

*М. Р. Гордиенко<sup>1\*</sup>, Н. И. Яворский<sup>1</sup>, В. И. Полякова<sup>1</sup>, И. К. Кабардин<sup>1</sup>.*

## **Экспериментальное исследование полей скорости внутри трубы Ранка – Хилша методом ЛДА**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: fregat120@yandex.ru

**Аннотация.** Эффект Ранка-Хилша до сих пор не имеет общепризнанного научного обоснования. В основном это связано с малым количеством экспериментальных данных, полученных на одной трубе. Датчики, непосредственно вносимые в трубу, нарушают поток, поэтому является актуальным использование бесконтактных оптических методов для диагностики потока в вихревой трубе. Структура потока внутри вихревой трубы Ранка в данной работе исследуется методом лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Представлено поле средних скоростей в рабочем канале квадратного сечения при избыточных давлениях 0,1 и 0,3 МПа. Двумерная диаграмма средней скорости анализируется для центральной продольной плоскости. Также приводится демонстрация изменения формы вращающегося вихря внутри трубы с удалением от завихрителя. Полученные данные показывают, что на протяжении всей трубы твердотельное вращение присутствует в зоне возвратного течения. Отношение радиуса противотока к радиусу вихря остается равным 0,6 на протяжении почти всей длины канала, кроме областей у завихрителя и радиального диффузора.

**Ключевые слова:** эффект Ранка-Хилша, вихревая труба, лазерная доплеровская анемометрия, поля скорости

*M. R. Gordienko<sup>1\*</sup>, N. I. Yavorsky<sup>1</sup>, V. I. Polyakova<sup>1</sup>, I. K. Kabardin<sup>1</sup>.*

## **Experimental Investigation of Velocity Fields inside the Ranque-Hilsch Tube by the LDA Method**

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: fregat120@yandex.ru

**Abstract.** The Ranque-Hilsch effect still has no generally accepted scientific justification. This is mainly due to the small amount of experimental data obtained on one tube. Sensors directly inserted into the pipe disrupt the flow, so it is relevant to use contactless optical methods to diagnose the flow in a vortex tube. The structure of the flow inside the Ranque's vortex tube in this work is investigated by laser Doppler anemometry (LDA). The field of average velocities in the working channel of a square section at excess pressures of 0,1 and 0,3 MPa is presented. A two-dimensional average velocity diagram is analyzed for the central longitudinal plane. A demonstration of the changing shape of a rotating vortex inside a pipe with a distance from the swirler is also given. The data obtained show that solid-state rotation is present in the return flow zone throughout the entire pipe. The ratio of the counterflow radius to the vortex radius remains equal to 0,6 throughout almost the entire length of the channel, except for the areas at the swirler and the radial diffuser.

**Keywords:** Ranque-Hilsch effect, vortex tube, laser Doppler anemometry, velocity fields

## *Введение*

В данной работе проводится исследование эффекта Ранка-Хилша. Несмотря на то, что этот эффект известен давно, до сих пор нет единогласного объяснения, почему он происходит. Одна из причин – недостаточность экспериментальных данных [1]. В настоящее время настоятельно требуются систематические и детальные эксперименты для проверки теоретических моделей. Предпочтительны методы, которые не нарушают поток. К настоящему времени неинтрузивная диагностика в трубе Ранка продемонстрировала определенный успех [2-6]. В работе [2] использовалась труба Ранка квадратного сечения для удобства оптической диагностики по всему потоку. Методом цветной визуализации Фуко-Гильберта с временной экспозицией 250 мкс в ней наблюдалась двухспиральная крупномасштабная вихревая структура. В работе [3] было проведено сравнение труб круглого и квадратного поперечного сечения при избыточном входном давлении  $P$ , которое менялось от 0,1 до 0,7 МПа. В этой работе было показано, что эффект Ранка-Хилша в трубе с квадратным поперечным сечением хорошо воспроизводится, но разница температур на выходах была в 2 раза меньше, чем для трубы с круглым сечением [3]. В работах [4-6] течение внутри вихревых труб диагностировалось путем сканирования центрального продольного плоского сечения методом лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Данным методом проводится измерение в каждой точке в течение нескольких секунд, а профиль скорости, состоящий из множества точек, измеряется несколько минут. Поэтому мы можем получить усредненные характеристики скорости потока. Временные структуры данным методом обнаружить нельзя, но некоторый отпечаток на усредненной картине течения они оставить могут. Однако, получение усредненного поля скорости представляет для нас интерес.

### *Экспериментальная установка и методы измерений*

В данной работе используется трубка с квадратным поперечным сечением, идентичная трубке из [2, 3, 6]. Рабочий участок квадратного поперечного сечения позволяет использовать оптические методы для исследования вихревого эффекта во всем его внутреннем пространстве. Экспериментальный стенд с трубой Ранка (рис. 1) включает в себя вихревую камеру с направляющим устройством, включающим две тангенциальные щели площадью  $40 \text{ мм}^2$  и радиусом  $R_1 = 32,5 \text{ мм}$ , с плоской верхней крышкой с одной стороны и диафрагмой гиперболического профиля с другой стороны. Вихревая камера имеет гиперболический переход для ускорения закрученного потока. В итоге воздух входит в рабочий канал через круглое отверстие диаметром 34 мм. Рабочий канал с квадратным сечением состоит из трех секций длиной 145 мм с двумя противоположными окнами из оптического стекла. Сторона квадрата, внутреннего пространства трубы – 34 мм. Холодный выход из трубы представляет из себя цилиндрический канал диаметром 16 мм, который находится в крышке завихрителя, выступая на 3 мм в сам завихритель. Горячий выход выполнен в виде радиального диффузора с зазором 2 мм. Радиальный диффузор заключен в буферный объем с

выходом в атмосферу, регулируемым клапаном. Сжатый воздух подается в кольцевой канал (рис. 1, поперечное сечение А-А) и через тангенциальные щели направляющего устройства направляется к отверстию в верхней крышке гиперболической формы, которое поддерживает циркуляцию скорости почти постоянной вплоть до входа в рабочий канал. Тангенциальная скорость на входе в трубу увеличивается по сравнению со скоростью на выходе из щели. Холодная фракция  $\mu$  регулируется выпускным клапаном для горячей воды.

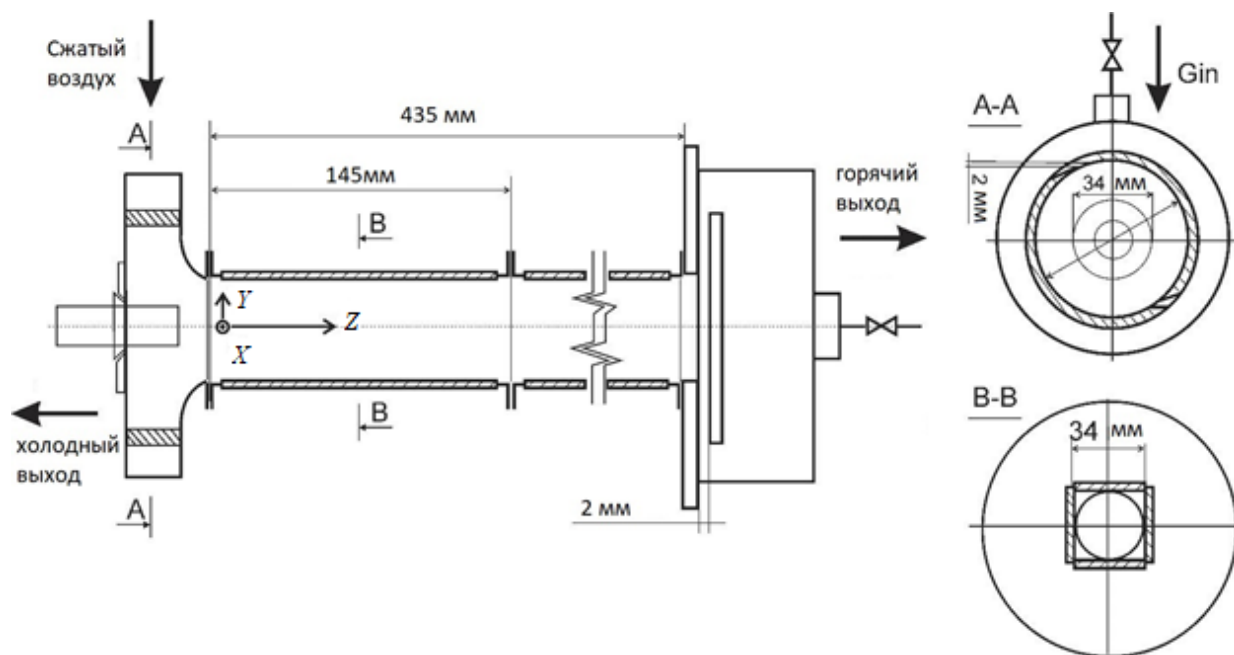


Рис. 1. Труба Ранка квадратного поперечного сечения

Кинематика потока внутри трубы Ранка изучается с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) 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. 2, а).

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

Принцип работы LAD-07 подробно описан в работе [7].

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.

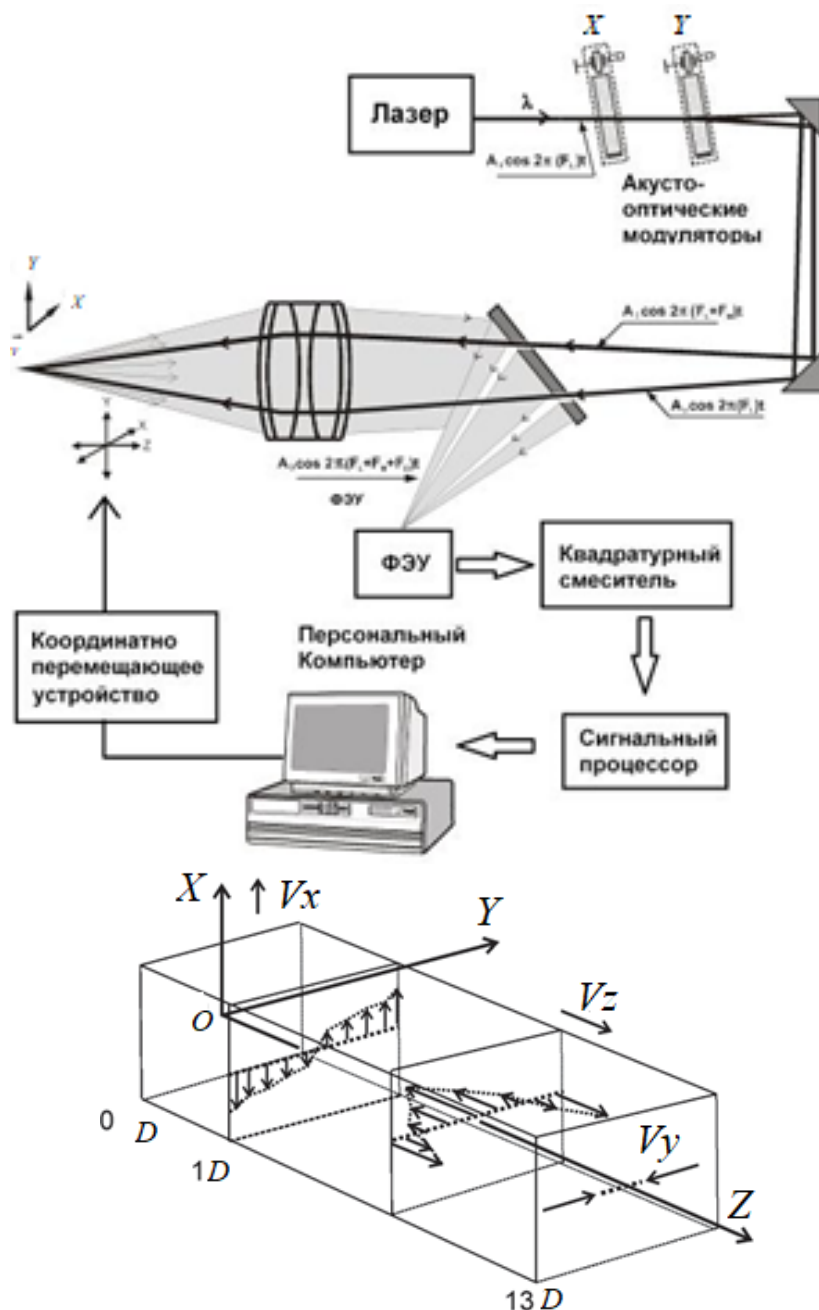


Рис. 2. Принцип действия ЛДА (а), и компоненты скорости в прямоугольных координатах (б)

### Результаты

Были выполнены измерения методом ЛДА центрального продольного сечения в трубе Ранка квадратного поперечного сечения. Измерения профилей двух компонент скорости (рис. 2, б) проводилось через каждые 10 мм в плоскости  $X=0$ , при избыточных входных давлениях 0,1 и 0,3 Мпа.

Экспериментальные результаты представлены на рис. 3-7. Массовые расходы входящего потока составляли 0,02 и 0,04 кг/с, а разница температур на двух выходах составляла 8,8 К и 18,8 К соответственно. Во всех экспериментах была установлена доля холодного потока  $\mu = 0,25$ .

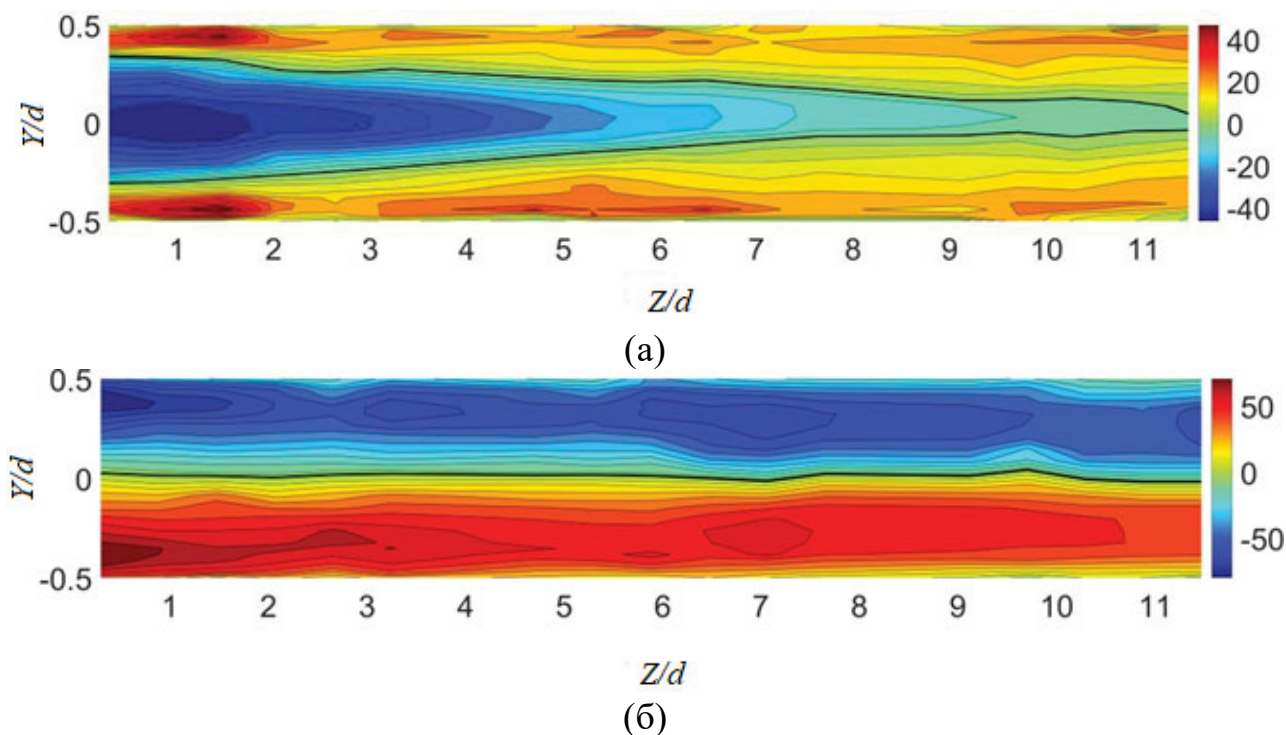


Рис. 3. Двумерные поля скоростей компонент  $V_z$  (а) и  $V_x$  (б) в плоскости  $X = 0$ .  $P = 0,1$  МПа

Представлены двумерные карты скоростей компонентов  $V_z$  и  $V_x$  для  $P = 0,1$  МПа (рис. 3). Черная линия на рис. 3(а) представляет границу обратного потока, которая достигает горячего конца трубки. В плоскости  $X = 0$  компоненты  $V_z$  и  $V_x$  совпадают с компонентами осевой и окружной скоростей в полярных координатах. На рис. 3(б) показано, что «окружная скорость» почти равномерна вдоль оси  $Y$  за пределами области обратного потока. Для  $P = 0,3$  МПа данные по полю расходной и окружной скорости не приводятся, так как имеют почти идентичный по структуре вид. Поля скоростей мало отличаются для  $P = 0,3$  МПа, так что тут они не приводятся.

На рис. 4 кривая 1 представляет модуль координаты  $Y$ , где модуль компоненты скорости  $V_x$  имеет свое максимальное значение в каждой точке продольной координаты  $Z$ . В первой четверти канала, от  $Z/d = 0$  до  $Z/d = 3$ , происходят структурные изменения после выхода воздуха из завихрителя, в это же время в последней четверти канала, с  $Z/d = 9$  до  $Z/d = 12$ , структурные изменения происходят перед плоской крышкой радиального диффузора. В обеих упомянутых областях положение экстремума  $V_x$  приблизительно постоянно.

Кривая 2 на рис. 4 показывает поведение границы противотока потока (координата  $Y$  для  $V_z = 0$ ). Площадь противотока плавно уменьшается по направлению к горячему выходу трубы. Эта область становится незначительно шире с увеличением избыточного давления от 0,1 до 0,3 МПа, достигая в обоих случаях плоской пластины на границе горячего выхода, где по периферии через щель выходит воздух.

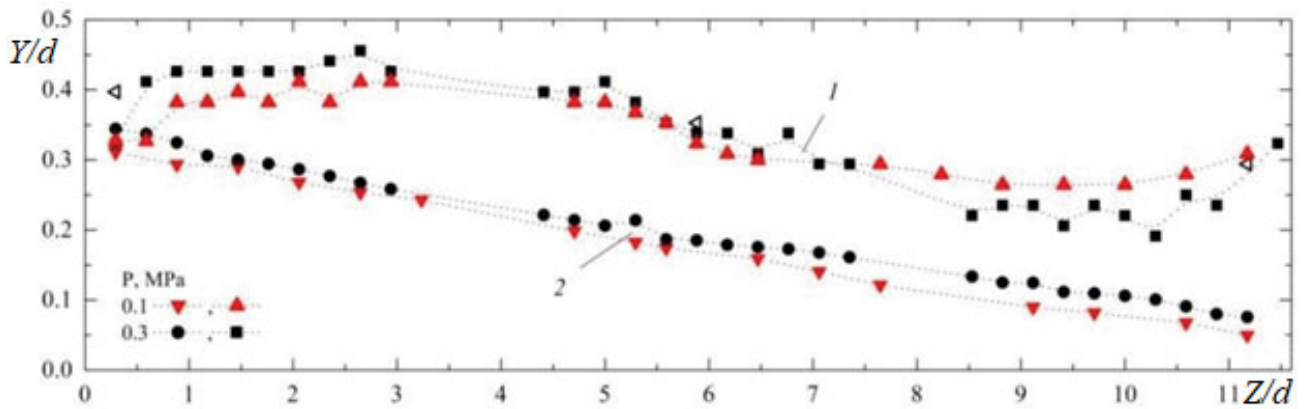


Рис. 4. Граница вихря ( $Y$ , где  $V_x$  максимальна) (1) и граница противотока ( $Y$ , где  $V_z = 0$ ) (2)

В середине рабочего канала линия 1 с достаточной степенью гладкая и с большим запасом кажется параллельной нижней линии 2 с координатами  $V_z = 0$ . Поэтому можно заметить, что отношение ширины  $\sigma$  обратного потока к расстоянию между точками экстремума вращательной скорости  $V_x$  составляет около 0,6 (рис. 5). При этом структура потока слабо зависит от избыточного давления.

Область обратного потока характеризуется квазитвердым вращением. Оно занимает почти всю ширину канала (рис. 7, а). Для потока, движущегося в сторону горячего выхода (рис. 7, в) скорость  $V_x$  почти равномерна, за исключением небольшого участка у стенки. Зелеными линиями обозначена зона квазитвердого вращения в каждом из сечений. Зона квазитвердого вращения совпадает с зоной обратного потока.

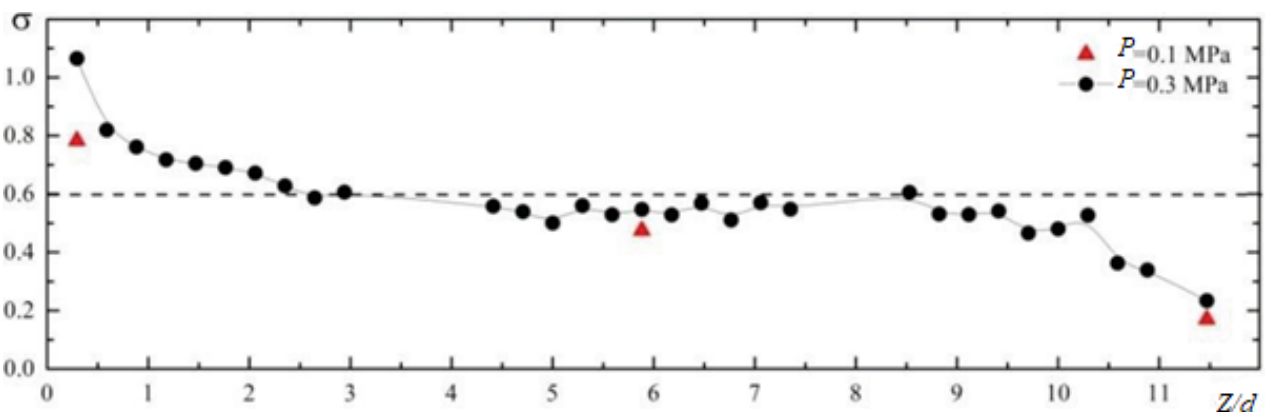


Рис. 5. Отношение ширины обратного потока к ширине между экстремумами значений  $V_x$  при  $X = 0$

На рис. 6 показано уменьшение максимального значения модуля  $V_x$  вдоль оси  $Z$ . На рис. 7 (а–в) эволюция профиля скорости продемонстрирована рисунками в трех поперечных сечениях.

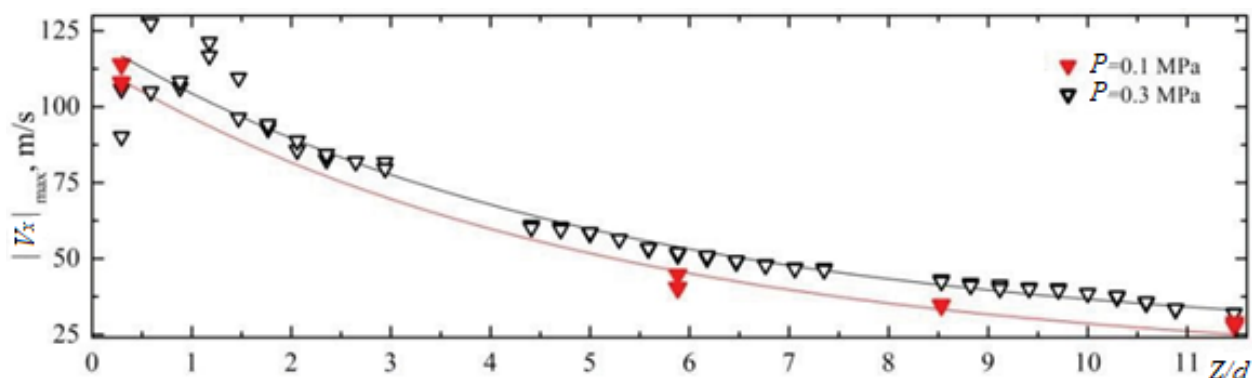


Рис. 6. Максимальные значения модуля  $V_x$  в плоскости  $X=0$

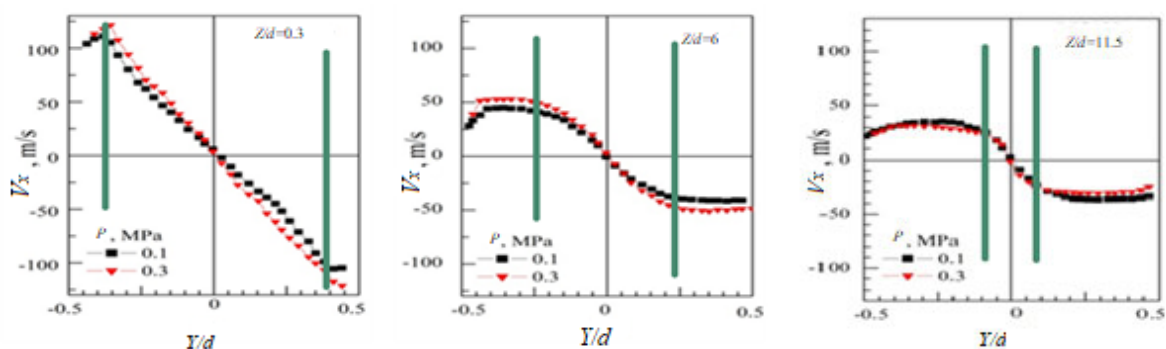


Рис. 7. Профили скорости  $V_x$  в плоскости  $X=0$  вдоль трех поперечных сечений:  $Z/d = 0,3$  (a),  $Z/d = 6,0$  (b),  $Z/d = 11,5$  (c)

### Заключение

Основные результаты для средней скорости следующие: область обратного потока достигает горячего конца трубы. Хотя граница обратного потока не проходит вблизи входного отверстия, ее форма становится похожей на окружность в середине канала и остается такой вдоль оси  $Z$ . Вращение квазитвердого тела происходит в области обратного потока.

Профиль  $V_x$  в плоскости  $X = 0$  аналогичен вихрю Рэнкина. Рассматривая произведение максимума  $V_x$  на рис. 7 и его координаты  $Y$  на рис. 4 в качестве оценки циркуляции скорости, мы можем видеть, что она уменьшается вдоль канала в несколько раз.

Отношение радиуса противотока к радиусу вихря остается равным 0,6 на протяжении почти всей длины канала, кроме областей у завихрителя и радиального диффузора.

### Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R.L. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Vol. 34, No 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. I. K. Kabardin, V. G. Meledin, N. I. Yavorsky, V. A. Pavlov, M. Kh. Pravdina, D. V. Kulikov, V. I. Polyakova. Comparing Ranque tubes of circular and square cross section // MATEC Web of Conferences. – 2017. Vol. 115, 02022.
5. R. Liew, J. C. H. Zeegers, G. M. Johannes, M. Kuerten and W. R. Michalek. 3D Velocimetry and droplet sizing in the Ranque–Hilsch vortex tube // Experiments in Fluids. - 2013. - Vol. 54, 1416-1432.
6. U. Doll, M. Beversdorff, G. Stockhausen, Ch. Willert, D. Schlüß, and Ch. Morsbach. 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, July 2014.
7. 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.

© М. Р. Гордиенко, Н. И. Яворский, В. И. Полякова, И. К. Кабардин, 2023