

*В. А. Павлов<sup>1\*</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, И. К. Кабардин<sup>1</sup>, М. Р. Гордиенко<sup>1</sup>*

## **Измерение распределения скорости методом ЛДА и температуры датчиками сопротивления внутри завихрителя вихревой трубы Ранка – Хилша**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: pavlov@itp.nsc.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов внутри вихревой камеры (завихрителя) в трубе Ранка бесконтактными методами. Была использована вихревая труба, состоящая из двухщелевого завихрителя, рабочего канала с квадратным сечением, радиального диффузора на горячем выходе и выходным отверстием на холодном выходе. Для возможности оптической диагностики вихревая камера (завихритель) была оснащена оптическими окнами. Измерения скорости были проведены при помощи лазерного доплеровского анемометра. Поток засеивался частицами дыма. С помощью измерений методом лазерной доплеровской анемометрии были получены новые экспериментальные данные о вихревом потоке в завихрителе вихревой трубы с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии. Также был исследован температурный профиль в завихрителе при разных входных давлениях.

**Ключевые слова:** измерение скорости, эффект Ранка-Хилша, лазерная доплеровская анемометрия, завихритель

*V. A. Pavlov<sup>1\*</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, I. K. Kabardin, M. R. Gordienko*

## **Measurement of the Velocity Distribution by the LDA Method and Temperature by Resistance Sensors Inside the Ranque-Hilsh Vortex Tube Swirler**

<sup>1</sup> S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: pavlov@itp.nsc.ru

**Abstract.** This work is devoted to the experimental study of the processes inside the vortex chamber (swirler) in the Ranque tube by non-contact methods. A vortex tube consisting of a double-slit swirler, a working channel with a square cross section, a radial diffuser at the hot outlet and an outlet at the cold outlet was used. For the possibility of optical diagnostics, the vortex chamber (swirler) was equipped with optical windows. Speed measurements were carried out using a laser Doppler anemometer. The stream was seeded with smoke particles. Using measurements by laser Doppler anemometry, new experimental data on the vortex flow in the vortex tube swirler were obtained using the laser Doppler anemometry method. The temperature profile in the swirler was also investigated at different input pressures.

**Keywords:** speed measurement, Ranque-Hilsch effect, laser Doppler anemometry, swirler

### ***Введение***

В этой работе изучается эффект Ранка-Хилша, а именно процессы в завихрителе. До сих пор недостаточно экспериментальных данных для понимания терморазделения в трубе Ранка [1]. Для проверки теоретических моделей действительно

необходимы систематические и детальные эксперименты. Предпочтительно использовать методы, которые не нарушают поток. В настоящее время уже есть множество работ с применением бесконтактных методов в трубе Ранка [2-6].

В [2] для удобства оптической диагностики по всему потоку использовалась труба квадратного поперечного сечения. Методом цветной визуализации Фуко-Гильберта с временной экспозицией 250 микросекунд в нем наблюдалась двухспиральная крупномасштабная вихревая структура.

В работе [3] проводилось сравнение вихревых труб с круглым и квадратным поперечным сечением при входящем избыточном давлении  $P$ , которое меняется от 0,1 до 0,7 МПа. Показано, что эффект Ранка в квадратной трубе также воспроизводится при почти том же общем расходе, что и в круглой. При этом разница температур на выходах в вихревой трубе квадратного сечения была в 2 раза меньше, чем в трубе круглого сечения [3].

В работах [4-5] течение внутри вихревых труб диагностировалось путем сканирования центрального продольного плоского сечения методами лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Временные шкалы для методов ЛДА составляют около нескольких секунд для одной точки, а для измерения одного профиля скорости поперек потока требуется несколько минут.

### ***Методы и материалы***

В настоящей работе для удобства оптической диагностики по всему потоку используется труба с квадратным поперечным сечением, идентичная трубе из [2, 3, 6]. Труба Ранка (рис. 1) включает в себя вихревую камеру, которая имеет две тангенциальные щели площадью 40 мм<sup>2</sup> каждая. Диаметр вихревой камеры 70 мм, с плоской верхней крышкой с одной стороны и диафрагмой гиперболического профиля с другой стороны. В итоге воздух входит в рабочий канал через круглое отверстие диаметром 34 мм. Рабочий канал представляет из себя трубу с квадратным поперечным сечением, которая состоит из трех секций длиной 145 мм с двумя противоположными окнами из оптического стекла в каждой. Горячий выход выполнен в виде радиального диффузора с зазором 2 мм. Радиальный диффузор заключен в буферный объем с выходом в атмосферу, регулируемым клапаном. Холодный выход из трубы выполнен в виде цилиндрического канала, который проходит через плоскую верхнюю крышку вихревой камеры. Сжатый воздух подается в кольцевое пространство (рис. 1, поперечное сечение А-А) и через 2 тангенциальные щели направляющего устройства направляется к отверстию в верхней крышке гиперболической формы. Гиперболическая форма крышки служит для увеличения окружной скорости на пути от щелей к входу в рабочий канал. Холодная фракция  $\mu$  регулируется выпускным клапаном для горячего выхода.

Вихревая труба была оснащена завихрителем с прозрачными окнами (рис. 2). Окна были сделаны из оптического стекла, что позволяло проводить точную оптическую диагностику внутри закручивающего устройства. Фотография завихрителя с оптическими окнами представлена на рис. 3.

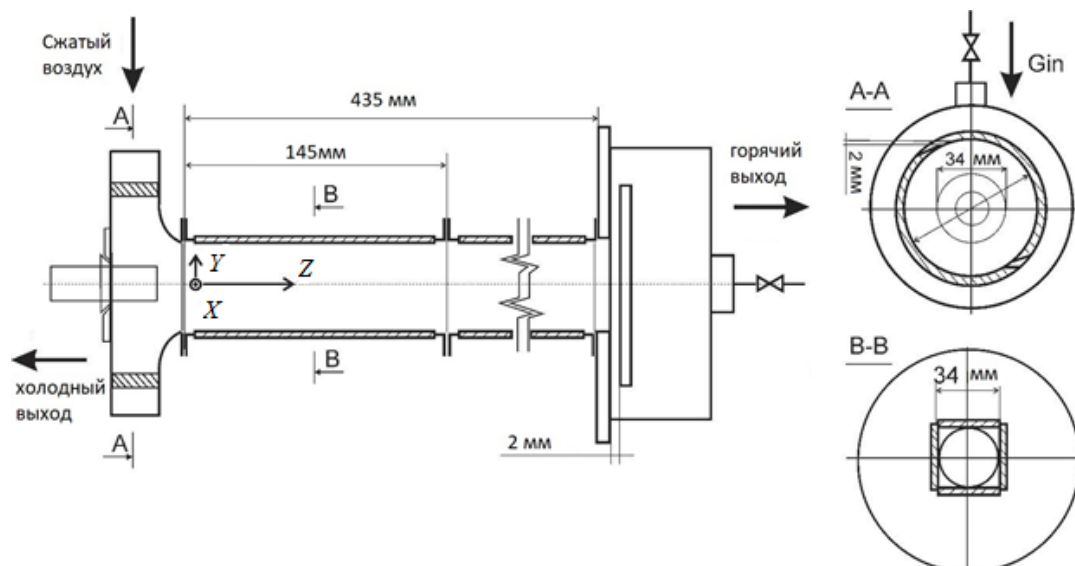


Рис. 1. Труба Ранка с квадратным поперечным сечением

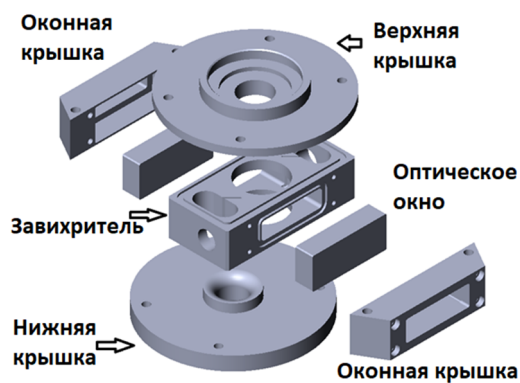


Рис. 2. 3D-модель завихрителя с прозрачными окнами

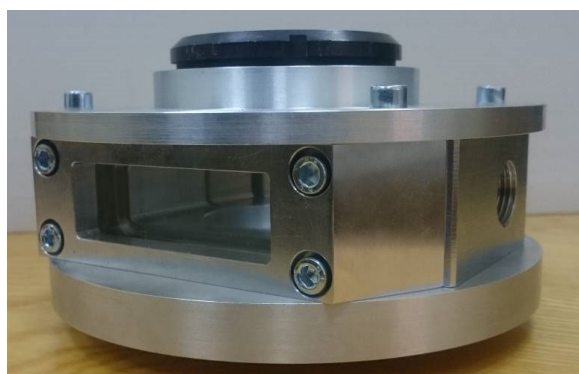


Рис. 3. Фотография завихрителя с прозрачными окнами

Кинематика потока внутри трубы Ранка изучается с помощью лазерного доплеровского анемометра с адаптивным временным выбором вектора скорости (LAD-07). Данный прибор был разработан и изготовлен в Институте теплофизики им. Кутателадзе СО РАН в Новосибирске. Лазерно-оптическая схема измерения скорости показана на (рис. 4).

Измеряемое пространство сканируется путем перемещения оптического блока с помощью координатно-перемещающего устройства. Это устройство перемещает измерительный блок в области 250x250x250 мм с точностью 0,1 мм.

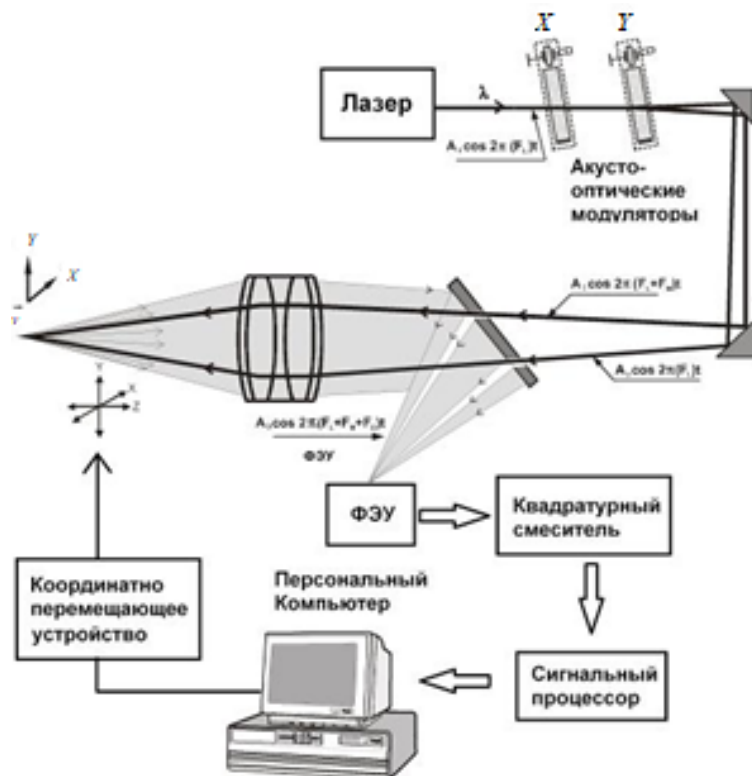


Рис. 4. Схема работы LAD-07

Принцип работы LAD-07 подробно описан в работе [6].

LAD-07 измеряет две проекции вектора скорости в диапазоне от 0,001 до 300 м/с. Относительная погрешность не более 0,5%. Размер области пересечения составляет 0,1x0,1x0,5 мм.

В качестве трассирующих частиц были выбраны ароматические тибетские палочки, обеспечивающие равномерный поток частиц размером от 1 до 10 микрон в течение 10–15 минут. Они хорошо подходили для эксперимента, так как на измерение профиля уходило около 10 минут. Для хорошего усреднения данных в каждой точке профиля скорости по возможности набиралось по 500 измерений.

### Результаты

Составляющая скорости  $V_x$  (рис. 5, 6) измеряется в прозрачной вихревой камере (завихрителе) при  $\mu = 0,3$  и значениях абсолютного давления на входе в диапазоне от 2 до 5 бар. На оси  $OY$  этот модуль компоненты скорости можно рассматривать как тангенциальную составляющую скорости в полярной системе координат. Асимметрия профиля присутствует по оси  $OY$  из-за расположения щелей. Значения рабочих параметров и влияние температуры приведены в табл. 1.

## Параметры эксперимента

$P_{in}$ , бар	$G_c$ , н.м <sup>3</sup> /ч	$G_h$ , н.м <sup>3</sup> /ч	$\mu$	$\Delta t_h$ , К	$\Delta t_c$ , К
2	31	73	0,3	1,7	2,2
3	53	119	0,3	4,4	3,8
4	72	162	0,3	6,2	4,8
5	90	207	0,3	8,9	5,1

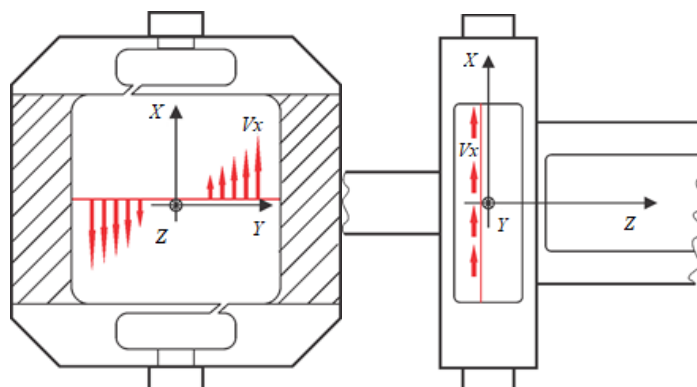


Рис 5. Схема измерения «окружной» составляющей скорости

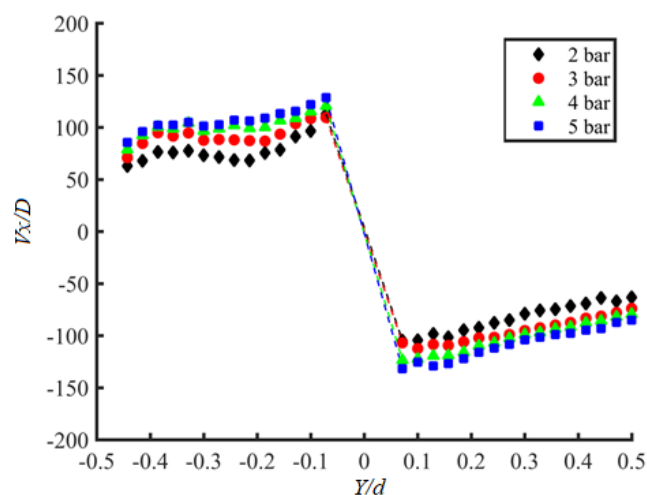


Рис. 6. Профили тангенциальной скорости при абсолютном давлении на входе 2-5 бар

Профили скоростей в центре вихревой камеры показаны на рис. 6 для абсолютного давления в диапазоне от 2 до 5 бар. Модуль составляющей скорости  $V_x$  увеличивается от периферии к центру вплоть до границы обратного потока при  $Y/D = 0,2$  примерно на 25%. Профили скоростей, имеющие сходную форму, имеют тенденцию сближаться с увеличением давления на входе.

Также в работе был проведен эксперимент по измерению профиля температуры в завихрителе и нескольких профилей в рабочем канале с помощью мало-

габаритного датчика при разных показателях входного давления. (рис. 7, 8, 9). Один датчик, вносимый в поток, не искажал температуру на выходах.

Было измерено несколько профилей температуры, расположенных по центру трубы, находящихся на разном расстоянии от завихрителя (рис. 9). Для некоторых точек было выполнено несколько измерений. Из этих данных можно заметить, что течение в трубе Ранка достаточно нестационарно, и различия для одного профиля порой доходят до 1 градуса (рис. 7).

Температура в завихрителе показывает существенную несимметричность, которая возникает по ряду причин: датчик может вносить небольшие изменения в течение воздуха, вихревая спираль, распространяющаяся от горячего выхода установки, а также другие крупномасштабные процессы в трубе.

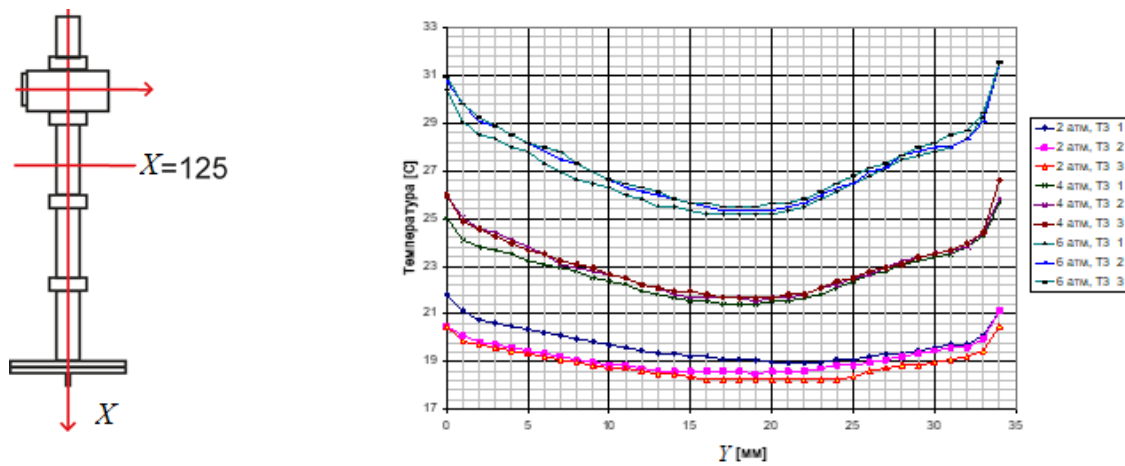


Рис. 7. Профили температуры в сечении  $X = 125$  мм для трех измерений при различном давлении на входе в вихревую трубу

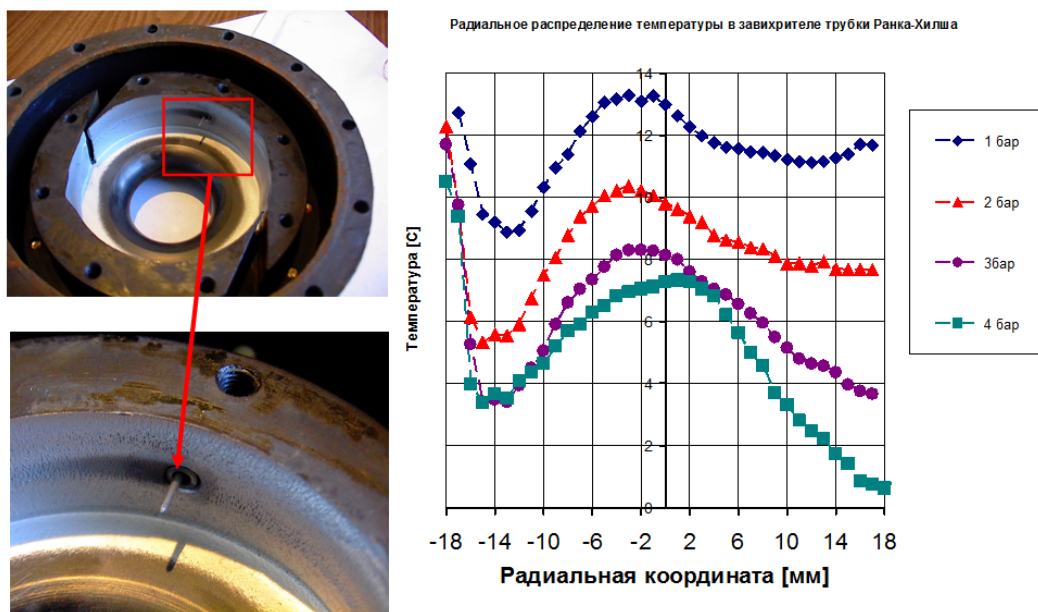


Рис. 8. Измерение температуры внутри завихрителя

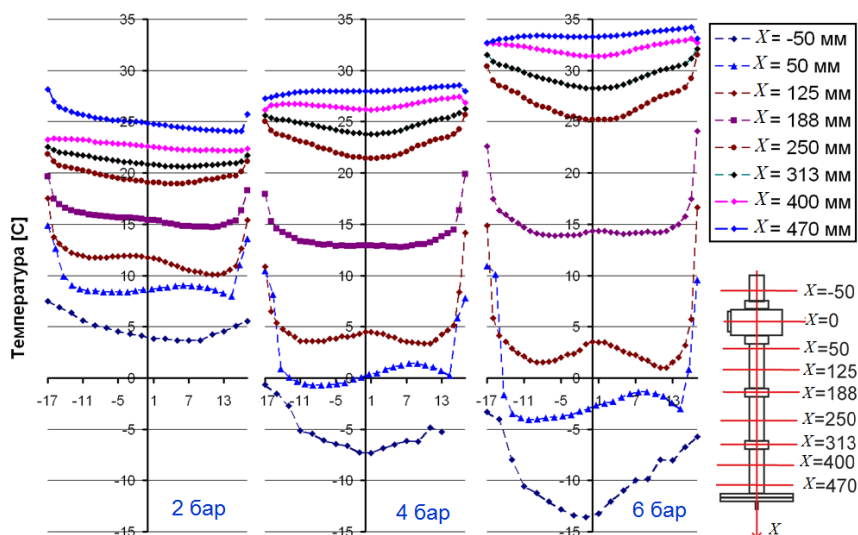


Рис. 9. Распределения температуры внутри вихревой трубы

### *Заключение*

Был проведен эксперимент по измерению скоростей в завихрителе вихревой трубы методом ЛДА. Показано, что скорость вращения на диаметре в эксперименте достигала 150 м/с. Модуль скорости при этом увеличивается от периферии к центру канала.

В работе были измерены профили температуры в нескольких сечениях вихревой трубы и в завихрителе. Профили температуры показывают расхождения при измерении одного и того же профиля в 1 градус. Профили температуры в завихрителе показывают существенную несимметричность при избыточном входном давлении 1-4 бар.

### *Благодарности*

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xue J. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Vol. 34, Iss. 8. – P. 1367–1374.
2. Дубнищев Ю.Н., Меледин В.Г., Павлов В.А., Яворский Н.И. Исследование структуры течения и энергоразделения в вихревой трубке квадратного сечения // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2003. – Т.10, № 4. – С. 587–598.
3. 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 of Conferences*. – 2017. – Vol. 115. – P. 02022.
4. Liew R., Zeegers J. C. H., Kuerten J. G. M., Michalek W. R. 3D Velocimetry and droplet sizing in the Ranque-Hilsch vortex tube // *Experiments in Fluids*. – 2012. – Vol. 54. – P. 1416–1432.
5. Doll U., Beversdorff M., Stockhausen G., Willert Ch., Schlüss D., Morsbach Ch. Characterization of the flow field inside a Ranque-Hilsch vortex tube using filtered Rayleigh scattering, Laser-2-Focus velocimetry and numerical methods // *17th International Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2017*.

6. Kabardin I.K., Meledin V. G., Yavorsky N. I., Gordienko M. R., Pravdina M. Kh., Kulikov D. V., Polyakova V. I., Pavlov V. A. LDA Diagnostics of velocity fields inside the Ranque tube // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 980, No. 1. – P. 012043.

© *В. А. Павлов, В. Г. Меледин, И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, 2023*