

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

## **Экспериментальное измерение пульсаций потока в вихревой трубе методом лазерной доплеровской анемометрии**

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

**Аннотация.** В данной работе исследуется вихревой эффект. Проводится подробное измерение профилей скорости и среднеквадратичных отклонений для двух показателей доли холодного расхода при одном давлении. Проводится анализ полученных полей скорости и пульсаций.

**Ключевые слова:** вихревой эффект, лазерная доплеровская анемометрия, пульсации

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

## **Experimental Measurement of Flow Pulsations in a Vortex Tube by Laser Doppler Anemometry**

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

**Abstract.** In this paper, the vortex effect is investigated. A detailed measurement of velocity profiles and standard deviations is carried out for two indicators of the proportion of cold flow at one pressure. The analysis of the obtained velocity and pulsation fields is carried out.

**Keywords:** vortex effect, laser Doppler anemometry, pulsations

### ***Введение***

Эффект Ранка-Хилша представляет собой терморазделение поступающего по касательной в трубу сжатого воздуха в два потока, с температурами выше и ниже исходной температуры. Этот эффект, открытый Ж. Ж. Ранком в конце 1920-х годов, несмотря на небольшой коэффициент полезного действия, имеет множество приложений в промышленности, таких как промышленная электроника, горячие и вредные производственные процессы, металлообработка, вентиляционные системы, перевозка овощей и фруктов, воздушные костюмы и маски.

В данной работе продолжают исследования, которые были начаты в работе [1]. В работе используется труба Ранка с квадратным поперечным сечением (рис. 1). С помощью метода лазерной доплеровской анемометрии были получены профили осевой и окружной скорости, а также среднеквадратичные отклонения для этих компонент скоростей. С помощью этих профилей были построены поля скорости. Данные по пульсациям необходимы для того, чтобы оценить интенсивность турбулентных пульсаций для численного моделирования, как в

работе [2], а также продвинуться в поиске механизма терморазделения в трубе, так как пульсации могут указывать на наличие крупномасштабных структур в потоке.

В работе [1] были проанализированы пульсации при доле расхода в холодный выход  $\mu = 0,4$  и при степени расширения  $\pi = 5$ . Анализ показал, что примерно от начала до середины трубы пульсации продольной скорости имеют максимумы там, где окружная скорость имеет наибольшее значение, то есть на радиусе вихря. Радиус вихря – это координата где средняя вращательная скорость максимальна. Как было показано в работе [3], этот радиус определяет границу циркуляционной зоны и является параметром подобия [4]. В тех же точках, близких к точкам максимальных пульсаций окружной скорости, было зафиксировано равенство продольной скорости критической скорости потока, которое было оценено по [5]. Достижение продольной скоростью потока значения критической скорости на границе циркуляционной зоны означает невозможность распространения возмущения этой границы вверх по потоку, что приводит к явлениям запираания и опрокидывания. Тем самым, двумя способами был выделен участок с характерными точками, где могло бы происходить увеличение температуры пристеночного потока в результате кризисной неустойчивости за счет конечных переходов по [5, 6]. Гипотеза о возможности осуществления такого процесса в вихревой трубе впервые предложена в [3].

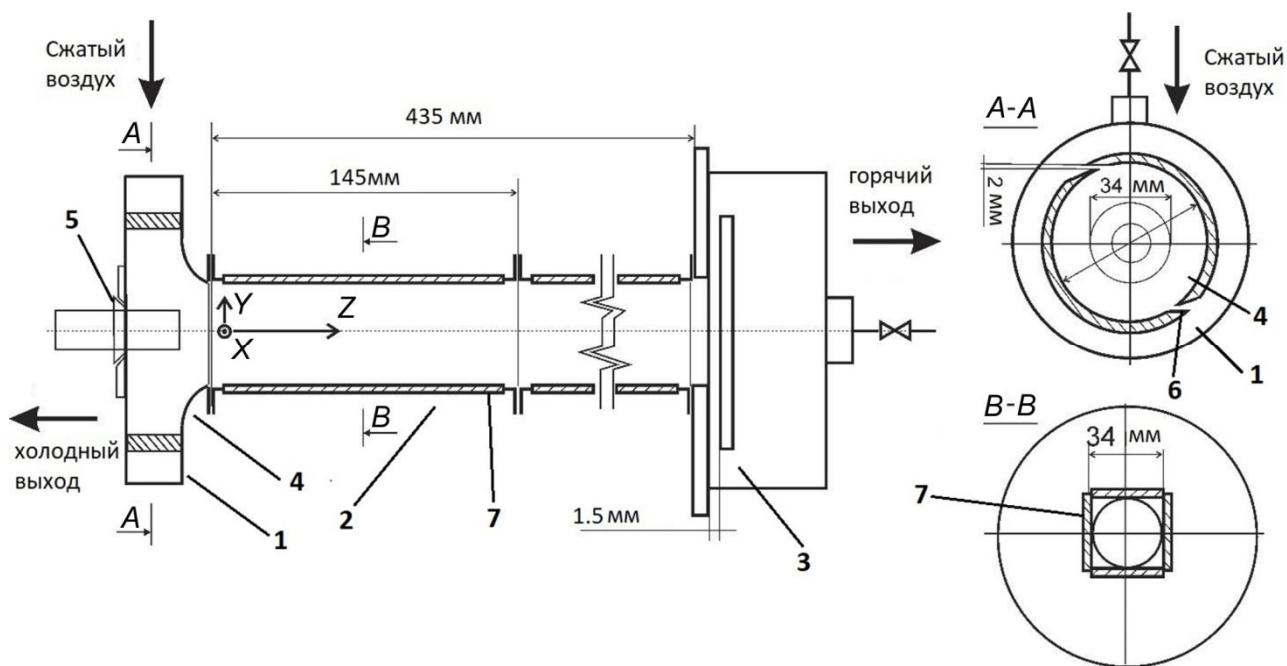


Рис. 1. Труба Ранка: 1 – вихревая камера, 2 – секция рабочего канала, 3 – радиальный диффузор на «горячем» выходе, 4 – завихритель, 5 – внешняя крышка вихревой камеры с трубкой «холодного» выхода, 6 – тангенциальные щели завихрителя, 7 – стенки рабочего канала с оптическими окнами

## Методы и материалы

Для исследований средней скорости потока и пульсаций в трубе была использована труба Ранка квадратного поперечного сечения, которая применялась и в работах [1, 3].

Схема трубы показана на рис. 1. Сжатый воздух из сети поступает в вихревую камеру, затем через две тангенциальные щели шириной 2 мм и общей площадью 80 мм<sup>2</sup> воздух поступает в завихритель радиусом 65 мм. После этого закрученный поток поступает через гиперболическую сужающую диафрагму в рабочий канал со стороной квадрата 34 мм. На горячем конце расположен радиальный диффузор, где нагретый воздух выходит по периферии, на холодном конце располагается диафрагма диаметром 16 мм, через которую охлажденный поток выходит наружу.

Труба устанавливалась на экспериментальный стенд, оснащенный датчиками давления и температуры, а также расходомерами на входе и выходах.

Средние скорости и пульсации потока измерялись с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии. В качестве прибора, использующего данный метод, был взят бесконтактный измеритель ЛАД-07. Подробно про принцип его работы написано в [7]. На рис. 2 показана краткая схема работы ЛАД-07.

Перемещение измерителя проводилось с помощью координатно перемещающего устройства с шагом 0,1 мм (рис. 3).

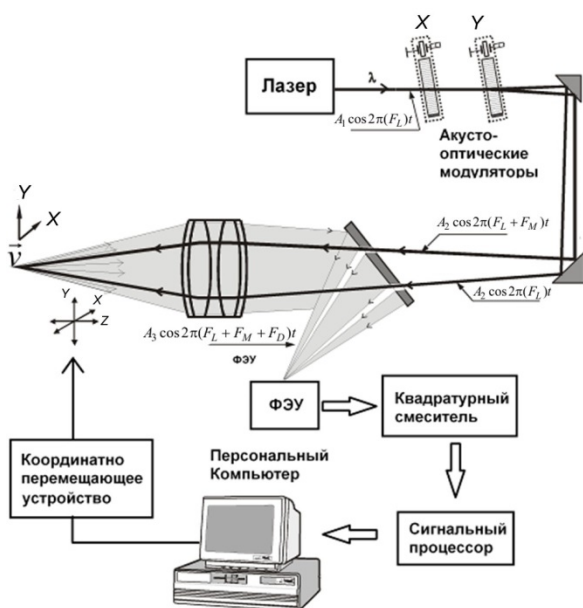


Рис. 2. Схема работы лазерно-доплеровского анемометра

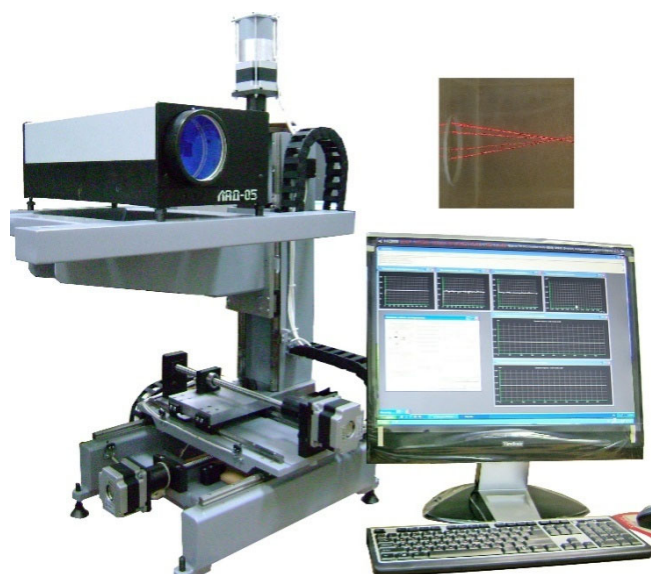


Рис. 3. Анемометр на координатно-перемещающем устройстве

Измерялись две компоненты средней скорости в плоскости  $X = 0$ : продольная –  $V_Z(Y, Z)$  и поперечная –  $V_X(Y, Z)$ , модуль которой в указанной плоскости совпадает с окружной скоростью  $V$  в полярных координатах (рис. 4). В каждой

точке измерения регистрировалось среднеквадратичное отклонение измеренной компоненты скорости от среднего значения: СКО ( $V_Z(Y, Z)$ ) и СКО ( $V_X(Y, Z)$ ). Переход к компонентам скорости в полярных координатах осуществляется осреднением модуля компоненты  $V_X(Y, Z)$  и значения продольной компоненты  $V_Z(Y, Z)$  по положительным и отрицательным значениям координаты  $Y$ . В настоящей работе такое осреднение не проводилось, и данные анализировались по экспериментальным таблицам в декартовых координатах (рис. 4).

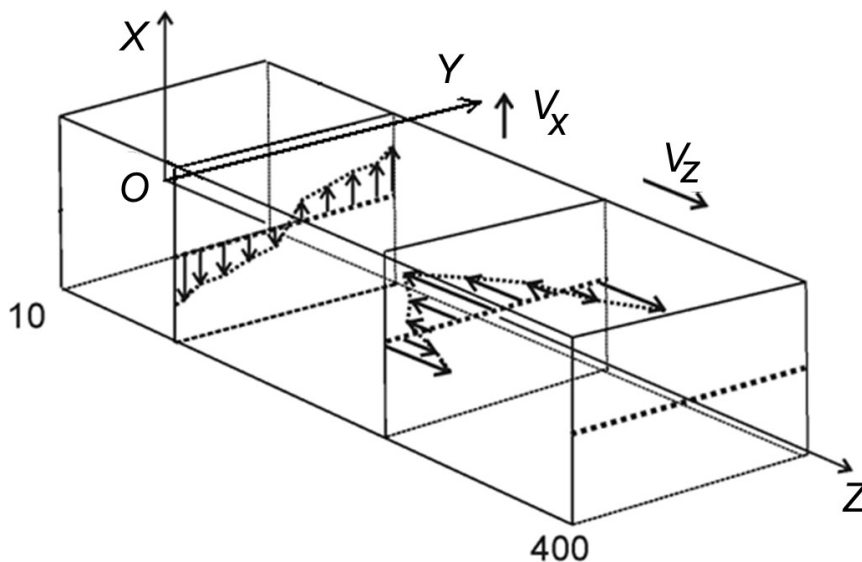


Рис. 4. Схема измерения профилей с помощью лазерного доплеровского анемометра

В каждой секции было измерено 12 поперечных профилей компонент скорости и среднеквадратичных отклонений с шагом 1 мм вдоль оси  $Y$ . Шаг в продольном направлении  $Z$  составлял 10 мм. Засев потока осуществлялся с помощью добавления трассеров в виде частичек дыма размером порядка 50...100 нм. В каждой точке измерения набиралась статистика от 100 до 4000 событий, после чего вычислялось среднее значение скорости и среднеквадратичное отклонение от него.

### **Результаты**

Значение степени расширения воздуха в устройстве было выбрано равным пороговому значению  $\mu = 5$ , при котором впервые наблюдается запирание скорости на входе, в результате чего при дальнейшем увеличении давления на входе не меняется значение объемного расхода и устанавливается кинематическая картина течения [1, 3].

На рис 5 показаны поля скоростей  $V_X(Y, Z)$  (рис. 5 а,в) и  $V_Z(Y, Z)$  (рис. 5 б,г). По графикам окружной скорости заметно, что для  $\mu = 0,75$  крутка спадает быстрее чем для  $\mu = 0,5$ . При этом поле скоростей для  $\mu = 0,75$  при похожем наборе статистики ЛАД-07 показывает более гладкий график по продольной и окружной скорости.

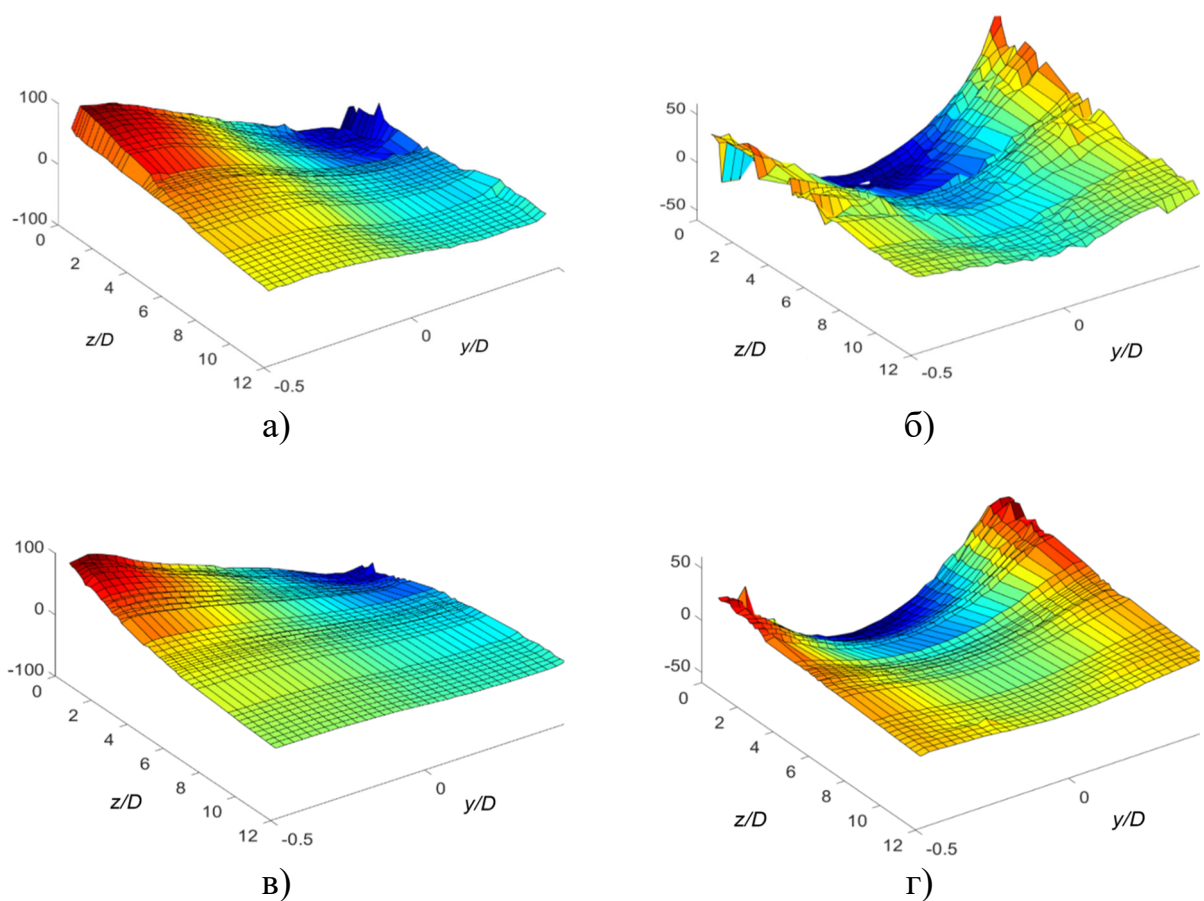


Рис. 5. Поверхности компонент осредненной скорости  $V_X(Y,Z)$  (а) и  $V_Z(Y,Z)$  (б) при  $\mu = 0,5$  (а, б) и при  $\mu = 0,75$  (в, г)

На рис. 6 показаны поля среднеквадратичных отклонений скоростей  $V_X(Y,Z)$  (рис. 6 а,в) и  $V_Z(Y,Z)$  (рис. 6 б,г). Как было отмечено в работе [1], максимум пульсаций поперечной компоненты скорости достигается на оси трубы, а максимумы пульсаций осевой компоненты скорости достигаются в области «радиуса вихря». Для  $\mu = 0,5$  и  $\mu = 0,75$  можно отметить хорошее соответствие данным полученным в [1], пульсации продольной скорости достигают действительно имеют наибольшее значение на радиусе вихря, в то время как пульсации поперечной скорости имеют наибольшее значение в центре канала и при этом, сохраняя одно и то же значение вдоль профиля, исключая центральную часть.

Усредненные температуры и расходы на входе ( $T_{in}$  и  $G_{in}$ ), а также на холодном ( $T_c$  и  $G_c$ ) и горячем ( $T_h$  и  $G_h$ ) выходах представлены в табл. 1.

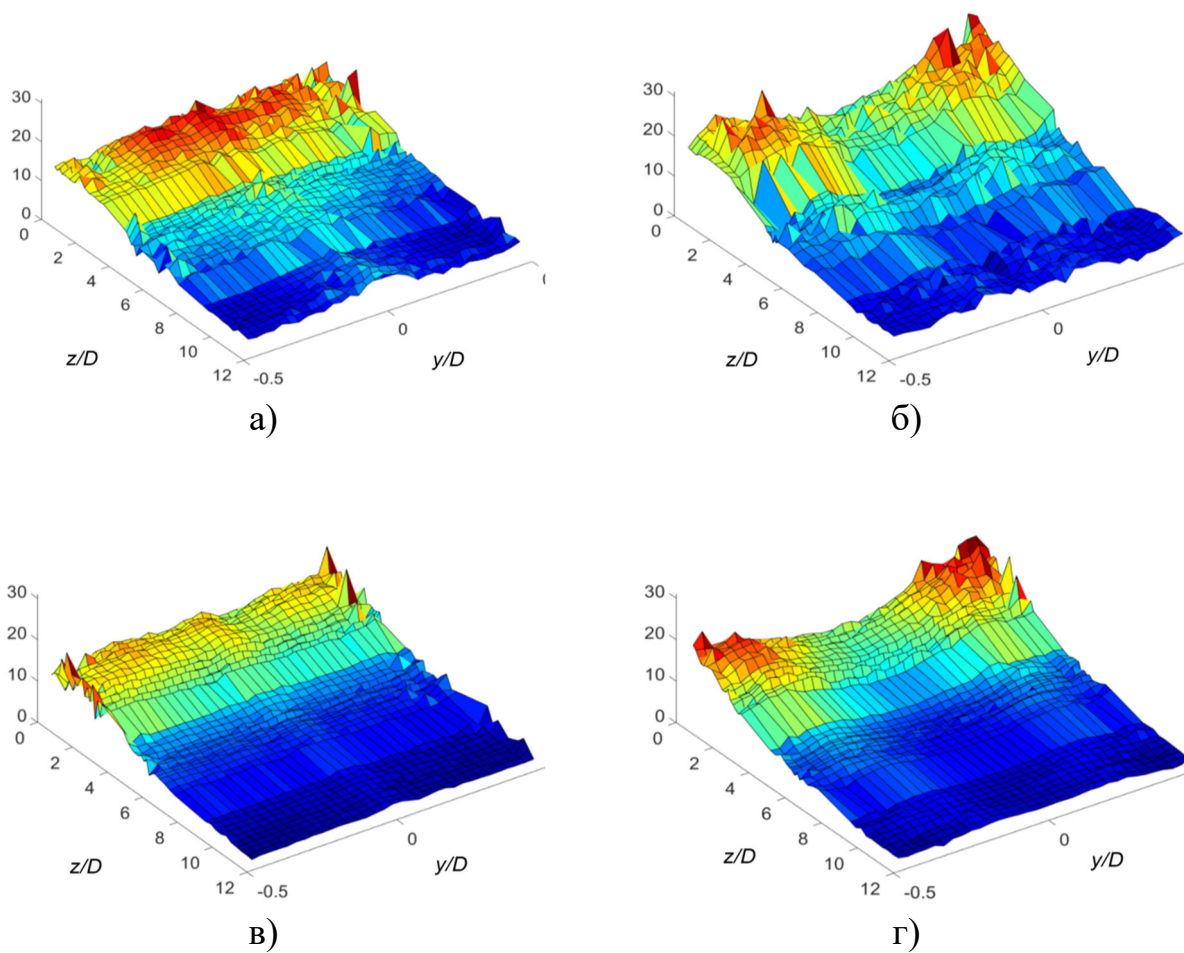


Рис. 6. Поверхности среднеквадратичного отклонения компонент осредненной скорости СКО  $V_x(Y,Z)$  (а) и СКО  $V_z(Y,Z)$  (б) при  $\mu = 0,5$  (а, б) и  $\mu = 0,75$  (в, г)

Таблица 1

Режимные параметры на входе и выходах во время эксперимента

	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_{in}, ^\circ\text{C}$	$G_c, \text{н.м}^3/\text{ч}$	$G_h, \text{н.м}^3/\text{ч}$	$G_{in}, \text{н.м}^3/\text{ч}$
$\mu = 0,5$	8,3	28,8	18,7	133,4	112,9	226,3
$\mu = 0,75$	15,6	27,4	19,3	139,9	48	187,9

### Обсуждение

На рис. 7 и 8 соответственно для  $\mu = 0,5$  и  $0,75$  показаны линии максимального модуля поперечной скорости на положительных и отрицательных отрезках оси  $Y$  (а) и процентная доля пульсаций продольной скорости  $\sigma_z = 100 \cdot \text{СКО}(V_z)/V_z$  (б) вдоль этих линий. Видно, что на обоих графиках рис. 6 выбросы по пульсациям достигают 100% и выше в начальном участке потока, но после  $Z/D \approx 5$  их уровень резко снижается до 50–60%.

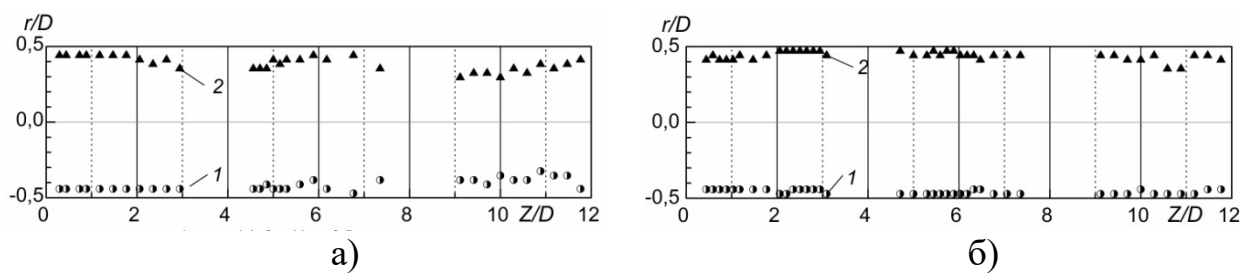


Рис. 7. Линии максимальной поперечной скорости для  $\mu = 0,5$  (а) и  $\mu = 0,8$  (б)

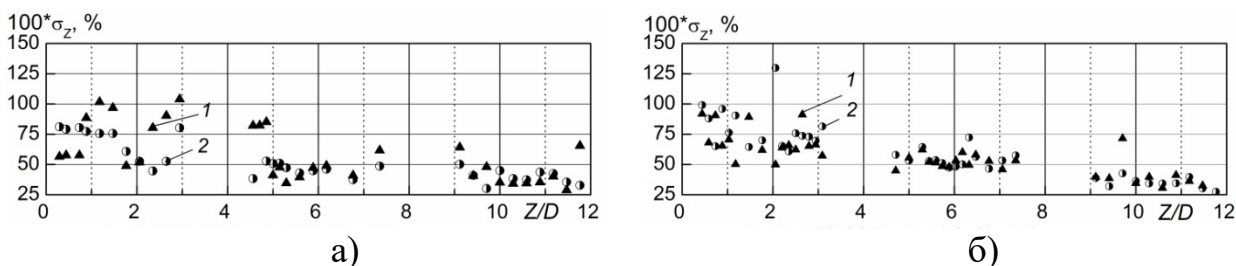


Рис. 8. Процентная доля пульсаций продольной скорости:  $\sigma_z = 100 * \text{СКО}(V_z) / V_z$  для  $\mu = 0,5$  (а) и  $\mu = 0,75$  (б) на линиях максимальной поперечной скорости

### Заключение

В предложенном исследовании показаны и проанализированы детальные измерения поперечной (окружной) и продольной (осевой) компонент средней скорости, а также их среднеквадратичные отклонения для двух показателей доли холодного расхода  $\mu = 0,5$  и  $\mu = 0,75$  при степени расширения  $\pi = 5$ . Такого рода измерения важны не только для проверки гипотез о физическом механизме терморазделения, но и для верификации расчетных моделей для сильно закрученных потоков.

### Благодарности

Экспериментальное исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабардин И.К. Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша методом ЛДА // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – Т. 9, № 5. – С. 709–717.
2. Kabardin I. K., Yavorsky N. I., Meledin V. G., Pravdina M. Kh., Gordienko M. R., Ezendeeva D. P., Kakaulin S. V., Usov E. V., Klimonov I. A., Krotov S. V., Bakakin G. V., Kabardin A. K., Sadbakov O. Yu. Determining experimental applicability limits of Spalart-Almares turbulent model and Reynolds stresses transfer model at mass transfer intensification in rotary-divergent controlled flows // IOP Journal of physics: conf. series. – 2019. – Vol. 1359. – P.012096.
3. 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 // Прикл. механика и технич. физика. – 2020. – Т. 61, № 3. – С. 82–89.
4. Лебедев А.В., Правдина М.Х. Плоская модель течения в вихревой камере. Теплофизика и Аэромеханика. – 1966. – Т. 3, № 3, – С.259–264.

5. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Машиностроение, 1968. 496 с.
6. Benjamin T.B. Theory of the vortex breakdown phenomenon // J. Fluid Mech. – 1962. – P. 593–629.
7. Gordienko M.R., Kabardin I.K., Meledin V.G., Kabardin A.K., Pravdina M.Kh, Rahmanov V.V., Kakaulin S.V., Pavlov V.A., Yavorsky N.I. Development of the method of laser Doppler anemometry for diagnostics of turbulent flows at high speed // J. of Physics: Conf. Series. – 2021. – Vol. 2119, Iss. 1. – P. 012110-1–012110-6.

© М. Р. Гордиенко, И. К. Кабардин, М. Х. Правдина, В. И. Полякова, 2024