

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 10. С. 439–447
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 10, pp. 439–447

Научная статья
УДК 533.697

Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубе

Ш.А. Пиралишвили¹, С.В. Веретенников¹✉, В.А. Тряпина¹

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
Рыбинск, Россия

✉ serveret@yandex.ru

Аннотация. Противоточные закрученные течения широко применяются для интенсификации процессов тепло- и массообмена, а также сжигания различных видов топлива. Реализация температурной стратификации (эффекта энергоразделения) в таких потоках позволяет дополнительно повысить эффективность вихревых устройств. В настоящее время отсутствует общепризнанная физико-математическая модель, описывающая явления, протекающие в вихревой трубе. Во многом это обусловлено сложностью структуры противоточного закрученного течения газа в камере энергоразделения, понимание которой может существенно помочь в развитии теории вихревого эффекта. В статье рассмотрены особенности течения в противоточной вихревой трубе, выявленные в результате визуализации движения воздуха и воды при варьировании режимных параметров. Вихревые спиралевидные структуры образуются в зоне смешения приосевого и периферийного потоков и могут пульсировать за счет гироскопического механизма.

Ключевые слова: закрученный поток, вихревой эффект, энергоразделение, вихревая труба Ранка – Хилша

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-20220).

Для цитирования. Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В., Тряпина В.А. Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубе // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 10. С. 439–447. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177588>

Original article

Flow structure visualization in the reverse-flow vortex tube

Sh.A. Piralishvili¹, S.V. Veretennikov¹✉, V.A. Tryapina¹

¹Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia

✉ serveret@yandex.ru

Abstract. The reverse-flow swirling currents are widely applied to intensify the processes of heat and mass transfer, as well as for the various types of fuel combustion. The temperature stratification realization, i.e. energy separation effect, in such flows allows further efficiency increasing of vortex devices. As of today, there is no generally accepted physico-mathematical model, describing phenomena occurring in the vortex tube. It is stipulated mainly by complexity of the reverse-flow gas flowing structure in the energy separation chamber,

which apprehension may be of significant help for the vortex effect theory development. The article considered flow specifics in the reverse-flow vortex tube revealed as the result of air and water flow visualization while varying operating conditions. The vortex helical structures are being formed in the zone of near-axis and peripheral flows and can pulsate for the account of the gyroscopic mechanism.

Keywords: swirling flow, vortex effect, energy separation, Ranque-Hilsch vortex tube

Funding. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-20220).

For citation. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V., Tryapina V.A. Flow structure visualization in the reverse-flow vortex tube. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 10, pp. 439–447. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177588>

Введение

Эффект Ранка – Хилша представляет интерес для ученых с точки зрения интенсификации теплофизических процессов и применения в устройствах сжигания газов, осушки, охлаждения и термостатирования, сепарации, контактного теплообмена и сжигания топлива [1–6]. Несмотря на активное изучение вихревого эффекта, важным является вопрос разработки надежной теоретической модели этого явления для более широкого внедрения в технику [1, 7, 8].

Вихревой эффект, или эффект Ранка – Хилша, реализуется в простом устройстве – вихревой трубе (рис. 1) и проявляется в интенсивно закрученном потоке газа. Газ, подаваемый тангенциально через профилированное сопло, формирует в задиафрагмированном цилиндрическом канале закрученный поток, в котором происходит разделение рабочего тела по давлению и температуре. При этом в цилиндрической части формируется противоточное закрученное течение [1, 9, 10]: от соплового сечения по периферии движется квазипотенциальный вихрь, имеющий энтальпию выше, чем у потока на входе, а в приосевой зоне возникает вынужденный вихрь, движущийся в противоположном направлении с энтальпией ниже, чем у исходного потока. Поскольку отсутствует общепризнанная физико-математическая модель вихревого эффекта теоретическое описание явления энергоразделения в закрученном потоке в настоящее время строится на основе предложенных разными исследователями гипотез. Если следовать классификации Ш.А. Пиралишвили [1], то все аналитические разработки, объясняющие энергоразделение в вихревой трубе, можно разбить на четыре характерные группы: центробежные гипотезы [11], гипотезы, использующие «Демон Максвелла» [1, 12], гипотеза ра-

диальных потоков Хилша – Фултона [1, 13], гипотеза взаимодействия вихрей [1, 2]. Одной из основных проблем обоснования известных физико-математических моделей является недостаточно изученная структура потока в камере энергоразделения вихревой трубы [9, 14, 15].

Большинство исследований эффекта Ранка – Хилша направлены на повышение эффективности энергоразделения, поиск оптимальной геометрической формы вихревых труб и их применение для решения различных прикладных задач [1, 2, 7, 8]. В то же время для объяснения разделения энергии в вихревой трубе требуется анализ распределения скоростей и описание структуры течения в камере энергоразделения. Визуализация потока внутри трубы может быть осуществлена несколькими способами: с использованием красителей, воды, дыма, пластиковых частиц, пузырьков воздуха или водорода, масла. Обычно в таких экспериментах число Рейнольдса колеблется от 10^4 до 10^5 , это означает, что они проводятся при турбулентном режиме.

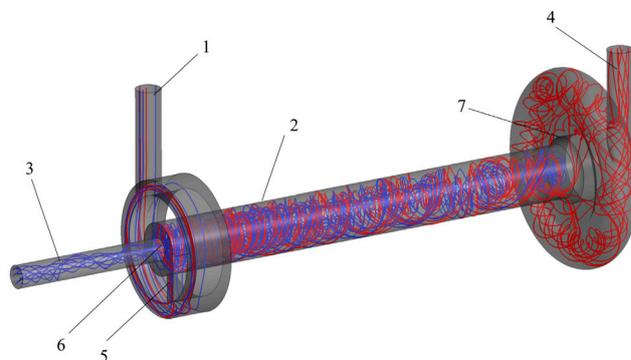


Рис. 1. Схема противоточной вихревой трубы: 1 – входной патрубок; 2 – камера энергоразделения; 3 – выход охлажденного потока; 4 – выход подогретого потока; 5 – сопло закручивающего устройства; 6 – диафрагма; 7 – регулируемый радиальный щелевой диффузор

Впервые эксперимент по визуализации выполнен в 1950 году посредством введения красителя в вихревую трубку, работающую на воде [9]. Авторы исследования [16] смогли впервые наблюдать наличие сильного вихря вблизи оси вихревой трубы. В работе [17] визуализация течения в оптически прозрачной вихревой трубе дымом показала четкий спиральный след в периферийном вихре. Скоростная видеосъемка в исследовании [18] позволила установить, что поток в вихревой трубе с квадратным сечением прецессирует вблизи оси. В работе [19] метод отслеживания пластиковых частиц-трассеров обеспечил более точные результаты, позволившие оценить скорость потока, чем при впрыскивании красителя и масла, потому что они сильно смешивались и приводили к сильной замутненности потока из-за высокой турбулентности.

Несмотря на широкое применение закрученных течений, до сих пор нет подробных исследований, в которых бы проводилась четкая связь между структурой течения в вихревой трубе и эффектом энергоразделения. Большинство бесконтактных исследований течений в вихревой трубе проводятся на несжимаемых средах, в частности на воде. При этом эффект энергоразделения более ярко проявляется на сжимаемых средах (газах), но такие исследования на данный момент практически отсутствуют. Численные расчеты, проводимые в целях исследования структуры течения, показывают зачастую противоречивые результаты, при этом разные модели турбулентности дают разные эффекты энергоразделения. В связи с этим результаты численных расчетов нуждаются в верификации на основе надежных экспериментальных данных, и не только по интегральным параметрам, таким как эффект подогрева, но и по внутренней структуре потока, которая в свою очередь определяет все характеристики вихревой трубы.

Экспериментальные модели и режимы проведения испытаний

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и изготовлена модель противоточной вихревой трубы (рис. 2). Модель имеет следующие геометрические размеры: диаметр камеры энергоразделения $d = 21$ мм; относительный радиус диафрагмы

для выхода охлажденного потока $r_d/r = 0,5$; относительная длина камеры энергоразделения $l/d = 9$, относительная площадь соплового ввода закручивающего устройства $F_c/F_{mp} = 0,1$. На «горячем» конце камеры энергоразделения установлен радиально-щелевой диффузор. Закручивающее устройство выполнено тангенциальным с сопловым вводом прямоугольного сечения и соотношением сторон 2:1. Для сборки указанной конструкции вихревой трубы использовался специальный корпус, изготавливаемый способом 3D-печати из пластика PLA. Для обеспечения оптического доступа камера энергоразделения 1 и патрубков охлажденного потока 11 выполнены из кварцевого стекла.

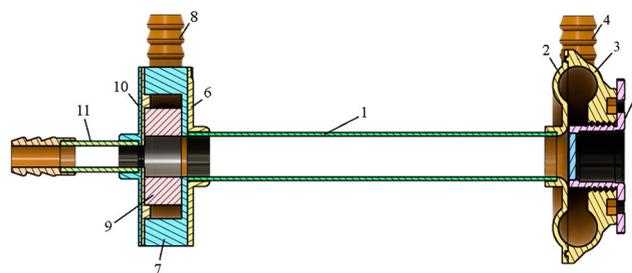


Рис. 2. Экспериментальная модель противоточной вихревой трубы: 1 – камера энергоразделения; 2 – радиальный диффузор; 3 – улитка; 4 – выходной штуцер горячего потока; 5 – регулятор щели радиального диффузора; 6 – фланец; 7 – входная камера; 8 – входной патрубок; 9 – однозаходное закручивающее устройство; 10 – диафрагма; 11 – патрубок охлажденного потока

В рамках исследований проведены две серии визуализации внутренней структуры течения. На первом этапе в качестве рабочего тела использовался воздух, что позволило не только выполнить визуализацию, но определить эффекты энергоразделения на исследованных режимах. При разработке модели была предусмотрена возможность подачи подкрашенной жидкости и трассеров через тонкую иглу в тангенциальный сопловой ввод закручивающего устройства (9) (рис. 2). Это позволило получить дополнительную информацию о динамике вихревых структур и провести сравнение результатов с предварительно выполненным численным моделированием. Визуализация структуры течения проводилась с помощью скоростной видеокамеры Evercam F 4000-8-C с возможностью записи видео с частотой 8000 кадров в секунду.

Экспериментальный стенд первого этапа для изучения структуры течения в разработанной вихревой трубе приведен на рис. 3. Воздух на

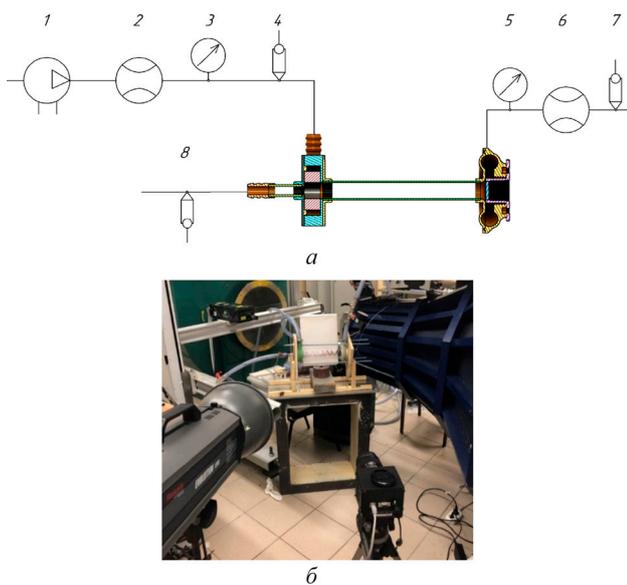


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) экспериментального стенда для работы на воздухе: 1 – компрессор; 2 – расходомер Bronkhorst MassFlow MV-306; 3 – датчик давления АИР10; 4 – датчик температуры на входе в ВТ (ТСП-50П); 5 – датчик давления АИР10; 6 – расходомер Bronkhorst MassFlow MV-308; 7 – датчик температуры подогретого потока (ТСП-50П); 8 – датчик температуры охлажденного потока (ТСП-50П); 9 – вихревая труба

вход в вихревую трубу подавался из ресивера поршневого компрессора (1) через измерительный участок, где измерялся расход (2), полное давление (3) и температура (4). На выходе подогретого потока устанавливался измерительный участок с измерением расхода (6), полного давления (5) и температуры (7). Охлажденный поток, выходя из диафрагмы вихревой трубы через патрубок охлажденного потока с установленным датчиком температуры (8), сбрасывался в атмосферу. В качестве измерительных средств использовались термоанемометрические расходомеры Bronkhorst MassFlow MV-308, термопреобразователи сопротивления (ТСП-50П), датчики давления (АИР10).

В рамках второго этапа выполнена визуализация с использованием воды в качестве рабочего тела вихревой трубы. Использование воды обусловлено невозможностью проведения качественной визуализации приосевого течения и границы разделения вихрей (вынужденного и свободного) на воздухе вслед-

ствие смещения используемых частиц-трассеров в поле центробежных сил к стенкам камеры энергоразделения. Для экспериментов использовалась модель вихревой трубы из первого этапа, адаптированная под подачу смеси воды с красителем через тонкую иглу для лучшей визуализации потока.

Экспериментальная установка второго этапа (рис. 4) оснащена подводящими и отводящими трубопроводами (3, 4, 5) с внутренним диаметром 36 мм, регулирующими задвижками и центробежным насосом 2 с частотно-регулируемым приводом. Работа установки осуществляется следующим образом. Из емкости с водой 1, стоящей на платформе на высоте в 1 м, с помощью центробежного насоса (2) всасывается вода. Далее по магистрали (3) рабочее тело через измерительные участки, оснащенные датчиками давления (7) и температуры (8), направляется на вход вихревой трубы (6). Для получения физических параметров на каждом отводящем трубопроводе (4, 5) установлены электромагнитный расходомер (12, 13), а также датчики давления (7, 9) и температуры (8, 10). Краны и регулируемый радиальный диффузор необходимы для регулирования расхода воды в разных частях установки. Из периферийного и приосевого выходов по трубопроводам (4 и 5) вода поступает обратно в резервуар (1), объем которого составляет 1 м³, поэтому систему можно назвать закрытой. Фиксация визуализации структуры течения проводилась с помощью скоростной видеокамеры Evercam с частотой от 2500 до 7000 кадров в секунду.

Эксперименты по визуализации структуры течения в вихревой трубе как с использованием

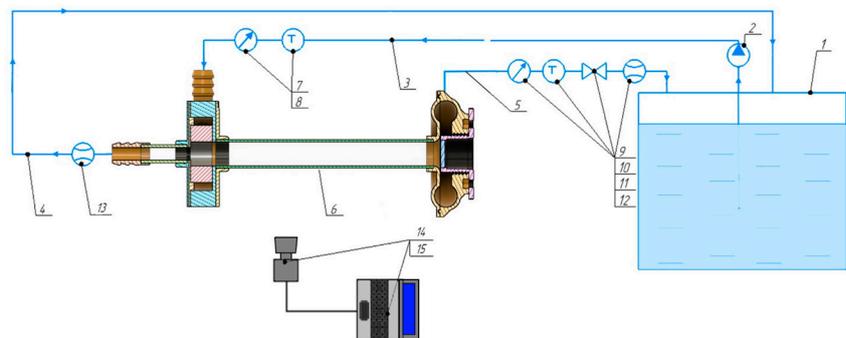


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для работы на воде: 1 – резервуар с водой; 2 – центробежный насос; 3 – подводящий трубопровод; 4 – трубопровод отвода «охлажденного» потока; 5 – трубопровод отвода «подогретого» потока; 6 – противочная вихревая труба; 7, 9 – датчик давления АИР10; 8, 10 – датчик температуры (ТСП-50П); 11 – регулировочный вентиль; 12, 13 – расходомеры ЭРСВ – 540Л ВР; 14 – высокоскоростная камера EVERCAM 4000-8-С; 15 – ноутбук

воздуха, так и воды в качестве рабочего тела преследовали две основные задачи: определение основных характеристик вихревых структур, формирующихся в камере энергоразделения, и выявление особенностей взаимодействия периферийного и приосевого потоков. Определение геометрических и динамических параметров вихревых структур особенно актуально для валидации используемых подходов к компьютерному моделированию эффекта Ранка – Хилша, особенно в части моделирования турбулентности.

Для обработки и анализа экспериментальных результатов использовались степень расширения в вихревой трубе и число Рейнольдса в камере энергоразделения. Они рассчитывались по следующим зависимостям

$$\pi_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{вх}}^*}{P_{\text{атм}}}, \quad (1)$$

$$\text{Re}_{\text{ж},d} = \frac{4G_{\text{вх}}}{\pi d \mu_{\text{ж}}}. \quad (2)$$

На эффективность работы вихревой трубы основное влияние оказывает относительная доля охлажденного потока μ , определяемая по следующей зависимости:

$$\mu = \frac{G_x}{G_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где G_x – расход воздуха на «холодном» выходе, $G_{\text{вх}}$ – расход воздуха на входе.

Температурная эффективность вихревой трубы при работе на воздухе оценивалась абсолютными эффектами охлаждения и подогрева, определяемыми по формулам:

$$\Delta T_x^* = T_x^* - T_{\text{вх}}^*, \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{г}}^* = T_{\text{г}}^* - T_{\text{вх}}^*. \quad (5)$$

Все эксперименты проводились на откалиброванном и поверенном метрологическом оборудовании. Неопределенность измерения температуры воздуха и воды не превышала $\pm 2\%$. Соответствующие неопределенности измерения давления и массового расхода составляли $\pm 0,25\%$ и $\pm 2\%$.

Результаты визуализации течения в вихревой трубе при работе на воздухе

В рамках первого этапа исследований выполнены измерения эффектов энергоразделения на тех же режимах, при которых выполнялась визуализация течения. Эксперименты выполне-

ны для степени расширения газа в вихревой трубе $\pi = 1,33$ и $\pi = 1,5$. Сравнительно низкие параметры потока в эксперименте по сравнению с классическими режимами работы трубы Ранка-Хилша [1] обусловлены ограничениями, связанными с особенностями подачи подкрашенной воды для проведения визуализации течения.

На рис. 5 представлены зависимости эффектов подогрева и охлаждения потока от относительной доли охлажденного потока μ при различных значениях степени расширения π . Разница температур на холодном и горячем выходах увеличивается с возрастанием степени расширения газа, что характерно для классических моделей вихревых труб. Невысокие эффекты энергоразделения связаны с низким давлением воздуха на входе. Наибольшие эффекты подогрева наблюдаются на режиме $\pi = 1,5$ при $\mu = 0,9$, а эффекты охлаждения – на режиме $\pi = 1,5$ при $\mu = 0,7$, что также хорошо согласуется с известными результатами [1, 2].

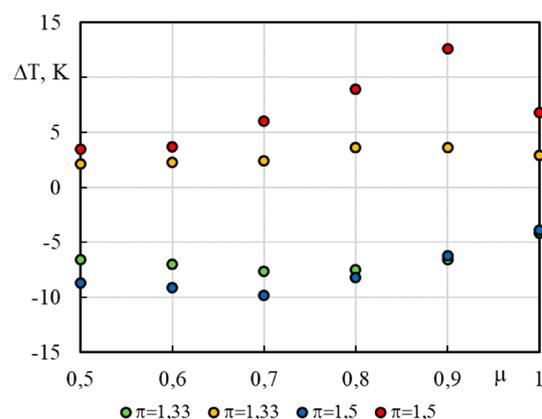


Рис. 5. Эффекты энергоразделения

На рис. 6–9 показана визуализация траектории движения подкрашенной жидкости, подаваемой через иглу в закручивающее устройство, вдоль поверхности камеры энергоразделения при $\pi = 1,5$ и различных относительных долях охлажденного потока.

На режиме $\mu = 0$ (рис. 6 и 7) видно формирование двойной спиральной структуры. В начале камеры энергоразделения (на расстоянии $l/d < 3$) спиральные вихри находятся в противофазе, но по мере продвижения к центру трубы они начинают сливаться в одну структуру. При этом изменяется и шаг спирали, а следовательно, и степень закрутки. Увеличение доли охлажденного потока до $\mu = 0,7$ приводит к уменьшению шага спиральной линии (рис. 8). При

относительной доле охлажденного потока $\mu = 1$ (рис. 9) формируется развитое противоточное течение. Шаг периферийного вихря сильно меняется по длине трубы. Наблюдаемое резкое изменение траектории на стенке вихревой трубы может указывать на существование зоны перестройки периферийного вихря в приосевой, а также на возможное образование крупномасштабных вихревых структур.

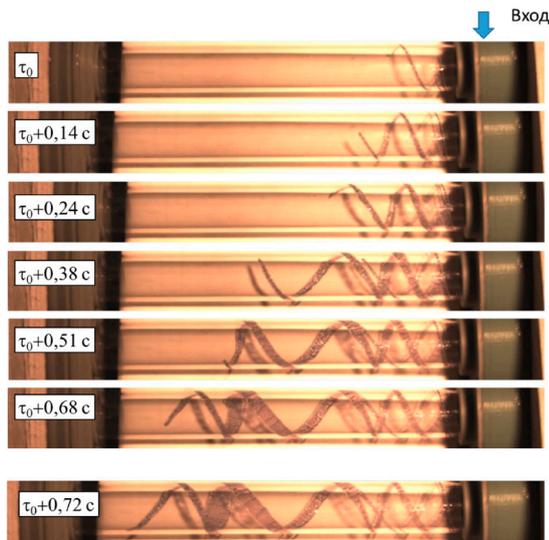


Рис. 6. Временная визуализация структуры течения при $\pi = 1,5$ и $\mu = 0$

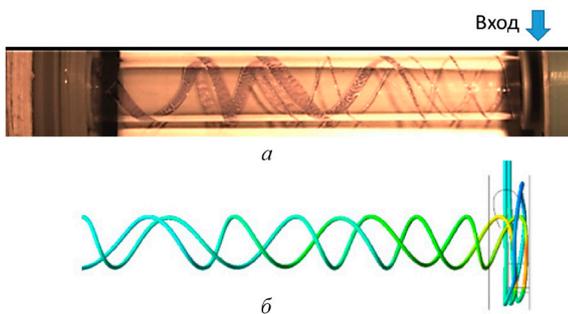


Рис. 7. Визуализация течения в противоточной вихревой трубе при $\pi = 1,5$ и $\mu = 0$: *a* – эксперимент, *б* – численное моделирование (RANS SST)

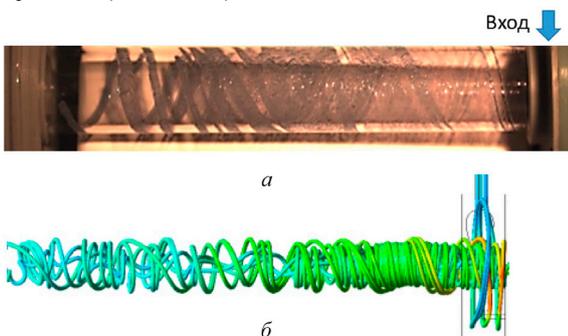


Рис. 8. Визуализация течения в противоточной вихревой трубе при $\pi = 1,5$ и $\mu = 0,7$: *a* – эксперимент; *б* – численное моделирование (RANS SST)

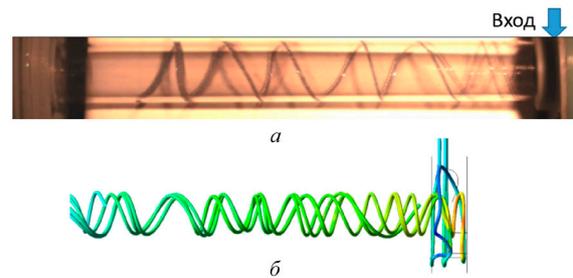


Рис. 9. Визуализация течения в противоточной вихревой трубе при $\pi = 1,5$ и $\mu = 1$: *a* – эксперимент; *б* – численное моделирование (RANS SST)

При существенных значениях доли охлажденного потока $\mu = 0,7 \dots 1,0$ взаимодействие спиральных вихрей и область их слияния при визуализации структуры течения наиболее отчетливы. Как отмечалось ранее, шаг винтовой линии сначала уменьшается, затем вновь увеличивается. В области, где наблюдается более плотное расположение крупномасштабных вихревых структур, можно отметить наиболее интенсивный радиальный перенос массы. В этой области формируется приосевой вихрь, наблюдается его значительное отклонение от оси, что подтверждает наличие прецессионных процессов.

Сопоставление полученных результатов с данными компьютерного моделирования газодинамики в рассматриваемой модели вихревой трубы позволяет сделать вывод об определенном совпадении структуры течения. Это касается как обнаруженных парных вихревых структур, так и их слияния на выходе из камеры энергоразделения. Также видно, что на наиболее эффективном режиме работы вихревой трубы с относительной долей охлажденного потока $\mu = 0,7$ струйка красителя размывается потоком воздуха в средней части камеры энергоразделения. Вероятно, это вызвано вихреобразованием и высокой турбулизацией потока в этой зоне, связанной с взаимодействием периферийного и приосевого противоточного течения, а также интенсивным радиальным переносом массы к оси вихревой трубы. Таким образом, взаимодействие вихрей играет существенную роль в механизме энергоразделения газа.

Следует отметить сложность получения четких результатов визуализации на воздухе при более высоких параметрах на входе из-за сильного вращательного движения и высокой интенсивности турбулентности. Использованный на первом этапе подход не позволяет выполнить визуализацию на границе раздела вихрей и в приосевой области.

Результаты визуализации течения в вихревой трубе при работе на воде

На втором этапе для более наглядной визуализации структуры течения в вихревой трубе использовались вода в качестве рабочего тела, мелкодисперсные пластиковые частицы и краситель, вводимые с помощью иглы. В ходе испытаний варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды μ , выходящей через диафрагму и со стороны радиального диффузора. Перед началом эксперимента из магистралей предварительно стравливается воздух для предотвращения скапливания в приосевой области пузырьков воздуха и нарушения режима работы.

Результаты визуализации структуры противоточного закрученного потока жидкости в вихревой трубе приведены на рис. 10, 11, 12. Несмотря на удаление воздуха из трубопроводов, при проведении экспериментов на некоторых режимах можно заметить образование воздушных полостей из-за выделения растворенных в воде газов в области разрежения на оси трубы.

При работе вихревой трубы в одностороннем режиме ($\mu = 1$) в приосевой области можно наблюдать формирование двух вихревых структур в виде спиралей, вращающихся в противофазе около оси трубы. На режиме при $\pi = 1,8$ и $\mu = 0,5$ наблюдается существенная нестационарность приосевого вихря, проявляющаяся в виде периодического возмущения пробегающего в виде волны по поверхности центрального жгута. Вследствие наложения этих периодических возмущений в центре камеры энергоразделения происходит возмущение и турбулизация потока, а также наблюдается характерное изменение шага спирального вихря.

На всех исследованных режимах прослеживается циркуляция вводимых частиц от периферии к центру, наблюдается совершаемое ими вращательное движение внутри периферийного спирального вихря. На режиме $\mu = 0,5$ отмеченная циркуляция частиц прослеживается только вблизи радиально-щелевого диффузора. Это говорит о том, что на этом режиме периферийный закрученный поток распространяется вдоль всей камеры энергоразделения, а приосевое течение формируется только вблизи выхода «горячего» потока.

На режиме $\mu = 1$ вблизи радиально-щелевого диффузора образуется застойная зона, в кото-

рой скорость циркуляции частиц в два-три раза медленнее, чем вблизи соплового ввода. Постепенно частицы с периферии смещаются в приосевую область и начинают двигаться в обратном направлении к диафрагме.

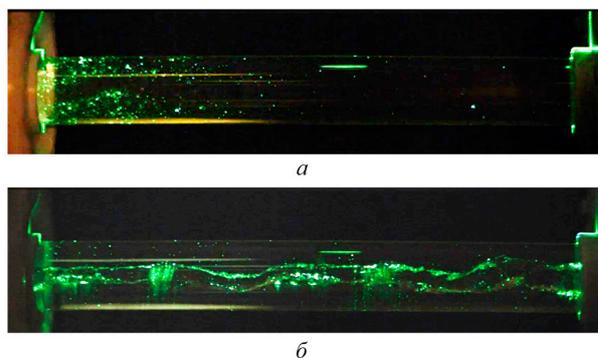


Рис. 10. Визуализация потока при $\pi = 1,2$: $a - \mu = 1$; $b - \mu = 0,5$

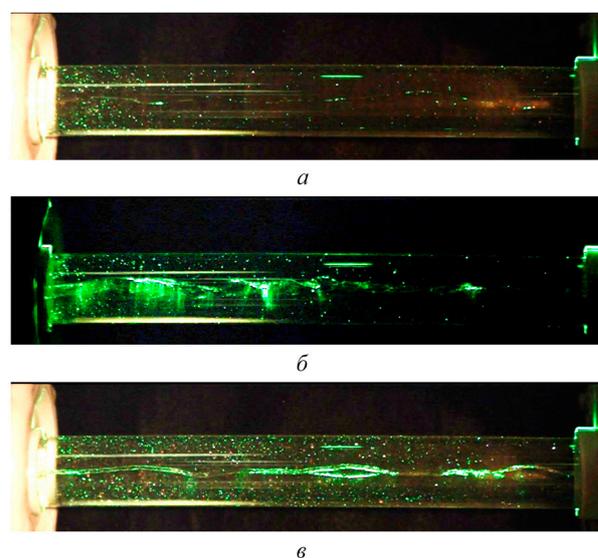


Рис. 11. Визуализация потока при $\pi = 1,8$: $a - \mu = 1$; $b - \mu = 0,7$; $v - \mu = 0,5$

На начальном участке камеры энергоразделения спиральный вихрь занимает значительное пространство, имея в радиальном направлении размер порядка $0,5d$, шаг винтовой линии растянут и составляет $(2...3)d$. На расстоянии $(5...6)d$ от закручивающего устройства спираль сжимается, шаг винтовой линии становится равным $(1...1,5)d$. В области, где наблюдается более плотное расположение крупномасштабных вихревых структур, отмечается наиболее интенсивный радиальный перенос массы. В этой области формируется приосевая вихрь, наблюдается его значительное отклонение от оси, что подтверждает наличие прецессионных процессов.

Основываясь на результатах скоростной видеосъемки, определено число Струхалия, характеризующее частоту прецессии приосевого вихря, зависимость которого представлена на рис. 12.

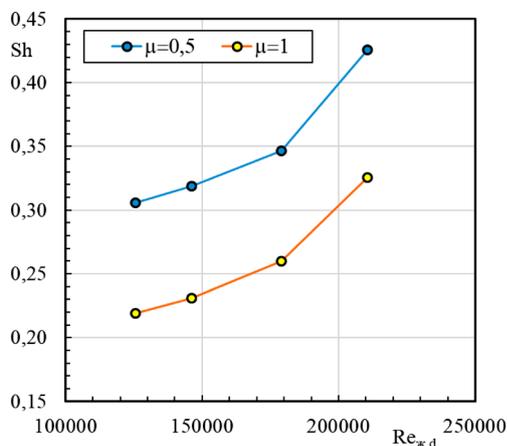


Рис. 12. Зависимость числа Струхалия прецессирующего приосевого вихря от числа Рейнольдса

Вихревые спиралевидные структуры возникают в вихревой трубе в результате взаимодействия приосевого и периферийного потоков, движущихся в противоположных направлениях. Механизм образования таких структур аналогичен образованию вихрей в слое смешения сосных струй, движущихся с разными скоростями. В закрученном потоке в силу осевой симметрии такие вихри имеют тороидальный, а в реальных условиях спиральный характер. Взаимодействие тороидального или спирального вихря с окружающим потоком приводит к возникновению радиальных пульсаций. Механизм этих пульсаций связан с гироскопическим эффектом. Таким образом, вихревые спиралевидные структуры образуются в зоне смешения приосевого и периферийного потоков, могут пульсировать за счет гироскопического механизма, причем число Струхалия для таких структур около единицы $Sh \sim 1$.

Заключение

Выполненная визуализация течения воздуха в вихревой трубе позволила установить формирование парной спиральной структуры в периферийном вихре. На начальном участке камеры энергоразделения спиральные вихри находятся в противофазе, но по мере продвижения к выходу подогретого потока они начинают сли-

ваться в одну структуру. Взаимодействие периферийного и приосевого вихрей изменяет шаг спиральной вихревой структуры, формирующейся в свободном вихре. Выраженное размытие струи красителя потоком воздуха в средней части камеры энергоразделения свидетельствует о формировании сложных вихревых структур и высокой степени турбулентности потока, вызванной перестройкой периферийного вихря в движущийся в обратном направлении приосевой. Это говорит о высокой интенсивности радиального переноса массы, а следовательно, импульса и энергии, что соответствует основным положениям модифицированной гипотезы взаимодействия вихрей. Аналогичный вывод можно сделать и по результатам гидравлической визуализации.

Основной причиной возникновения вихревых спиралевидных структур в вихревой трубе является взаимодействие приосевого и периферийного потоков, движущихся в противоположных направлениях. Образующиеся в зоне смешения противоточного закрученного течения вихревые спиралевидные структуры нестационарны, а их взаимодействие с окружающим потоком приводит к возникновению радиальных пульсаций, привносящих значительный вклад в энергообмен между приосевым и периферийным потоками.

Список источников

1. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект (Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование). Москва: Научтехлитиздат, 2012. 342 с.
2. Меркулов А.А. Вихревой эффект и его применение в технике. Москва: Машиностроение, 1969. 177 с.
3. Сулов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В. Вихревые аппараты. Москва: Машиностроение, 1985. 251 с.
4. Zhang B., Guo X. Prospective applications of Ranque – Hilsch vortex tubes to sustainable energy utilization and energy efficiency improvement with energy and mass separation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 89. P. 135–150.
5. Santos E.D.D., Marques C.H., Stanescu G., Isoldi L.A., Rocha L.A.O. Constructal Design of Vortex Tubes // Constructal Law and the Unifying Principle of Design / Ed. by L.A.O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan. New York: Springer New York, 2013. P. 259–273.
6. Vasilyuk O.V., Veretennikov S.V. Simulation of vortex expansion separator for steam // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2020. Vol. 2211. No. 1. Article number 060007.
7. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. Vol. 34. No. 8. P. 1367–1374.

8. **Gutak A.D.** Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 49. P. 93–98.
9. **Guo X., Zhang B., Liu B., Xu X.** A critical review on the flow structure studies of Ranque–Hilsch vortex tubes // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 104. P. 51–64.
10. **Ahlborn B., Groves S.** Secondary flow in a vortex tube // *Fluid Dynamics Research*. 1997. Vol. 21. No. 2. P. 73–86.
11. **Erdélyi I.** Wirkung des Zentrifugalkraftfeldes auf den Wärmezustand der Gase, Erklärung der Ranque-Erscheinung // *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens*. 1962. Vol. 28. No. 6. P. 181–186.
12. **Liew R., Zeegers J.C.H., Kuerten J., Michalek W.R.** Maxwell’s Demon in the Ranque-Hilsch Vortex Tube // *Physical Review Letters*. 2012. Vol. 109. No. 5. Article number 054503.
13. **Eiamsa-ard S., Promvong P.** Review of Ranque – Hilsch effects in vortex tubes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12. No. 7. P. 1822–1842.
14. **Deissler R.G., Perlmutter M.** Analysis of the flow and energy separation in a turbulent vortex // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1960. Vol. 1. № 2–3. P. 173–191.
15. **Xue Y., Arjomandi M., Kelso R.** Visualization of the flow structure in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011. Vol. 35. No. 8. P. 1514–1521.
16. **Arbuzov V.A., Dubnishchev Yu.N., Lebedev A.V., Pravdina M.Kh., Yavorski N.I.** Observation of large-scale hydrodynamic structures in a vortex tube and the Ranque effect // *Technical Physics Letters*. 1997. Vol. 23. No. 12. P. 938–940.
17. **Aydin O., Baki M.** An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube // *Energy*. 2006. Vol. 31. No.14. P. 2763–2772.
18. **Gordienko M.R., Yavorsky N.I., Pravdina M.Kh., Kakaulin S.V., Kabardin I.K.** Visualization in the Ranque-Hilsch vortex tube using high-speed video recording // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2119. No. 1. Article number 012104.
19. **Guo X., Zhang B., Li L., Liu B., Fu T.** Experimental investigation of flow structure and energy separation of Ranque – Hilsch vortex tube with LDV measurement // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 101. P. 106–116.
- energy efficiency improvement with energy and mass separation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 89. pp. 135–150.
5. **Santos E.D.D., Marques C.H., Stanescu G., Isoldi L.A., Rocha L.A.O.** Constructal Design of Vortex Tubes. *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*. Ed. by L.A.O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan. New York: Springer New York, 2013, pp. 259–273.
6. **Vasilyuk O.V., Veretennikov S.V.** Simulation of vortex expansion separator for steam. *AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics*, 2020, vol. 2211, no. 1, article number 060007.
7. **Xue Y., Arjomandi M., Kelso R.** A critical review of temperature separation in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34, no. 8, pp. 1367–1374.
8. **Gutak A.D.** Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 2015, vol. 49, pp. 93–98.
9. **Guo X., Zhang B., Liu B., Xu X.** A critical review on the flow structure studies of Ranque – Hilsch vortex tubes. *International Journal of Refrigeration*, 2019, vol. 104, pp. 51–64.
10. **Ahlborn B., Groves S.** Secondary flow in a vortex tube. *Fluid Dynamics Research*, 1997, vol. 21, no. 2, pp. 73–86.
11. **Erdélyi I.** Wirkung des Zentrifugalkraftfeldes auf den Wärmezustand der Gase, Erklärung der Ranque-Erscheinung. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens*, 1962, vol. 28, no. 6, pp. 181–186.
12. **Liew R., Zeegers J.C.H., Kuerten J., Michalek W.R.** Maxwell’s Demon in the Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Physical Review Letters*, 2012, vol. 109, no. 5, article number 054503.
13. **Eiamsa-ard S., Promvong P.** Review of Ranque – Hilsch effects in vortex tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, no. 7, pp. 1822–1842.
14. **Deissler R.G., Perlmutter M.** Analysis of the flow and energy separation in a turbulent vortex. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1960, vol. 1, no. 2–3, pp. 173–191.
15. **Xue Y., Arjomandi M., Kelso R.** Visualization of the flow structure in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, vol. 35, no. 8, pp. 1514–1521.
16. **Arbuzov V.A., Dubnishchev Yu.N., Lebedev A.V., Pravdina M.Kh., Yavorski N.I.** Observation of large-scale hydrodynamic structures in a vortex tube and the Ranque effect. *Technical Physics Letters*, 1997, vol. 23, no. 12, pp. 938–940.
17. **Aydin O., Baki M.** An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube. *Energy*, 2006, vol. 31, no. 14, pp. 2763–2772.
18. **Gordienko M.R., Yavorsky N.I., Pravdina M.Kh., Kakaulin S.V., Kabardin I.K.** Visualization in the Ranque-Hilsch vortex tube using high-speed video recording. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 2119, no. 1, article number 012104.
19. **Guo X., Zhang B., Li L., Liu B., Fu T.** Experimental investigation of flow structure and energy separation of Ranque – Hilsch vortex tube with LDV measurement. *International Journal of Refrigeration*, 2019, vol. 101, pp. 106–116.

References

1. **Piralishvili S.A.** Vihrevoj effekt (Fizicheskoe yavlenie, eksperiment, teoreticheskoe modelirovanie) [Vortex effect. Physical phenomenon, experiment, theoretical modeling]. Moscow: Nauchtehlitizdat, 2012, 342 p.
2. **Merkulov A.A.** Vihrevoj effekt i ego primenenie v tekhnike [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 177 p.
3. **Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V.** Vihrevye apparaty [Vortex apparatuses]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 251 p.
4. **Zhang B., Guo X.** Prospective applications of Ranque – Hilsch vortex tubes to sustainable energy utilization and

Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 16.10.2023

The article was submitted on 05.09.2023; approved after reviewing on 15.09.2023; accepted for publication on 16.10.2023