

## Визуализация в вихревой трубе Ранка-Хилша с использованием высокоскоростной видеосъемки

*М. Р. Гордиенко\*<sup>1</sup>, Н. И. Яворский<sup>1</sup>, М. Х. Правдина<sup>1</sup>, С. В. Какаулин<sup>1</sup>, И. К. Кабардин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: fregat120@yandex.ru

**Аннотация.** В данной работе была проведена скоростная видеосъемка в вихревой трубе Ранка-Хилша с квадратным поперечным сечением. Были получены видеофайлы при скоростях съемки от 1000 до 10000 кадров в секунду. Наиболее хорошие видеофайлы были получены на частоте съемки в 7800 кадров в секунду при избыточном входном давлении в 1 бар. Видеозапись подтвердила наличие двойной спирали в сердечнике потока во второй секции трубы. Видеофайлы показали наличие зоны циркуляции между ядром потока и периферией, которая постоянно меняется с течением времени. На ней хорошо виден угол, под которым частицы движутся в периферийном потоке. Полученные видеофайлы показывают, как прецессирует ядро потока на оси вихревой трубы квадратного сечения.

**Ключевые слова:** скоростная видеосъемка, труба Ранка, двойная спираль, вихревые структуры

## Visualization in a Ranque-Hilsch vortex tube using high-speed video recording

*M. R. Gordienko\*<sup>1</sup>, N. I. Yavorsky<sup>1</sup>, M. Kh. Pravdina<sup>1</sup>, S. V. Kakaulin<sup>1</sup>, I. K. Kabardin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: fregat120@yandex.ru

**Abstract.** Visualisation via video recording was carried out in a Ranque-Hilsch vortex tube with a square cross-section. Video files were captured at recording speeds from 1000 to 10 000 frames per second. The best video files were obtained at a shooting frequency of 7800 frames per second with an input pressure of 1 bar. The video confirmed the presence of a double helix in the flow core in the second section of the tube. Video files showed the presence of a circulation zone between the flow core and the periphery, which is constantly changing over time. The angle at which the particles move in the peripheral flow is clearly visible on it. The resulting video files show how the core of the flow precesses on the axis of a square-section vortex tube.

**Keywords:** high-speed video shooting, wound tube, double helix, vortex structures

### *Введение*

Вихревой эффект Ранка-Хилша известен уже около 100 лет. Но к текущему моменту он не получил общепризнанного объяснения причины возникновения. Сложность в том, что течение внутри трубы Ранка является сильнозакрученным и прецессирующим. В связи с этим возникает проблема исследования течения внутри данной вихревой трубы. Любой датчик, вносимый непосредственно в поток, сильно искажает его. Множество бесконтактных методов измерения появи-

лось сравнительно недавно. Существует довольно мало экспериментальных исследований течения внутри трубы. Вихревые трубы давно используются в промышленности, и изучение механизмов термосепарации может помочь увеличить эффективность вихревых труб.

Так как поверхности цилиндрической трубы искажают оптические лучи, то визуализация течения, а также измерение скоростей бесконтактными методами внутри трубы является слишком трудоемкой задачей. Поэтому в нашей работе было решено использовать вихревую трубу Ранка-Хилша квадратного поперечного сечения. Эта труба была разработана в лаб. 6.3 Института теплофизики СО РАН. В 1997 году на этой трубе была получена визуализация двойной спирали, распространяющейся от радиального диффузора [1]. Также, в работе [2], нами было показано, что замена круглого течения на квадратное не нарушает эффект, хоть и делает терморазделение в 2 раза слабее.

Цель данного эксперимента состоит в получении такого видео, которое позволило бы в дальнейшем увидеть устойчивые крупномасштабные структуры в потоке.

Поэтому первая задача состоит в нахождении подходящих трассирующих частиц, которые сможет увидеть данная камера для 10000 кадров в секунду. Такая частота съемки по оценке необходима, чтобы перемещение частиц на итоговом видео было меньше чем 1 см за кадр.

Вторая задача – это подобрать источник света, который мог подойти для столь большой частоты съемки.

В результате необходимо получить достаточно освещенное видео процесса, происходящего в трубе Ранка, где можно увидеть перемещение частиц меньше 1 см за кадр, для оценки периодических процессов в крупномасштабных структурах.

### *Методы и материалы*

На (рис. 1) представлен экспериментальный стенд. Воздух подается в установку через завихритель (разрез А-А). Затем заходит в камеру диаметром 78 мм через две тангенциальные щели размером 2×20 мм. Затем, закрученный поток через гиперболический переход заходит в канал квадратного сечения. (В-В). Этот гиперболический переход позволяет увеличить скорость вращения воздуха по сравнению с выходом из щелей. Канал состоит из 3 секций размером 130 мм. Внутреннее поперечное сечение канала представляет собой квадрат со стороной 34 мм. Секции оснащены с двух сторон оптическими окнами размером 90×34 мм. На горячем конце трубы в качестве дросселя использован радиальный диффузор. Щель радиального диффузора может изменяться, в данной работе установлена ширина 1,5 мм. Воздух попадает в бак буферного объема, затем выходит. С холодного конца установки воздух выходит через круглую диафрагму диаметром 16 мм. Давление входного сжатого воздуха регулируется вентилем. Также соотношением холодного расхода и горячего можно регулировать не только шириной щели радиального диффузора, но и вентилями на горячем и холодном конце, которыми оснащена установка. Во всех экспериментах доля холодного расхода составляла 0,25.

Контроль расхода осуществлялся по перепаду давления на расходомерных шайбах  $G_{in}$  и  $G_c$ ,  $G_h$ , для чего расходомеры были оснащены датчиками перепада давления ( $\Delta P$ ) фирмы ЗАО НПК ВИП СДВ-Д-250-М- 4-20МА-D386В06053-К21, позволяющими измерять перепад давления до 2,5 бар с погрешностью, не превышающей 0,1 %. Стенд оснащен датчиками температуры ( $T_c$ ,  $T_{in}$ ,  $T_h$ ,  $T_{room}$ ) DS18B20 фирмы Dallas semiconductor и термометрами сопротивления Pt1000. Датчики DS18B20 позволяют измерять температуру в диапазоне  $-55...+125$  °С с погрешностью, не превышающей 0,5 С, а Pt1000 – в диапазоне  $-50...+ 200$ °С с погрешностью, не превышающей 0,1 °С. Стенд оснащен датчиками давления фирмы ( $P_{in}$   $P_h$ ,  $P_c$ ) ЗАО НПК ВИП СДВ-И-2,50-1,60-1,00-4-20МА-DA422-06053, позволяющими измерять избыточное давление до 10 бар с погрешностью, не превышающей 0,1 %. Более подробное описание стенда можно найти в [5].

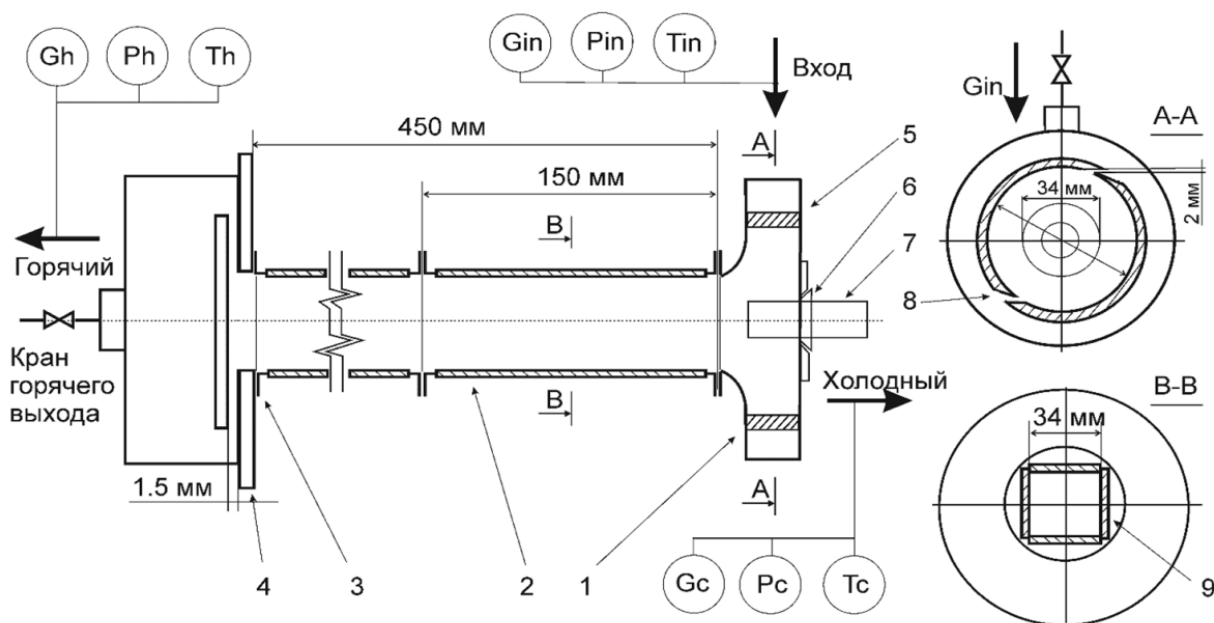


Рис. 1. Экспериментальный стенд с вихревой трубой

В качестве средства видеосъемки использовалась скоростная камера Evercam 2800с. (рис. 2). Максимальная частота видеосъемки составила 10000 кадров в секунду при разрешении изображений  $312 \times 160$ . В качестве источника света использовались красный 100-ватный диод, лазер зеленого цвета, синий диод, красный лазер.

### Результаты

Первая задача состояла в том, чтобы найти подходящие трассеры для засева потока, так чтобы их хорошо видела камера. Первоначально была попытка использовать дым от горения ароматических палочек, но камера данные частицы не улавливает. Глицериновый дым в нашей установке использовать невозможно,

так как глицерин сразу начинает оседать на оптических окнах канала в виде жидкости, тем самым делая невозможным нормальную визуализацию. Также были опробованы гипс и диоксид титана. Выбор был остановлен на частицах диоксида титана. Они являются достаточно мелкими (250–300 мкм) чтобы двигаться вместе с потоком и при этом неплохо отражают свет.

Все эксперименты по визуализации проводились во второй секции рабочего канала.

Эксперименты по подбору трассеров делались с помощью белого 100-ватного диода. Но на 5000–6000 кадров в секунду почти ничего не было возможно разглядеть.

Затем был опробован красный лазер. Эксперимент также потерпел неудачу при скорости свыше 2000–3000 кадров в секунду.

Затем был взят зеленый лазер, который показал самые успешные результаты по визуализации. С помощью этого лазера можно было видеть частицы на скорости 10000 кадров в секунду, как и предполагалось.

Также было известно, что камера хорошо воспринимает красный цвет и была предпринята попытка использовать красные 100 ватные диоды в количестве 2 штук, но результат оказался хуже, чем полученный при помощи зеленого лазера. Изображения, полученные с помощью зеленого лазера показаны на рис. 2.

Наилучший результат из доступных источников света показал зеленый лазер, который светили продольно ножом в центре канала. Изображения, полученные с помощью зеленого лазера, показаны на рис. 2. Видеозапись со скоростью 10000 кадров в секунду – это видео с максимальной частотой, с которой удалось снять видео, на котором можно различить поток воздуха. На этих видеороликах вы уже можете видеть движение частиц на периферии потока и во внутреннем ядре, но картина потока оказалась неразличимой. Было решено выбрать наиболее удачную частоту для этого освещения и камеры. Важно было поддерживать баланс качества видео и достаточного замедления потока. Во всех экспериментах доля расхода в холодный выход составляла 0,25.

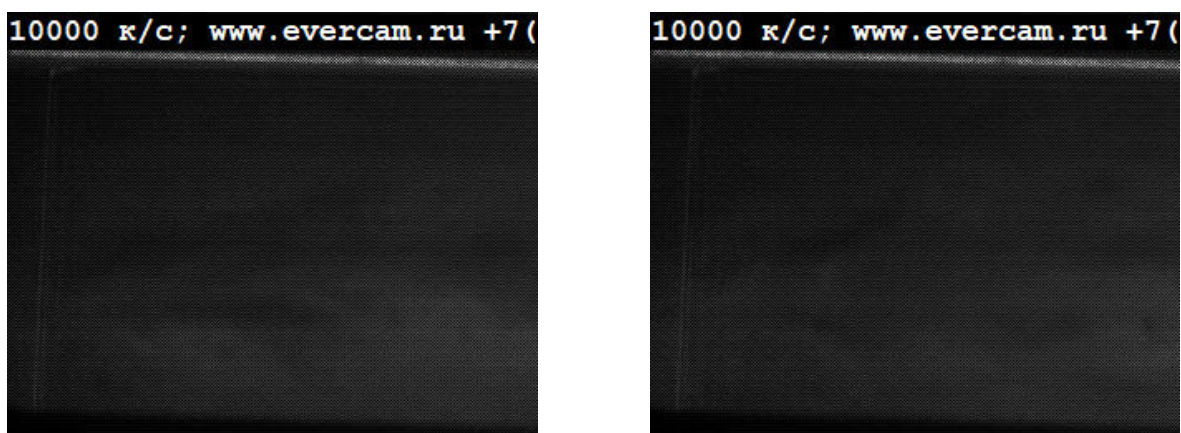


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью зеленого лазера при входном давлении в  $P=1$  бар избыточных. Скорость видеосъемки 10000 кадров/с

При частоте 7600 кадров в секунду получились самые удачные видеоролики. Далее показаны кадры, сделанные с использованием высокоскоростной видеосъемки со скоростью 7600 кадров в секунду и избыточным входным давлением 1 бар (рис. 3). Источником света был зеленый лазерный нож. На данный момент это лучшие из полученных данных.

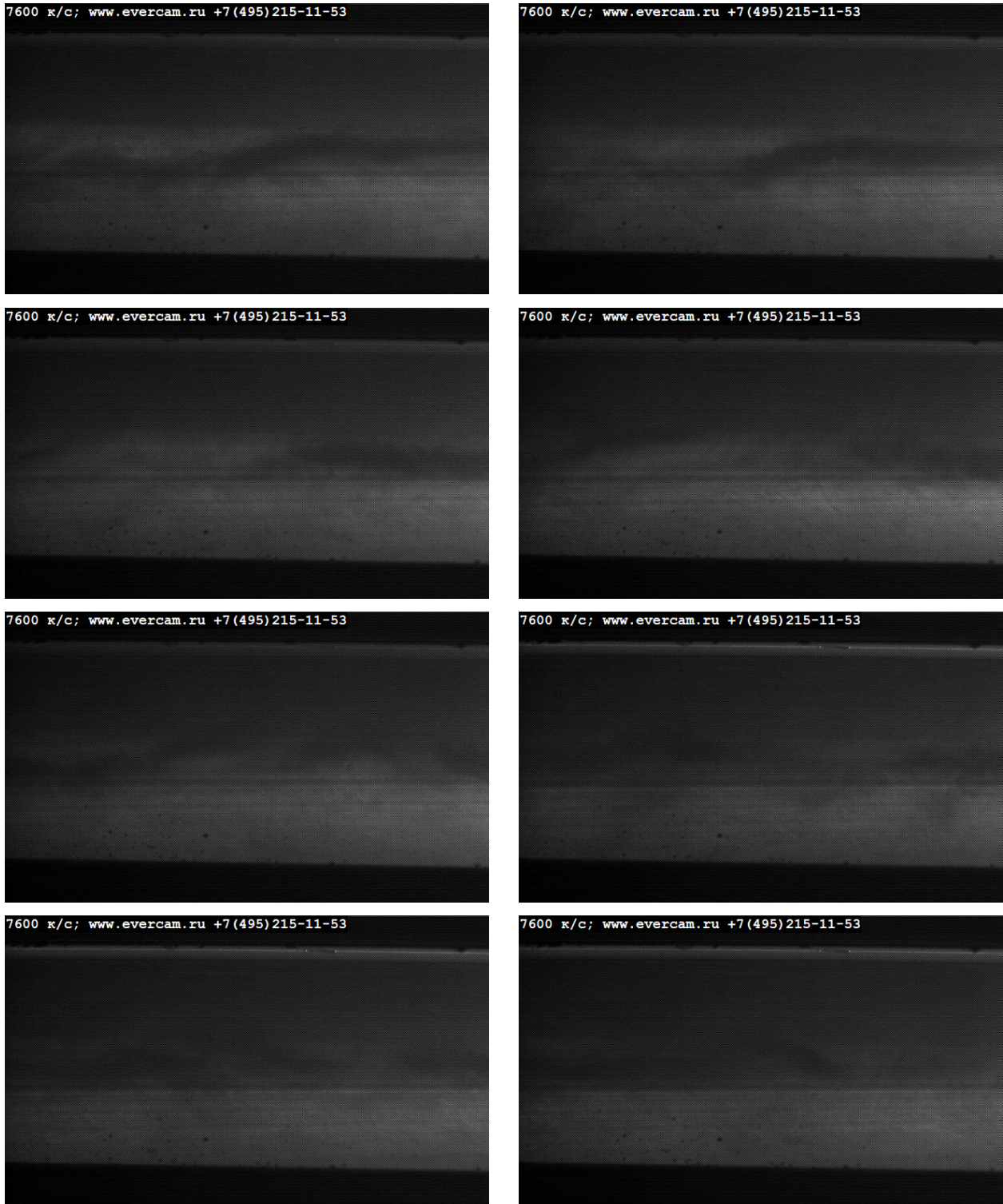


Рис. 3. Характерные кадры скоростной видеосъемки, полученные на скорости съемки в 7600 кадров в секунду. Избыточное давление на входе 1 бар

## *Обсуждение*

На видео вы можете видеть вращающуюся и прецессирующую сердцевину потока, представляющую собой двойную спираль, полученную в работе [1], которая была проведена в той же трубе в 3-ей секции. Спираль, полученная в этой статье, показана ниже (рис. 4). На видео также показана зона циркуляции между ядром потока и периферией, которые движутся в разных направлениях. Видно, что в этом потоке нет устойчивых границ между периферией, зоной циркуляции и ядром потока.

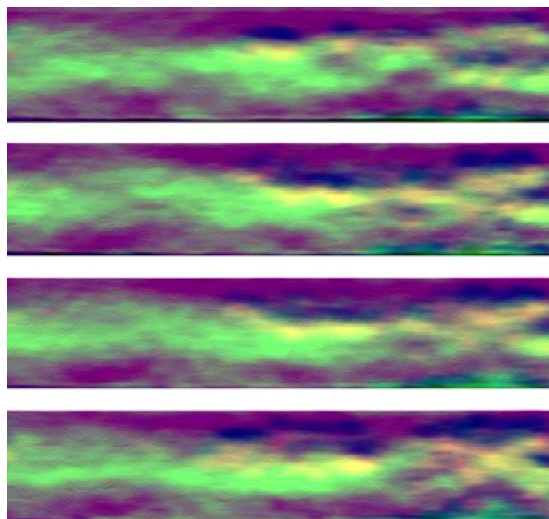


Рис. 4. Визуализация двойной спирали с использованием теневого метода. Время экспозиции каждого кадра составляет 250 мкс

## *Заключение*

Полученные видеофайлы показывают, как прецессирует ядро потока на оси вихревой трубы квадратного сечения. Видеозапись подтвердила наличие двойной спирали в сердцевине потока во втором участке трубы. Видеофайлы показали наличие зоны циркуляции между ядром потока и периферией, которая постоянно меняется с течением времени. Вы также можете четко видеть угол, под которым частицы движутся в периферийном потоке. Эксперимент осложняется очень быстрым загрязнением трубы. При этом нужно еще повысить мощность света, чтобы снимать поток при как можно большей скорости съемки. Актуально продолжать видеосъемку, чтобы увидеть крупномасштабные структуры в вихревой трубе, что в свою очередь поможет прицельно изучать те фрагменты потока, которые окажутся наиболее значимыми для изучения.

## *Благодарности*

Работа выполнена по государственному контракту с ИТ СО РАН (121032200034-4 и АААА-А19-119052190039-8).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Arbuzov V A, Dubnishchev Yu N, Lebedev A N, Pravdina M Kh and Yavorsky N I. – 1997. – Technical physics letters. – 23(12). – P. 938–940.
2. Gordienko M R, Yavorskiy N I, Pravdina M Kh, Ezendeeva D P and Kakaulin S V. – 2016. – J. Phys: Conf. Ser. 1359 012093.
3. Yavorsky N I, Meledin V G, Kabardin I K, Gordienko M R, Pravdina M Kh, Kulikov D V, Polyakova V I and Pavlov V A. – 2018. – AIP Conference Proceedings, 2027 030122.
4. Kabardin I K, Polyakova V I, Pravdina M Kh Yavorsky N I and Gordienko M R. – 2020. – J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 61 (1). P. 43–52.
5. Kabardin I K, Pravdina M Kh, Polyakova V I, Yavorsky N I, Pavlov V A and Gordienko M R. – 2018. – J. Phys: Conf. Ser. 1105, 012006.

© М. Р. Гордиенко, Н. И. Яворский, М. Х. Правдина,  
С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, 2022