

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 общепризнанного 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 тороидальный 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

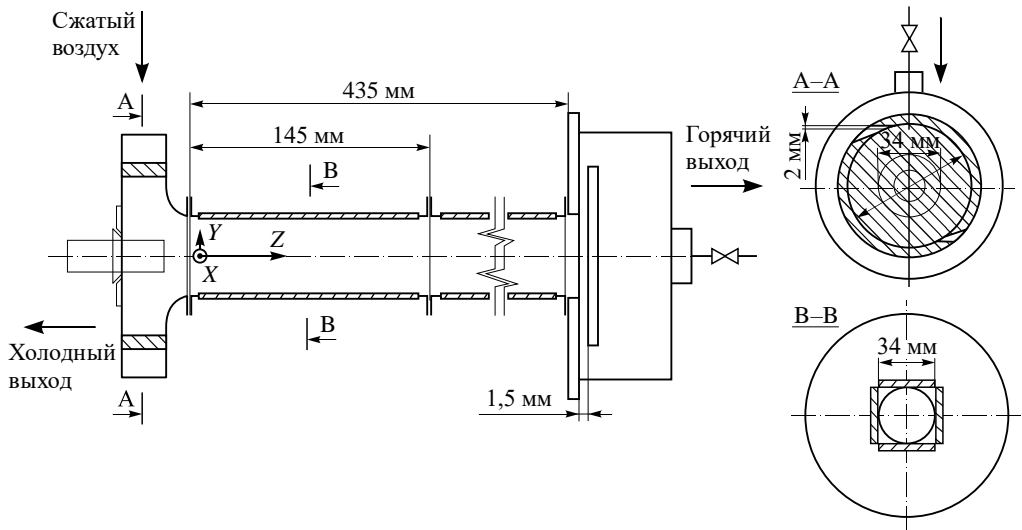


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

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 мм^2 .

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 бусиновый 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 $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 0 до $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4). Каждый термистор располагался вровень со стенкой (рис. 5). Бусиновый термистор был остеклован и находился

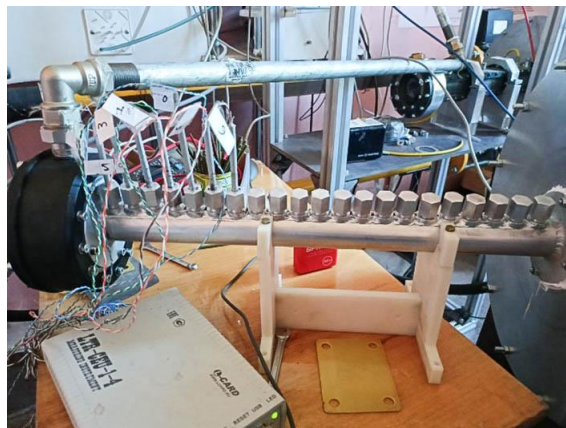


Рис. 2. Рабочий канал с круглым поперечным сечением.



Рис. 3. Рабочий канал с квадратным поперечным сечением.

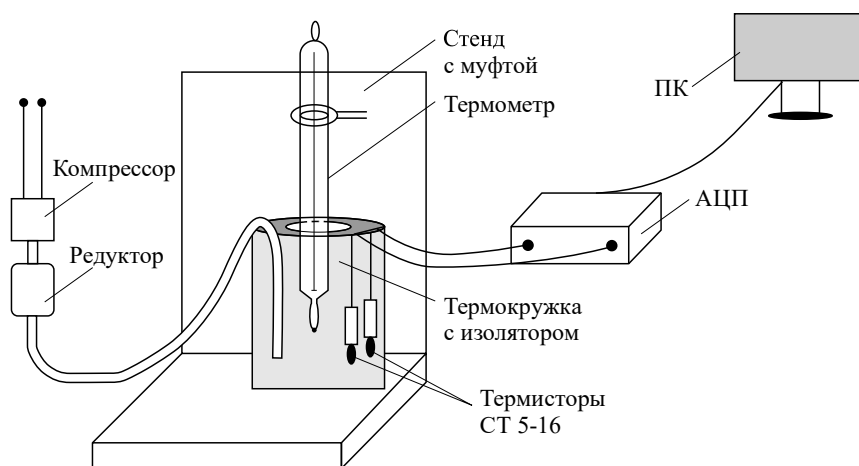


Рис. 4. Схема калибровки термометров сопротивления.

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 ($0,7 - 1,3 \text{ Вт/(М·К)}$) по сравнению с температурой дюралевой стенки (134 Вт/(М·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.

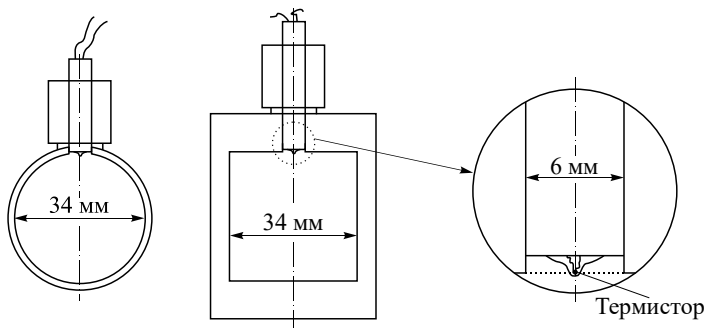


Рис. 5. Расположение термистора в вихревой трубе.

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» «РС4-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.

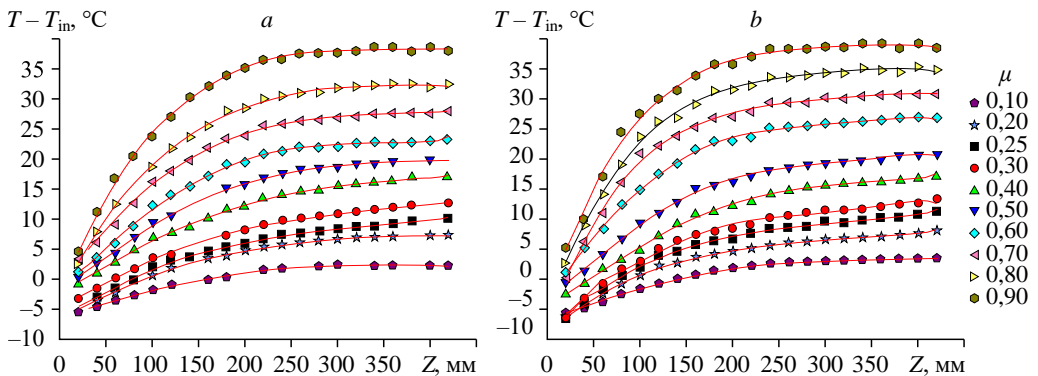


Рис. 6. Температура воздуха у стенки круглой трубы.
Избыточное давление $P = 4$ (a) и 5 (b) бар.

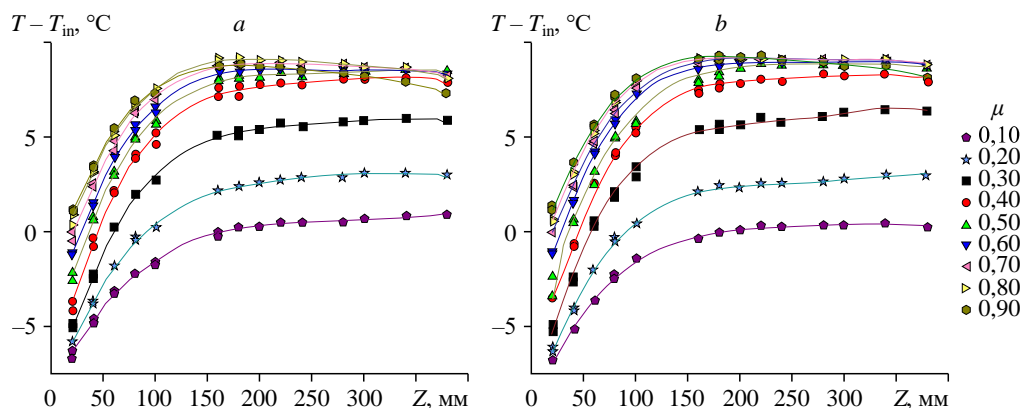


Рис. 7. Температура на уровне внутренней стенки квадратной трубы.
Избыточное давление $P = 4$ (а) и 5 (б) бар.

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.

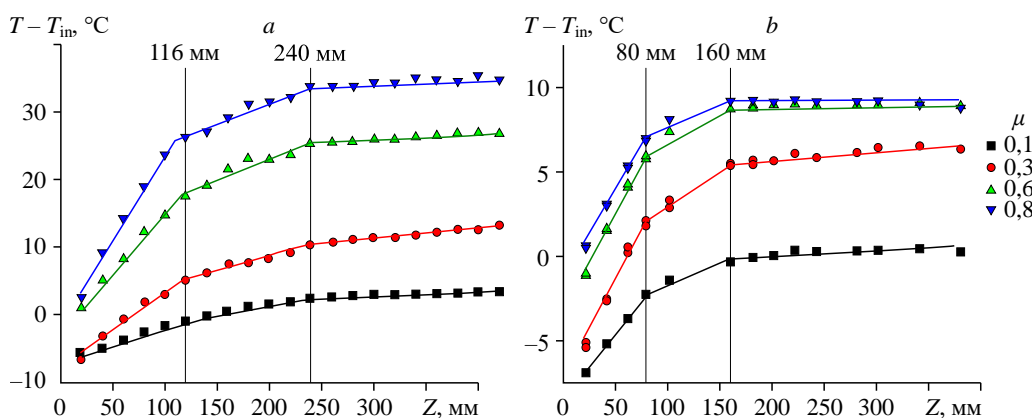


Рис. 8. Характерные зоны роста температуры воздуха на уровне внутренней стенки для труб круглого (а) и квадратного (б) поперечных сечений.
а — $P = 5$ бар; $Z_1 = 0 - 116$ мм, $Z_2 = 116 - 240$ мм, $Z_3 = 240 - 450$ мм,
б — $P = 5$ бар, $Z_1 = 0 - 80$ мм, $Z_2 = 80 - 160$ мм, $Z_3 = 80 - 160$ мм.

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 F., 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., Поляев 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. Bendjamine 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. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Машиностроение, 1968. 496 с.
18. Новиков И.И., Скобелкин 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., Дубинцев 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.*