

УДК 53.096 + 533

Сравнение температуры воздуха на уровне внутренней стенки вихревых труб с круглым и квадратным сечениями рабочего канала*

**М.Р. Гордиенко, И.К. Кабардин, М.Х. Правдина, С.В. Какаулин,
В.И. Полякова, В.Г. Меледин, Г.В. Бакакин, Н.И. Яворский**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: fregat120@yandex.ru

Измерения температуры газа на уровне внутренней стенки труб Ранка с квадратным и круглым поперечными сечениями при вариации доли холодного расхода для обеих труб показали наличие трех характерных зон роста температуры, которые не изменяются в широком диапазоне доли холодного расхода. Эти зоны характерны для анализа течения в вихревой трубе в рамках концепции кризиса течения.

Ключевые слова: вихревая труба, труба Ранка, температура на стенке, кризис течения.

Введение

В работе представлено продолжение экспериментального исследования [1, 2] кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша. Эффект, открытый Ранком в 1933 году [3], получил признание и вызвал интерес в инженерных и научных кругах после работы Хилша [4]. Эффект Ранка состоит в радиальном разделении входящего потока на два выходящих: нагретый периферийный и охлажденный осевой потоки. На настоящее время существует множество гипотез, которыми пытаются объяснить температурное разделение. Исследователи согласны в том, что охлаждение осевого потока происходит из-за адиабатического расширения. Нагрев периферийного потока пока не имеет общепринятого научного обоснования.

В работах [1, 2] было выдвинуто предположение, что нагрев потока происходит при его перестройке с помощью каскада гидравлических прыжков на определенных участках трубы. Это предположение косвенно подтверждено при доле холодного расхода 0,3, но требует проверки в более широком диапазоне режимных параметров. В работах [5–12] измерялась температура на стенке трубы и в потоке. В работе [12] были измерены поперечные профили температуры с небольшим шагом вдоль потока на всем

* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-29-01262).

протяжении трубы с квадратным поперечным сечением при доле холодного расхода $\mu = 0,3$. Выяснилось, что нагревание происходит на ограниченном участке продольной координаты. Анализ этих данных показал, что вдоль потока имеются участки с различным градиентом температуры: слабое изменение температуры вблизи входа и выхода горячего течения и резкое изменение в средней части течения, причем изменение градиента с обеих сторон происходит скачкообразно [1].

В работе [1] течение в вихревой трубе с квадратным поперечным сечением было впервые проанализировано в рамках концепции кризиса течения во вращательно-поступательном потоке. В таком потоке пристенная струя, которая направляется к «горячему» выходу, граничит с циркуляционной зоной, представляющей собой торOIDальный вихрь [13–15]. Оказалось, что заметный рост температуры вдоль пристенной струи происходит в области, где наблюдается кризис течения: отношение продольной скорости на границе пристенной струи к критической скорости колеблется относительно единичного значения. Критическая скорость — это скорость распространения длинных волн на границе пристенной струи с циркуляционной зоной [16–18].

В работе [19] были представлены и проанализированы новые подробные результаты измерений кинематических характеристик кризисного течения, в том числе пульсаций скорости. Выявлены признаки наличия гидравлического прыжка вблизи входа закрученного потока в рабочий канал вихревой трубы.

Постановка задачи

Цель работы — сравнить структуру поведения температуры вдоль труб квадратного и круглого поперечных сечений при вариации доли расхода μ в «холодный» выход. Входной участок для вихревых труб (завихритель) не изменялся. В представленной работе измеряется температура воздуха на уровне внутренней стенки каналов круглого и квадратного поперечных сечений по всей длине трубы.

Труба Ранка квадратного сечения была создана для удобства оптической диагностики и использована в работах [20–22] для оптических бесконтактных измерений полей скорости, которые в [1] сопоставлялись с температурными данными из [12].

В работах [23, 24] было показано, что для трубы с квадратным поперечным сечением разница температур на входе и «холодном» выходе была в 1,5–2 раза меньше, чем для трубы с круглым поперечным сечением, при разных входных давлениях и долях холодного расхода. В настоящей работе будет проведено сравнение температуры на уровне внутренней стенки для труб квадратного и круглого поперечных сечений в широком диапазоне долей холодного расхода.

Экспериментальная установка и измерения

Установка состоит из рабочего участка, включающего завихритель, рабочий канал и промежуточную емкость со стороны выхода горячего воздуха (рис. 1). Выход нагретого периферийного воздуха далее будем называть «горячим», а выход охлажденного воздуха в центре канала — «холодным».

Внутренний диаметр завихрителя составляет 70 мм. Сжатый воздух попадает в вихревую камеру завихрителя через две тангенциальные щели и через профилированную диафрагму входит в рабочий канал, сильно охлаждаясь при адиабатическом расширении. Проходя вдоль стенки рабочего канала к периферийному выходу, воздух нагревается до температуры, большей, чем входная. В приосевом обратном токе воздух остается

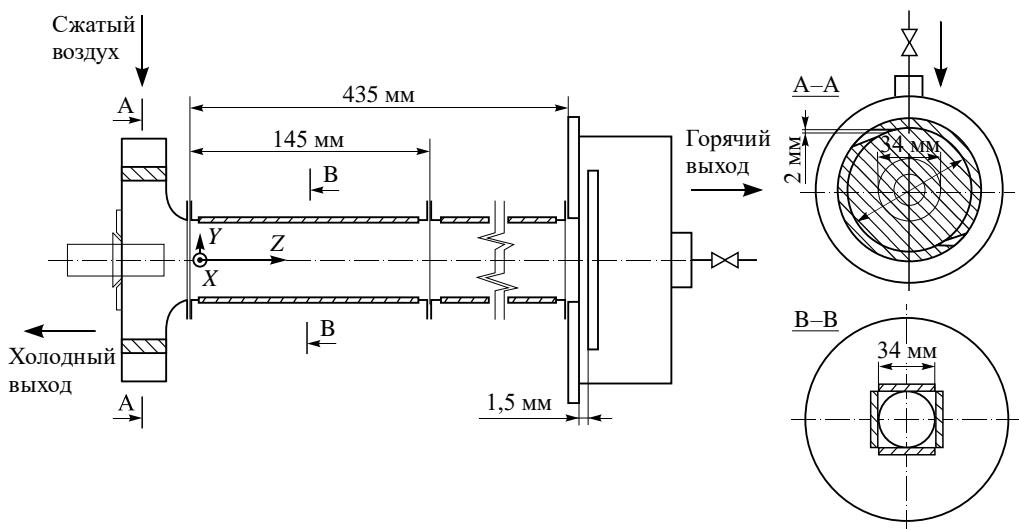


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

холоднее входного. Горячий воздух выходит через радиальный диффузор с зазором 1,5 мм. Охлажденный воздух проходит через диафрагму, в которую вставлена трубка диаметром 16 мм. Через нее охлажденный воздух выходит из рабочего канала. Суммарная площадь тангенциальных щелей в завихрителе 80 мм².

Было использовано два рабочих канала: круглого и квадратного сечений. Канал круглого сечения представлял трубу длиной 450 мм и диаметром 34 мм (рис. 2). Канал был сделан из дюралюминия со стенкой толщиной 2 мм.

Канал квадратного сечения составлен из четырех секций суммарной длиной 420 мм со стороной квадрата 34 мм (рис. 3). Материал канала — дюралюминий толщиной 5 мм по двум противоположным сторонам и 10 мм по двум другим.

Через каждые 20 мм в каждом канале устанавливался бусинковый остеклованный полупроводниковый термистор СТ5-16. Размер термистора составлял 0,2 мм, диаметр остекления — 1 мм. Термисторы были откалиброваны на воде по термометру с ценой деления 0,2 °C в диапазоне температур от 0 до 70 °C (рис. 4). Каждый термистор располагался вровень со стенкой (рис. 5). Бусинковый термистор был остеклован и находился

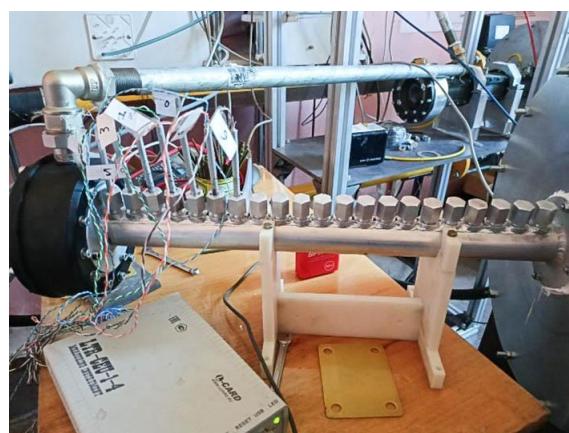


Рис. 2. Рабочий канал с круглым поперечным сечением.



Рис. 3. Рабочий канал с квадратным поперечным сечением.

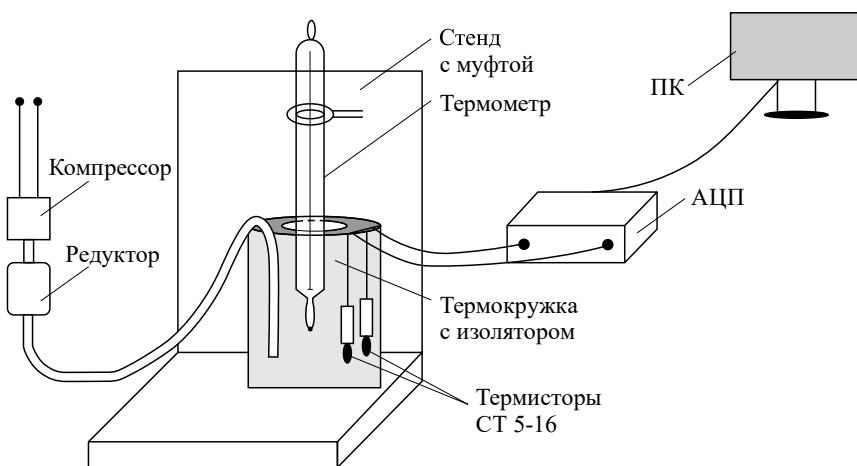


Рис. 4. Схема калибровки термометров сопротивления.

в толще стекла, вынесенного от стенки. Остеклованный кончик термистора при этом выступал не более чем на 0,3 мм в поток. Теплопроводность стекла была достаточно мала ($0,7 - 1,3 \text{ Вт}/(\text{М}\cdot\text{К})$) по сравнению с температурой дюралевой стенки ($134 \text{ Вт}/(\text{М}\cdot\text{К})$), поэтому потоком тепла от стенки к датчику можно было пренебречь и считать, что датчик температуры измеряет температуру воздуха у стенки. Скорость воздуха у стенки была близка к нулевой, и учитывать влияние скорости потока на результат измерения температуры не было необходимости.

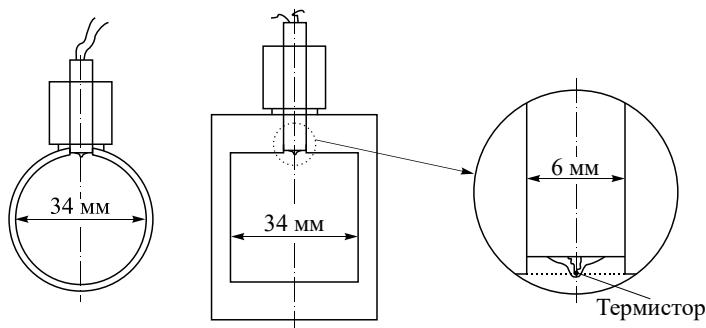


Рис. 5. Расположение термистора в вихревой трубе.

Для сбора данных с термометров сопротивления использовался многоканальный АЦП LCARD LTR114. Количество каналов — 8. Он позволял измерять показания датчиков сопротивления одновременно. Переключение каналов проводилось мультиплексированием с частотой опроса 4 кГц.

Соотношение расходов регулировалось с помощью крана на горячем выходе. Для контроля расходов использовались ультразвуковые расходомеры фирмы «Ирвис» «PC4-Ультра» на обоих выходах. Температура перед входом в завихритель и после выходов измерялась при помощи датчиков DS1820. Избыточное давление сжатого воздуха, поступающего в рабочий канал, измерялось манометром.

Экспериментальные результаты

Эволюция температуры на уровне стенки вдоль трубы с круглым поперечным сечением для избыточного давления 4 и 5 бар представлена на рис. 6. Значение $Z = 0$ соответствует границе завихрителя и рабочего канала. Параметром служит доля расхода в холодный выход $\mu = 0,1 - 0,9$.

В промежутке до 20–30 мм от входа в трубу температура у стенки меньше, чем исходная температура сжатого воздуха. И чем меньше значение доли холодного расхода, тем длиннее этот промежуток. Это происходит из-за преобладания адиабатического охлаждения воздуха над процессами нагрева периферийного потока при небольшом удалении от завихрителя.

Результаты аналогичных измерений для квадратного канала приведены на рис. 7.

Видно, что максимальный нагрев у стенки трубы относительно исходного сжатого воздуха для трубы квадратного сечения примерно в 4 раза ниже, чем для круглой трубы. Следует отметить, что графики для доли холодного расхода в диапазоне от 0,4 до 0,9 близки в последней трети трубы, чего не наблюдалось для круглой трубы.

Обсуждение результатов

Различие графиков для двух давлений на рис. 6 незначительное, так как в вихревой трубе происходит дозвуковое запирание по объемному расходу. Как было показано в работах [21, 24], в трубе Ранка круглого поперечного сечения запирание происходит при показателе избыточного давления на входе 5 бар.

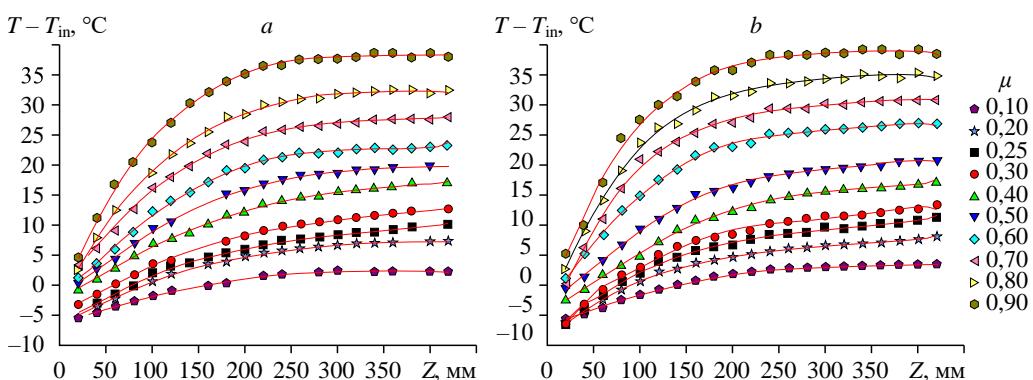


Рис. 6. Температура воздуха у стенки круглой трубы.

Избыточное давление $P = 4$ (a) и 5 (b) бар.

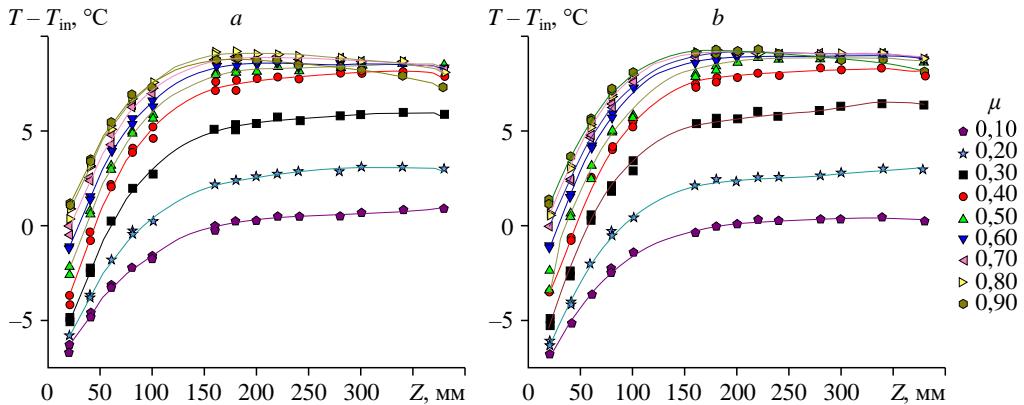


Рис. 7. Температура на уровне внутренней стенки квадратной трубы.
Избыточное давление $P = 4$ (a) и 5 (b) бар.

Графики температуры для трубы квадратного сечения на рис. 7 совпадают, так как для этой трубы запирание объемного расхода происходит раньше, при избыточном давлении на входе 4 бар.

Анализ приведенных на рис. 6 и 7 результатов показывает, что для обеих труб при кусочно-линейной аппроксимации можно выделить три характерные зоны роста температуры с практически постоянным градиентом: зона быстрого роста; зона умеренного роста; слабое изменение (плато).

На рис. 8 продемонстрированы характерные зоны обеих труб при $\mu = 0,1; 0,3; 0,6; 0,8$ и избыточном давлении $P = 5$ бар. Для трубы с круглым поперечным сечением границы зон располагаются на расстояниях 116 и 240 мм от завихрителя. Для трубы с квадратным поперечным сечением границы зон располагаются на расстояниях 80 и 160 мм от завихрителя.

Расположение характерных зон не зависит от значения доли холодного расхода в обеих трубах. Механизмы, ответственные за рост температуры периферийного потока, не работают в зоне плато. Две зоны роста температуры в круглой трубе занимают чуть больше половины ее длины. В квадратной трубе область нагревания составляет чуть больше трети ее длины. Тем не менее можно признать, что структуры температурных полей в разных трубах аналогичны. Это свидетельствует в пользу того, что механизмы нагревания в трубах одинаковы.

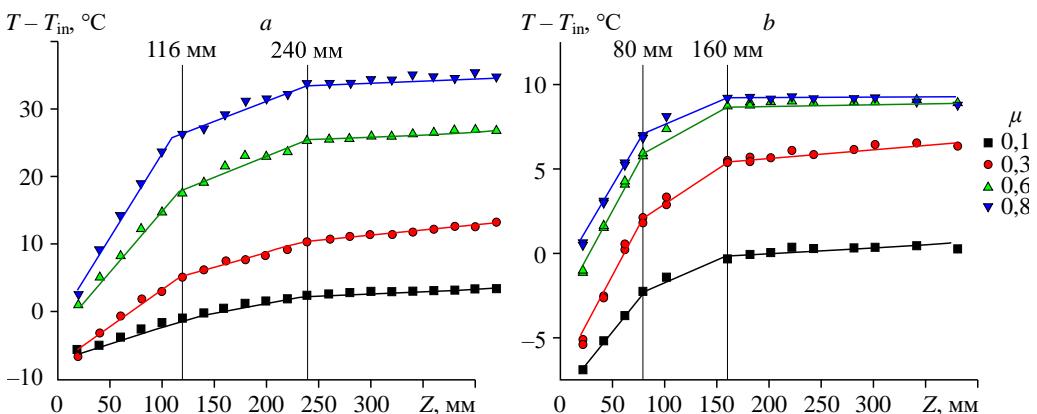


Рис. 8. Характерные зоны роста температуры воздуха на уровне внутренней стенки
для труб круглого (a) и квадратного (b) поперечных сечений.

a — $P = 5$ бар; $Z_1 = 0 - 116$ мм, $Z_2 = 116 - 240$ мм, $Z_3 = 240 - 450$ мм,
b — $P = 5$ бар, $Z_1 = 0 - 80$ мм, $Z_2 = 80 - 160$ мм, $Z_3 = 160 - 450$ мм.

Список литературы

1. Правдина М.Х., Кабардин И.К., Полякова В.И., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Павлов В.А., Гордиенко М.Р., Яворский Н.И. Гидравлическая неустойчивость потока в трубе Ранка // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 3. С. 82–89.
2. Pravdina M.Kh., Kabardin I.K., Polyakova V.I., Gordienko M.R., Yavorsky N.I. The flow crisis and an inner source of heating in the vortex tube // IOP J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1677, No. 1. P. 012027-1–012027-6.
3. Ranque G.J. Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air // Le Journal de Phys. Le Radium. 1933. Vol. 115, No. 4. P. 112–114.
4. Hilsch R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process // Rev. Sci. Instruments. 1947. Vol. 18, No. 2. P. 108–113.
5. Harnett J.P., Eckert E.R.G. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a High-velocity vortex-type flow // Trans. ASME. 1957. Vol. 79, No. 4. P. 751–758.
6. Stephan K., Lin S., Durst M., Huang F., Seher D. An investigation of energy separation in a vortex tube // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1983. Vol. 25, No. 3. P. 341–348.
7. Пиралишвили Ш.А., Поляков В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект, эксперимент, теория, технические решения. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
8. Gao C.M., Bosschaart K.J., Zeegers J.C.H., de Waele A.T.A.M. Experimental study on a simple Ranque–Hilsch vortex tube // Cryogenics. 2005. Vol. 45, iss. 3. P. 173–183.
9. Chang-Soo Kim, Chang-Hyun Sohn. Dynamik characteristics of an unsteady flow through a vortex tube // J. Mech. Sci. Technol. (KSME Intern. J.). 2006. Vol. 20, No. 12. P. 2209–2217.
10. Xue Yu., Arjomandi M., Kelso R. Experimental study of the thermal separation in a vortex tube // Experim. Therm. Fluid Sci. 2013. Vol. 46. P. 175–182.
11. Li N., Zeng Z.Y., Wang Z., Han X.H., Chen G.M. Experimental study of the energy separation in a vortex tube // Int. J. Refrigeration. 2015. Vol. 55. P. 93–101.
12. Kabardin I.K., Meledin V.G., Yavorsky N.I., Pavlov V.A., Pravdina M.H., Kulikov D.V., Rakhmanov V.V. Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square cross-section // Int. Conf. on the Methods of Aero Phys. Res. (ICMAR 2016). AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. P. 030003-1–030003-9.
13. Ahlborn B., Groves S. Secondary flow in a vortex tube // Fluid Dyn. Res. 1997. Vol. 21, No. 2. P. 73–86.
14. Ахметов Д.Г., Ахметов Т.Д., Павлов В.А. Структура потока в вихревой трубе Ранка–Хилша // Докл. РАН. 2018. Т. 480, № 4. С. 422–425.
15. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D. Flow structure and mechanism of heat transfer in a Ranque–Hilsch vortex tube // Experim. Therm. Fluid Sci. 2020. Vol. 113. P. 110024-1–110024-9.
16. Bendjamin T.B., Barnard B.J.S. A study of the motion of a cavity of a rotating liquid // J. Fluid Mech. 1964. Vol. 19. P. 193–209.
17. Вукович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Машиностроение, 1968. 496 с.
18. Новиков И.И., Скobelkin В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке (эффект максимального расхода закрученного потока жидкости) // Открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990 г. по заявке № ОТ-11080 от 27.02.1985. С. 1–10.
19. Кабардин И.К. Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша методом ЛДА // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 5. С. 709–717.
20. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 23. С. 84–90.
21. Kabardin I.K., Pravdina M.Kh., Polyakova V.I., Yavorsky N.I., Pavlov V.A., Gordienko M.R. The subsonic velocity blocking effect for an aerodynamic vortex chamber // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1105, iss. 1. P. 012006-1–012006-6.
22. Yavorsky N.I., Meledin V.G., Kabardin I.K., Gordienko M.R., Pravdina M.Kh., Kulikov D.V., Polyakova V.I., Pavlov V.A. Velocity field diagnostics inside the Ranque–Hilsh vortex tube with square cross section // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2027, iss. 1. P. 030122-1–030122-6.
23. Kabardin I.K., Meledin V.G., Yavorsky N.I., Pavlov V.A., Pravdina M.Kh., Kulikov D.V., Polyakova V.I. Comparing Ranque tubes of circular and square cross section // MATEC Web. Conf. 2017. Vol. 115. P. 02022-1–02022-4.
24. Кабардин И.К., Яворский Н.И., Меледин В.Г., Правдина М.Х., Гордиенко М.Р. Сравнительный анализ режимов в трубах Ранка с круглым и квадратным сечением рабочего канала // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 1. С. 43–52.

*Статья поступила в редакцию 11 апреля 2023 г.,
после доработки — 18 июня 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*