several generations of researchers. The devices previously studied by many authors operate un-

der conditions of sonic velocity at their inlets and turbulent flow in the energy separation chamber. This allowed most researchers to conclude that generation of large-scale vortices with intense flow turbulence was the cause of energy redistribution. However, the issue of optimal conditions and the possibility of obtaining the effect of energy separation in a laminar flow in the vortex tube is still open. The object of the study is a countercurrent vortex tube of cylindrical shape with a 20 mm diameter. The inlet tangential swirling nozzles are made in the form of a rectangle with a relative area of  $\bar{F}_{sw} = 0.1$ . The cooled flow removal is performed through the diaphragm with a relative radius of  $\bar{r}_d = 0.7$ . The presented geometrical parameters allow achieving the highest effects of energy separation. Computational results allowed elicit the dependence of the relative heating and cooling effects for different vortex tubes on the Reynolds number in the inlet nozzle, and the dependence of the cooled flow share on the inlet pressure values. Various flow stream patterns have been obtained, which allowed determine the reason of energy separation in vortex tubes at the laminar flow mode. It was confirmed that the process of energy separation in vortex tubes with a laminar supply of a compressible fluid in the nozzle section is accomplished by the large-scale vortices, similar to calculations at turbulent regimes, but with lower efficiency.

**Keywords:** vortex tube, laminar flow, energy separation, turbulence, secondary vortex structures.

## REFERENCES

1. **Ranque G.J.** Experiences sue la detentegiratoire avec productions simultanecs d'un echappementd'airfroid. *J. de Physique et de Radium*, 1933, vol. 7, no. 4, pp. 112–115.
2. **Hilsch R.** Die expansion von gasen in zentrifugalfeld als kolterprozeb. *Z. fur Naturforschung*, 1946, Bd.1, no. 4, pp. 2-3–208.
3. **Scheper G.W.** The vortex tube-internal flow data and a heat transfer theory. *Refrigerating Engineering*, 1951, vol. 59, Oct., pp. 985–988.
4. **Charny I.A.** K teorii vikhrevogo kholodil'nika [To the theory of vortex refrigerator]. *Izv. AN SSSR OTN. Mekhanika zhidkosti i gaza – Izv. USSR REL. Fluid and gas mechanics*, 1962, no. 6, pp. 148–153. In Russ.
5. **Van-Deemter J.J.** On the theory of the Ranque-Hilsch cooling effect. *Applied Scientific Research, Netherland. Sec. A*, 1953, vol. 3, pp. 174–196.
6. **Alekseev T.S.** O prirode ehffekta Ranka [On the nature of Ranque effect]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1964, vol. 7, no. 4, pp. 121–130. In Russ.
7. **Goldshnik, M.A.** K teorii ehffekta Ranka [To the Ranque theory]. *Izvestiya AN SSSR, Mekhanika zhidkosti i gaza – Fluid Dynamics. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1969, no. 4, pp. 153–162. In Russ.
8. **Rusa X., Homutescu C., Bujor C.** Theoretical and experimental confederations recording the Ranque effect. *Bue Inst. Politehn. Jasi*, 1987, Sec. 4, vol.33, no. 1-4, pp. 51–54.
9. **Schults-Grunow F.** How the Ranque-Hilsch vortex tube operates. *Refr. Engineering*, 1951, no. 1, pp. 52.
10. **Merkulov A.P.** Gipoteza vzaimodejstviya vikhrej [Hypothesis of vortex interaction]. *Izvestiya vuzov. Energetika – Izvestiya Vuzov. Power industry*, 1964, no. 3, pp. 74–82. In Russ.
11. **Hinze J.O.** *Turbulence. An introduction to its mechanism and theory.* McGraw-Hill, New York, 1959. 586 p. [Russ. Ed. Turbulence. Moscow, Publishing House Phys. mat. lit., 1963. 680 p.]
12. **Piralishvili Sh.A.** Fiziko-matematicheskie modeli protsessa ehnergorazdeleniya v vikhrevykh termotransformatorakh Ranka [Physical and mathematical models of the process of energy separation in Ranque vortex thermotransformers]. Deposited in VINITI 04.01.85., No. 160–85. 42 p. In Russ.
13. **Schmidt W.** *Der Massenaustausch in freier Luft.* Hamburg: H. Grandverlag, 1925. 18 p.
14. **Piralishvili Sh.A.** Modifitsirovannaya gipoteza vzaimodejstviya vikhrej, kak fiziko-matematicheskaya model' ehffekta Ranka [Modified hypothesis of the interaction of vortices, as a physico-mathematical model of the Ranque effect]. «*Protsessy goreniya i okhrana okruzhayushhej sredy*». *Materialy I Vsesoyuznoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii.* [Combustion processes and environmental protection: Mat. I All-Union scientific-technical. conf.]. Rybinsk: Publ. house of RGATA, 1993, S. 87–88. In Russ.
15. **Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M.** Flow and thermodynamic characteristics of energy separation in a double-circuit vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, no. 12, pp. 399–410.
16. **Frohlinsdorf W., Under H.** Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque–Hilsch vortex tube. *W. Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1999, no. 42, pp. 415–422.
17. **Kim C.S., Sohn C.H.** Dynamic characteristics of an unsteady flow through a vortex tube. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2006, vol. 20, no. 12, pp. 2209–2217.
18. **Hartnett J.P., Eckert E.R.G.** Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high velocity vortex – type flow. *Transactions of the ASME. Ser C*, 1957, May, pp. 751–758.
19. **Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M., Sergeev M.N.** *Vikhrevoj Ehffekt. Eksperiment, Teoriya, Tekhnicheskie Resheniya* [Vortex Effect. Experiment, Theory, Technical Solutions]. Moscow: UNTSP «Energomash» Publ., 2000. 412 p. In Russ.
20. **Piralishvili Sh.A., Azarov A.I.** Vortex effect theory, experiment, industrial application, prospects. *Heat Transfer Research*, 2006, vol. 37, pp. 707–730.
21. **Zaitsev D.K., Smirnov E.M.** Effect of compressibility on vortex breakdown in a gas flow in a circular tube. *Fluid Dynamics*, 1996, no. 5, pp. 661–665. <https://doi.org/10.1007/BF02078216>
22. **Baranov V.A., Smirnov E.M., Vikultsev Y.A., Zaitsev D.K.** *Effekt Ranka v laminarnom potoke* [The Ranque effect in laminar flow]. St. Petersburg: St. Petersburg state University Publ., 1996, pp. 291–306. In Russ.