

## ТЕПЛОФИЗИКА

**УДК 532.51, 532.52**

**И.В. Литвинов, С.И. Шторк, С.В. Алексеенко**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ЗАВИХРИТЕЛЕ**

Сильнозакрученные течения используются в большом количестве технических устройств, таких как вихревые трубы, гидроциклоны, циклонные сепараторы, горелки и циклонные топки [1]. Сильная закрутка в таких устройствах достигается за счет тангенциально вводимой в камеру среды, которая выходит из камеры через центральное сопло в виде закрученной струи. Многими исследователями изучались различные особенности аэродинамики вихревых камер и происходящих в них процессов.

К наиболее полному источнику информации о закрученных потоках с точки зрения технических приложений можно отнести монографию А. Гулты и др. [2]. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований вихревых течений представлено в недавней монографии [3]. Несмотря на достаточно долгую историю исследования вихревых течений, все еще остается ряд эффектов, полное научное объяснение которых далеко до завершения [4]. К наименее изученной области относятся явления, связанные с неустойчивостью потока, такие как распад вихря и прецессия вихревого ядра (ПВЯ). В настоящее время выходит в печать большое количество публикаций, в которых авторами проводятся численные расчеты и их верификация по отдельным экспериментальным данным для конкретных технических устройств (например, [5-6]).

Экспериментальные же исследования в большинстве случаев представляют собой лишь качественную картину, иногда данные приводятся без определяющих параметров, поэтому невозможно добиться воспроизведения результатов при математическом моделировании. Кроме того, как правило, экспериментальные данные не содержат информации о частотных характеристиках нестационарного закрученного потока [7].

Поэтому важно иметь в распоряжении комплексные экспериментальные данные, такие как входные профили, поля скоростей и пульсаций в различных сечениях потока, частотные характеристики течения при различных степенях закрутки и расходах. Такой полный набор экспериментальных данных необходим для разработки теоретических подходов к описанию таких феноменов, как распад вихря и ПВЯ [3, 8]. Поэтому, целью данной

работы являлось получение детальной экспериментальной информации о закрученной струе при нестационарных режимах с формированием выраженного ПВЯ. Эксперименты включают измерение профилей 3-х компонент скорости и пульсаций скорости на срезе сопла камеры, изолиний осевой скорости и пульсаций осевой скорости в продольном сечении камеры, а также частотных характеристик ПВЯ в зависимости от различных параметров закрутки и расхода.

В качестве исследуемого объекта данной работы была выбрана вихревая камера с тангенциальным завихрителем. Данная геометрия является изотермической моделью типичных вихревых горелок, а также упрощенной моделью циклона, и представляет собой осесимметричную камеру с двумя входными патрубками и одним выходным соплом (рис. 1). Следуя работе [2], определяющими параметрами для такой геометрии выбраны конструктивный параметр закрутки  $S$  и расходный

$$\text{параметр} - \text{число Рейнольдса } Re = \frac{D_e U_0}{\nu} \quad (U_0 - \text{среднерасходная скорость на срезе сопла, } \nu - \text{кинематическая вязкость}). \quad \text{Конструктивный параметр закрутки определялся согласно [2], аналогично циклонным камерам: } S = \frac{\pi D_e D_0}{4 A_T}, \text{ где } D_e \text{ и}$$

$$A_T$$

$D_0 = 145 \text{ мм}$  – соответственно, диаметры выходного сопла и основной части циклонной камеры,  $A_T$  – площадь тангенциальных входных патрубков с диаметром 40мм. Используя 3 сменных выходных сопла с  $D_e$  равным 30, 40 и 52 мм, варьировался параметр  $S$ , который принимал значения 1.4, 1.8, 2.4, соответственно.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В качестве рабочей среды использовался атмосферный воздух, который подается в рабочий участок 5 воздуховодкой 7. Расход в системе контролировался за счет изменения частоты вращения двигателя воздуховодки с помощью частотного преобразователя 2 и поддерживался постоянным в пределах точности расходомера 8 (сужающее устройство с дифференциальным манометром), т.е. порядка 1-1.5%. Расход варьировался с персонального компьютера (ПК) 10 по интер-

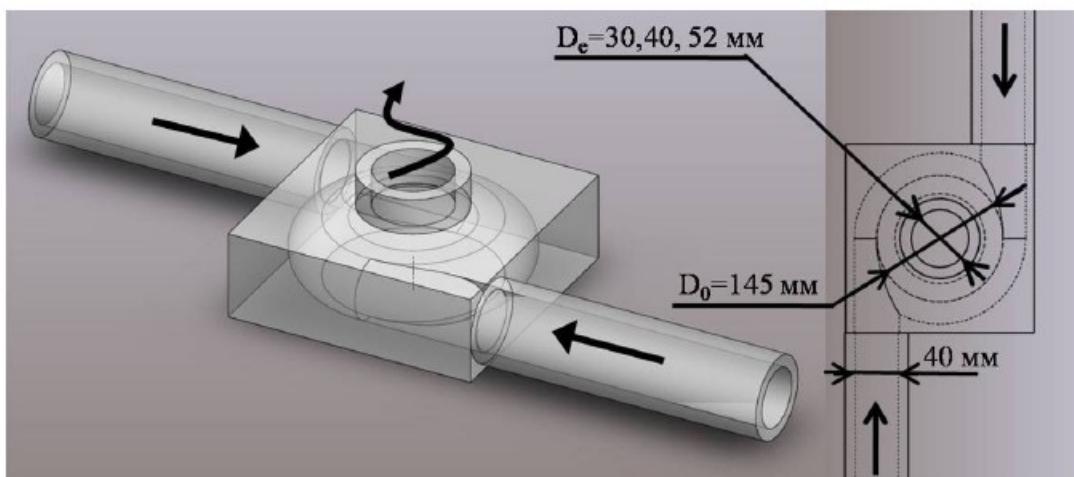


Рис.1. Геометрия тангенциального завихрителя (стрелками показано направление потока воздуха)

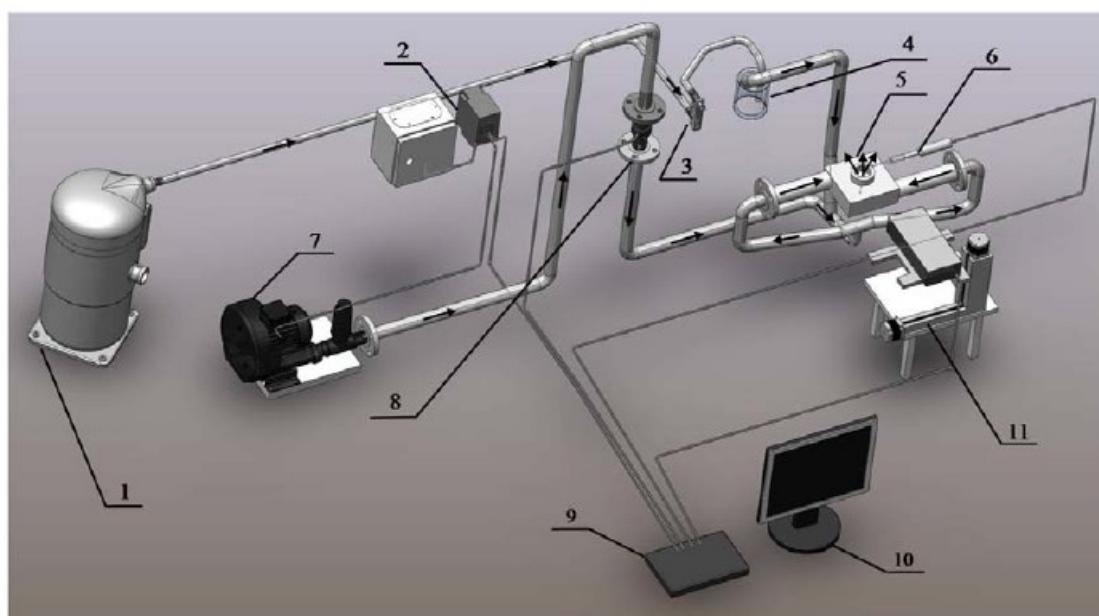


Рис.2. Схема экспериментальной установки (стрелками показано направление потока воздуха):  
1 – компрессор, 2 – частотный преобразователь, 3 – ротаметр, 4 – генератор аэрозоля, 5 – тангенциальный завихритель, 6 – микрофон с отборником давления, 7 – воздуходувка, 8 – расходомерная шайба с датчиком перепада давления и аналоговым выходом, 9 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), 10 – персональный компьютер (ПК), 11 – система лазерно-допплеровского анемометра (ЛДА) с координатно-перемещаемым устройством (КПУ)

файсу RS-485. Аналоговый сигнал с датчика перепада давления на сужающем устройстве, соответствующий текущему расходу, оцифровывался с помощью АЦП 9 и записывался на жесткий диск ПК в режиме реального времени. С помощью двухкомпонентной системы лазерно-Допплеровского анемометра ЛДА-0би и координатно-перемещающего устройства (КПУ) 11, работающих со специальной управляющей программой, профили и поля скоростей в турбулентном потоке измерялись в данной точке в автоматизированном режиме. Далее измерительный объем ЛДА позиционировался управляющей программой, согласно установленному координатному плану, в новую пространственную точку, где система производила новые измерения. Всего в

каждой измерительной точке фиксировалось  $\approx 5$  тыс. вспышек.

В качестве рассеивающих частиц для получения допплеровского сигнала использовались капли парафинового масла, которые производились с помощью генератора аэрозоля 4 (схема генератора аэрозоля показана рис. 3, а). Вдув воздуха в генератор осуществлялся с помощью компрессора 1, расход измерялся ротаметром 3. Полученный аэрозоль инжектировался в основной поток воздуха перед входом в рабочий участок. Использованный генератор аэрозоля позволял получать частицы масла размером порядка 1-2 мкм [9], которые хорошо следуют за потоком воздуха.

Для измерения пульсаций статического давления на срезе сопла камеры был установлен мик-

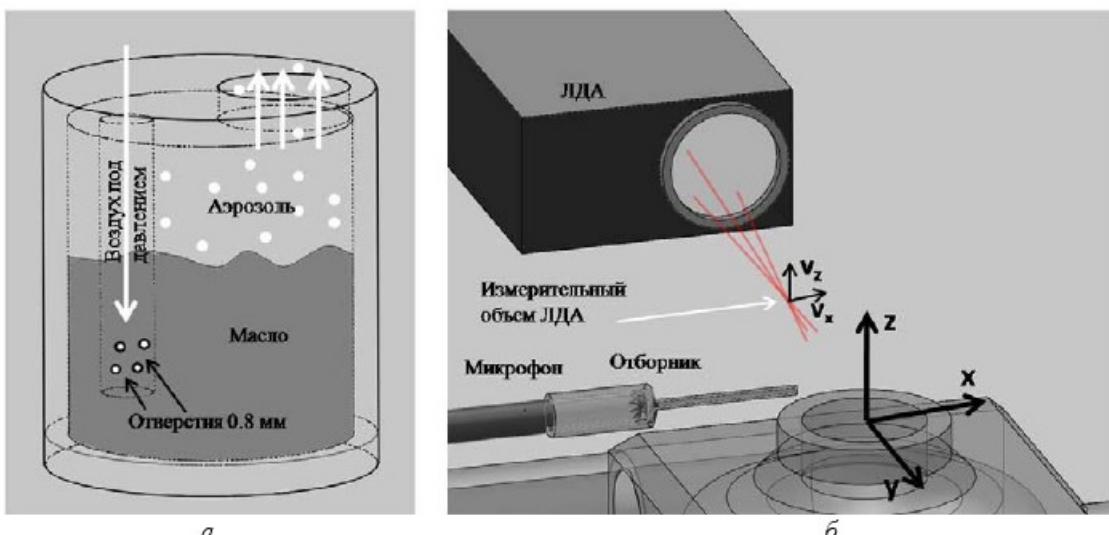


Рис. 3. Экспериментальная техника: а – конструкция генератора аэрозоля, б – положение микрофона и оптического блока ЛДА относительно сопла завихрителя

рофон со специальным наконечником в виде тонкого капилляра (рис. 3, б). Известно, что такой отборник изменяет амплитуду и фазу выходного сигнала [10], но в нашей работе это не учитывалось, т.к. исследования пульсаций давления ограничивались только частотными измерениями. Таким образом, тонкий отборник позволял, минимально возмущая поток, измерять частоту пульсаций давления, соответствующей частоте ПВЯ. Выходной сигнал микрофона оцифровывался с помощью АЦП и записывался на ПК в режиме реального времени вместе с выходным сигналом системы измерения расхода воздуха.

В процессе исследований были проведены эксперименты для получения информации о полях скоростей в тангенциальном завихрителе при различных параметрах закрутки. На рис. 3, б изображена использованная система координат с началом, находящемся на осевой линии на высоте среза сопла. Также на рисунке изображены компоненты, которые измерялись ЛДА -  $V_z$  и  $V_x$ .

На рис. 4а представлены радиальные профили средней безразмерной тангенциальной, осевой и радиальной компонент скорости на срезе сопла для  $S=1.4, 1.8, 2.4$ . Ось  $z$  на графиках соответствует радиальному положению измерительной точки относительно центра сопла. При этом профили осевой и радиальной компонент скорости были получены при перемещении измерительного объема ЛДА вдоль координаты  $x$ , а тангенциальная компонента была измерена вдоль координаты  $y$ . По профилям осевой скорости видно формирование струи прижатой к краям сопла  $r \approx 0.5d$ , причем правый фронт все ближе смещается к  $r \approx 0.5d$  с увеличением закрутки. При этом также увеличивается провал аксиальной скорости на оси сопла. Можно также видеть, что на профилях тангенциальной компоненты для  $S=1.8$  и  $2.4$  в приосевой области до радиуса порядка  $0.1-0.15D_e$  имеется участок с близкой к нулю тангенциальной скоро-

стью. Это может объясняться тем, что вихревое ядро, прецессируя вблизи измерительного объема ЛДА, дает вклад как положительной, так и отрицательной тангенциальной скорости. Поэтому, при осреднении получается значение скорости, близкое к нулю. Таким образом, закрученный поток истекает из сопла в виде кольцевой закрученной струи. Профили радиальной скорости показывают, что эта кольцевая струя с внутренней и внешней границами на радиусах  $0.3D_e$  и  $0.5D_e$ , соответственно, расширяется.

Интересно также отметить, что от оси до радиуса  $0.3D_e$  и далее от края сопла к периферии поток сходится к оси, что связано с течением воздуха в центральной рециркуляционной зоне и эжектированного воздуха из окружающего пространства, соответственно.

На рис. 4б приведены профили пульсаций осевой, тангенциальной и радиальной компонент скорости. Выраженные центральные максимумы пульсаций тангенциальной и радиальной компонент скорости подтверждают наличие в потоке одиночного прецессирующего вихревого ядра, поскольку моды неустойчивости с азимутальными волновыми числами больше единицы вследствие симметрии не возмущают течение на оси потока [3]. Распределения пульсаций осевой скорости демонстрируют ожидаемые максимумы, соответствующие слою смешения на границе центральной зоны возвратного течения. Обращает также внимание максимумы пульсаций радиальной скорости на периферии закрученной струи, возможно, указывающие на образование во внешнем слое смешения крупномасштабных вторичных вихрей [10].

На рис. 5 представлены изолинии средней осевой скорости для 3-х различных параметров закрутки, полученные в плоскости  $x-z$  (рис. 3, б). Измерительные точки находились через каждые 2 мм по горизонтали и каждые 10 мм по вертикали,

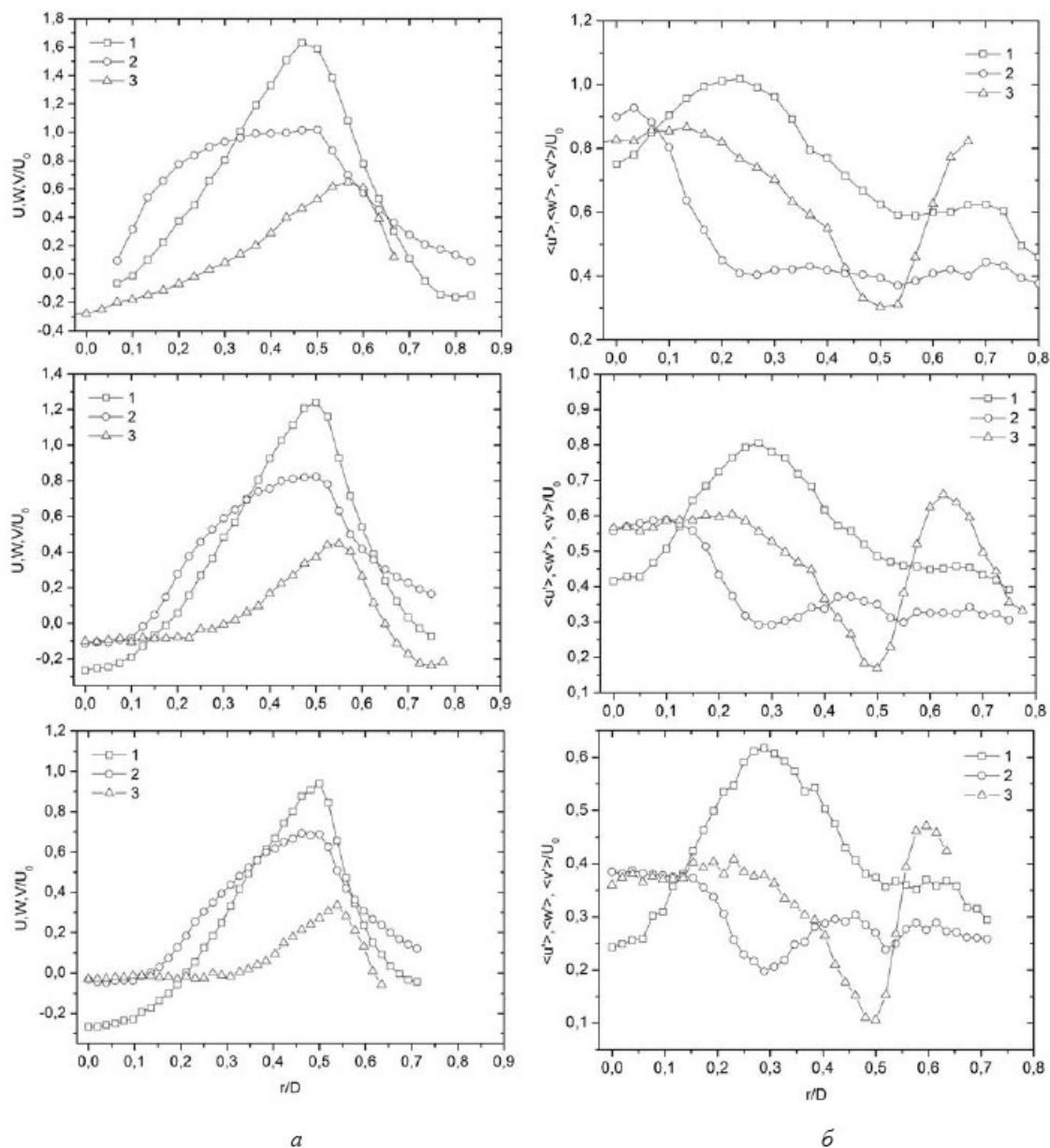


Рис. 4. Профили скоростей на срезе сопла ( $z = 0$ ): а – средней скорости, б – пульсаций скорости, 1 – осевой, 2 – тангенциальной, 3 – радиальной компонент для  $S=1.4, 1.8, 2.4$  сверху вниз соответственно ( $Re \approx 25 \cdot 10^3$ , обезразмеривание произведено по среднерасходной скорости  $U_0 = 12.7$  м/сек)

в каждой точке набиралась статистика порядка 5 тыс. вспышек ЛДА за 120 секунд. Данные обезразмерены на диаметр сопла и среднерасходную скорость.

Полученные картины течения демонстрируют формирование кольцевой закрученной струи, смещенной к периферии сопла, а также ярко выраженной приосевой зоны возвратного течения (зоны рециркуляции) для всех диаметров сопла (область на рисунке показана белым цветом). Такая зона характеризуется отрицательной осевой скоростью, которая может составлять до 80% от среднерасходной (рис. 5, а).

Для параметра закрутки  $S=2.4$  зона рециркуляции проникает внутрь сопла. Как можно увидеть из приведенных рисунков модуль минималь-

ного значения осевой скорости  $U$  уменьшается с увеличением параметра закрутки от  $-0.8U_0$  до  $-0.4U_0$ , что вызвано уменьшением степени разрежения из-за расширения сопла.

На рис. 6 приведены изолинии пульсаций осевой скорости для трех параметров закрутки, полученные в сечении  $x-z$  (рис. 3, б). По рисункам видно, что максимальный уровень пульсаций находится на расстояние  $r \approx 0.25d$  от оси струи. Это соответствует внутреннему слою смешения, то есть границе раздела между возвратным и прямым потоками. Видно также, что уровень пульсаций гораздо выше, чем во внешнем слое смешения (см. также рис. 4, б для  $S=1.4$ ), и достигает для наименьшего параметра закрутки уровня 100%.

Многие исследователи, в частности [11], от-

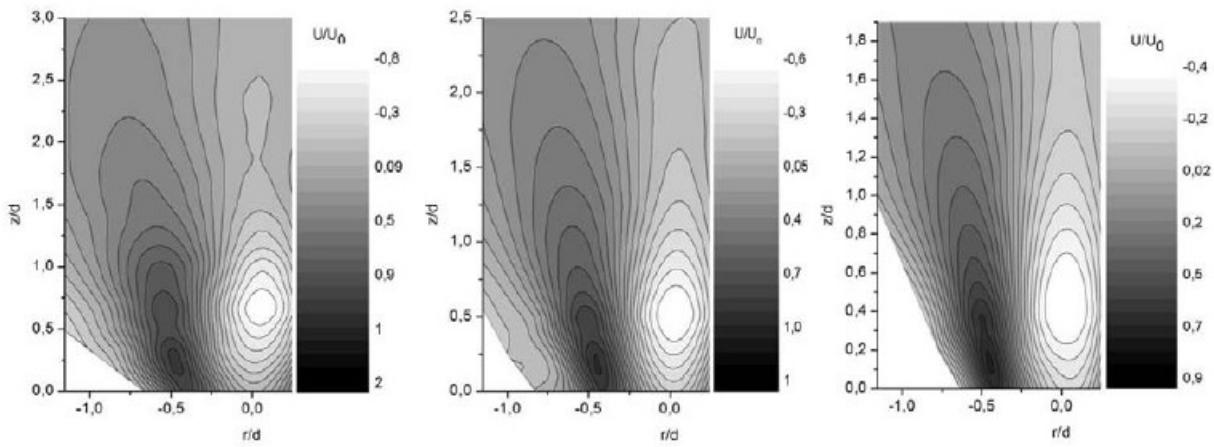


Рис.5. Изолинии средней осевой скорости: а –  $D=30$  мм,  $S=1.4$ ; б –  $D=40$  мм,  $S=1.8$ ; в –  $D=52$ ,  $S=2.4$  ( $Re \approx 25 \cdot 10^3$ ,  $U_0=12.7$  м/сек,  $Q=9$  л/сек)

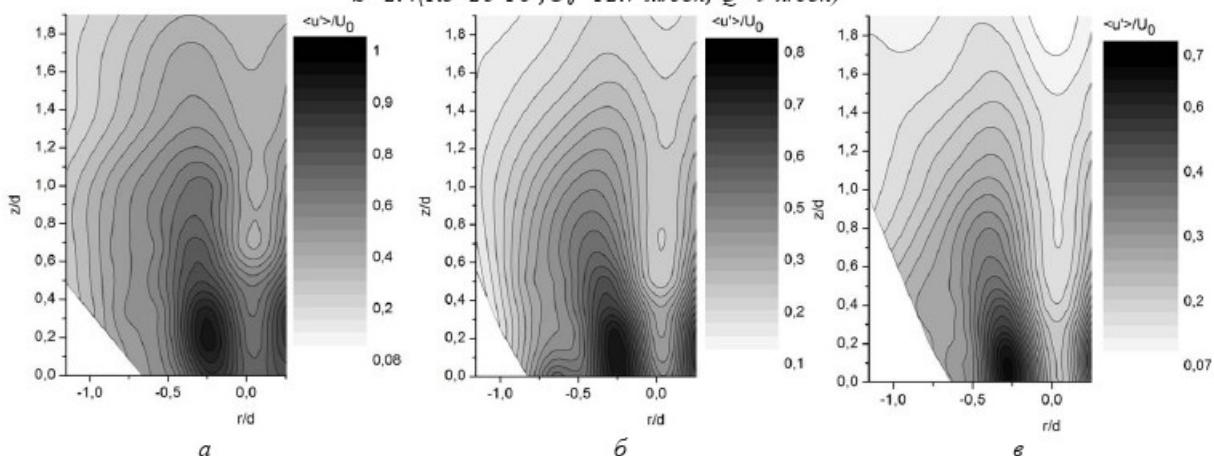


Рис.6. Изолинии пульсаций осевой скорости: а –  $D=30$  мм,  $S=1.4$ ; б –  $D=40$  мм,  $S=1.8$ ; в –  $D=52$ ,  $S=2.4$ . ( $Re \approx 25 \cdot 10^3$ ,  $U_0=12.7$  м/сек,  $Q=9$  л/сек)

мечают, что генерация ПВЯ сопровождается возникновением зоны рециркуляции вдоль оси зачерченного потока. Это соответствует нашим данным. В нашем случае присутствие ПВЯ подтверждается, кроме того, частотными измерениями, приведенными ниже, а также присутствием низкочастотного звука, который генерирует тангенциальный завихритель, также как и в [12].

Для определения частоты ПВЯ микрофон с отборником давления помещался на срезе сопла камеры. Сигнал пульсаций давления регистрировался в течение 60 секунд с частотой дискретизации АЦП 5 кГц. Далее полученные массивы данных обрабатывались с использованием численного Фурье-преобразования. Основная гармоника с максимальной амплитудой в полученных спектрах соответствовала частоте ПВЯ.

На рис. 7 приведены характерный сигнал пульсаций давления, записанный с помощью микрофона, спектры пульсаций давления и пульсаций тангенциальной скорости, измеренной с помощью ЛДА. Частоты с максимальной амплитудой в спектрах совпадают и равны 114.7 Гц. Измерение частоты ПВЯ с помощью ЛДА представляет собой более трудоемкий эксперимент, чем с помощью микрофона.

Ко всему прочему, для измерений спектров с помощью ЛДА требуется производить процедуру численной регуляризации данных ЛДА, так как момент прохождения частицы через измерительный объем ЛДА – это случайный процесс. При этом требуется длительное время, чтобы накапливать достаточную статистику для спектральных измерений. Поэтому в данной работе измерения частоты прецессии ПВЯ выполнялись с помощью микрофона.

Зависимость частоты прецессии от расхода воздуха в большом диапазоне для 3 различных параметров закрутки приведена на рис.8. Как видно, частота  $f$  линейно растет с расходом  $Q$ . Этот факт был установлен и для других тангенциальных завихрителей [13]. Видно также, что различным параметрам закрутки соответствуют различные углы наклона прямой.

На рис.9 изображен график зависимости числа Струхала  $St = \frac{fD_e}{U_0}$ , имеющего смысл безразмерной частоты, от числа Рейнольдса. Можно говорить об автомодельности  $St$  относительно  $Re$ , начиная с  $Re \approx 10^4$ .

Эта зависимость дает возможность, например,

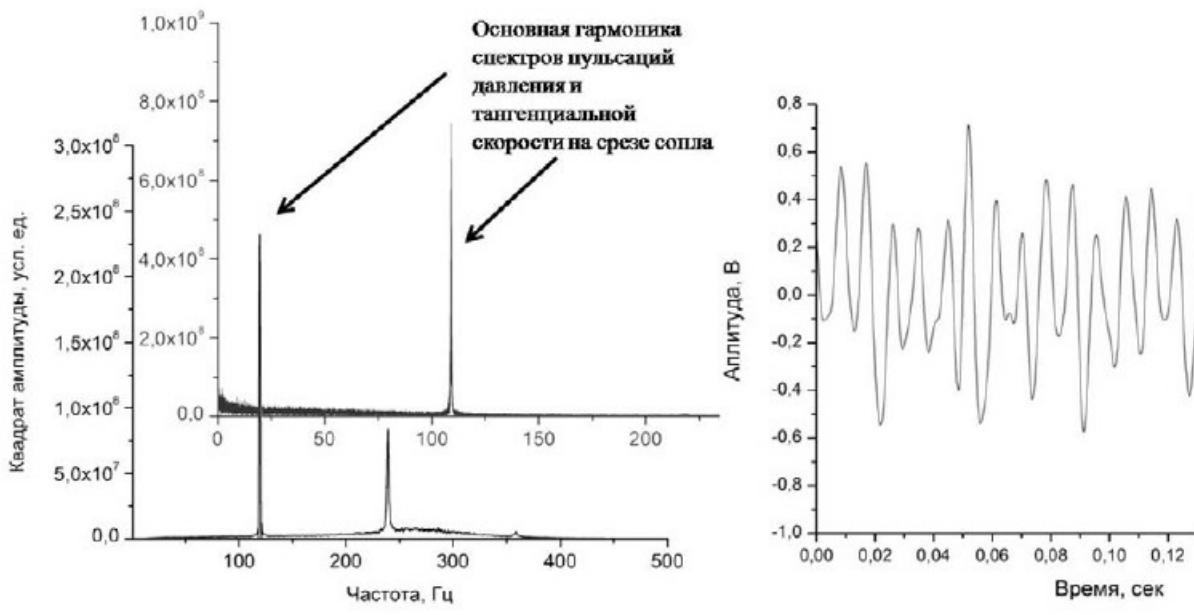


Рис. 7. Графики для определения частотных характеристик ПВЯ: а – сверху: спектр ЛДА, снизу: спектр микрофона, б – характеристическая временная реализация сигнала, полученного с микрофона

применения вихревой камеры в качестве расходомера.

Лопаточные завихрители уже используются для измерения расхода влажного газа в промышленности [14], что позволяет рассчитывать на перспективы использования тангенциальных завихрителей в данной области, поскольку в тангенциальных завихрителях отсутствуют гидродинамические потери, связанные с обтеканием лопаток, и проблемы эрозионного износа лопаток из-за химической агрессивности сред или наличия абразивных примесей.

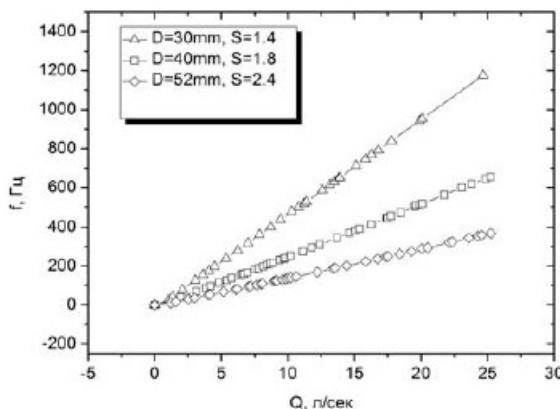


Рис. 8. Зависимость частоты прецессии от расхода воздуха

Можно также видеть, что  $St$  является линейной функцией конструктивного параметра закрутки  $S$  (здесь  $St$  определено при фиксированном значении  $Re=30 \cdot 10^3$ ) (см. рис.10), однако этот факт необходимо проверить для большего диапазона чисел  $S$ .

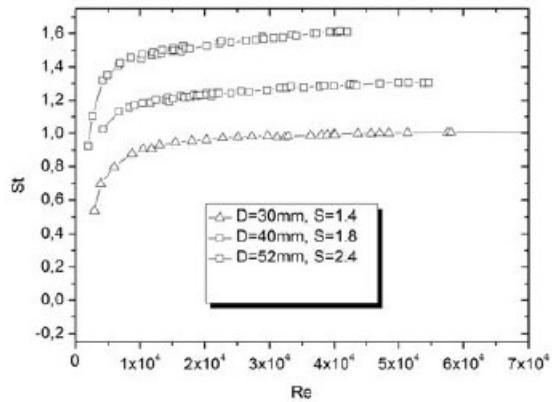


Рис.9. Зависимость  $St$  от  $Re$

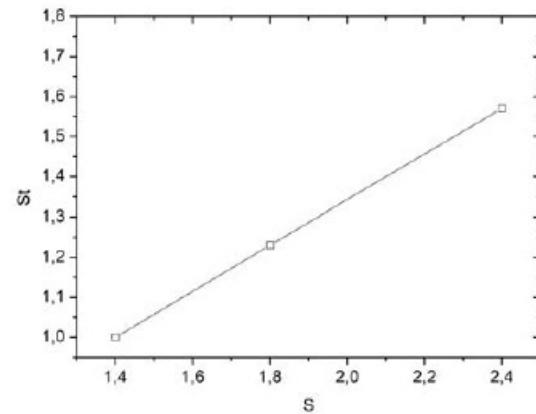


Рис.10. Зависимость  $St$  от  $S$

Таким образом, в данной работе проведено систематическое экспериментальное исследование интенсивно закрученного турбулентного потока на выходе из тангенциального завихрителя. Силь-

ная закрутка потока приводит к генерации сильной нестационарности течения в форме прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). В статье представлены детальные экспериментальные данные по характеристикам пульсационного течения с ПВЯ, включая профили средних скоростей, пульсаций на срезе сопла, поля скоростей осевой компоненты в продольном сечении, а также частотные характеристики ПВЯ. Результаты получены для трех параметров закрутки  $S=1.4, 1.8, 2.4$  и в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Представленные в работе экспериментальные данные могут быть полезны для построения теоретических подходов к описанию ПВЯ, а также для верификации

численных расчетов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), гранта Правительства России № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К.Ханъялич, НГУ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смульский, И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. – Новосибирск : ВО “Наука”. Сибирская издательская фирма, 1992 г.-301 с.
2. Гупта, А. Закрученные потоки: Пер. с англ./ Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. – М.: Мир, 1987. – 588 с., ил.
3. Алексеенко, С.В. Введение в теорию концентрированных вихрей/ Алексеенко С.В., Кубин П.А., Окулов В.Л. / -Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. -504с.
4. Syred, N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. // Progress in Energy and Combustion Science, 2006, Vol. 32 (2), pp. 93–161.
5. Derk森, J.J. Simulation of vortex core precession in a reverse-flow cyclone./ Derksen J.J., Van den Akker H.E.A. // AIChE Journal, 2000, Vol. 46, pp. 1317–1331
6. Ranga Dinesh, K.K.J. Study of jet precession, recirculation and vortex breakdown in turbulent swirling jets using LES. / Ranga Dinesh K.K.J., Kirkpatrick M.P. // Computers & Fluids, June 2009, Volume 38, Issue 6, pp. 1232–1242.
7. Bettocchi, R. Experimental investigations into vortex flow in a straight, annular section channel. /Bettocchi R., Cantore G./ International Journal of Heat and Fluid Flow, September 1984,Volume 5, Issue 3, pp. 185–189
8. Alekseenko, S.V. Helical vortices in swirl flow / Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. / J. Fluid Mech. - 1999. - Vol. 382. - P. 195-243.
9. Echols, W.H. Studies of portable air-operated aerosol generators. /Echols W.H., Young J.A. / - Naval research laboratory report, July 26 1963, 16 c.
10. Cala, C.E. Coherent structures in unsteady swirling jet flow. / Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. // Exp. Fluids, 2006, Vol. 40, No. 2, pp. 267-276.
11. Yazdabadi, P.A. Characterization of the PVC phenomena in the exhaust of cyclone dust separator. / Yazdabadi P.A., Griffiths A.J., Syred N. // Exp. In Fluids, 1994. - Vol. 17. - pp.84-95.
12. Кутателадзе, С.С. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. / Кутателадзе С.С. , Волчков Э.П., Терехов В.И./ - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. -282с.
13. Chanaud, R.C. Observations of oscillatory in certain swirling flows//J. Fluid. Mech. – 1965. – Vol. 21. – p.111-127
14. Chenquan, Hua Wet gas meter based on the vortex precession frequency and differential pressure combination of swirlmeter. / Chenquan Hua , Yanfeng Geng // Measurement, 2012, doi:10.1016/j.measurement. 2011.12.013

□ Авторы: статьи:

Литвинов  
Иван Викторович,  
лаборант лаборатории № 7.1.3  
Института теплофизики СО РАН  
Email: litv88@yandex.ru

Шторк  
Сергей Иванович,  
канд. физ.-мат. наук, зав. лаборатории 7.1 Института теплофизики  
СО РАН, с.н.с. НИЧ физического  
факультета НГУ  
Email: shtork@itp.nsc.ru

Алексеенко  
Сергей Владимирович,  
чл.-корр. РАН, директор ИТ СО  
РАН, зав. каф. физики неравновес-  
ных процессов физического факуль-  
тета НГУ  
Email: aleks@itp.nsc.ru