

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК532.51

**Определение параметров винтовой симметрии
нестационарного вихревого течения
на основе фазово-осредненных PIV измерений***

И.В. Литвинов^{1,2}, Д.К. Шараборин^{1,2}, С.И. Шторк^{1,2}

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: litvinov@itp.nsc.ru

В ходе исследований из фазово-осредненных распределений скорости определены параметры прецессирующего вихревого ядра, которые послужили исходными данными для вычисления частоты прецессии на основе теории винтовых вихрей. Показано, что расчет частоты прецессии дает отличие менее 10 % от наблюдаемой в эксперименте. Полученные результаты подтверждают адекватность использованной теории и дают дополнительные возможности для анализа механизмов явления прецессирующего вихревого ядра и факторов, определяющих его динамику.

Ключевые слова: прецессирующее вихревое ядро, PIV, теория винтовых вихрей.

Одной из особенностей интенсивно закрученного потока в условиях внезапного расширения является формирование нестационарной вихревой структуры, известной как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), которое оказывает существенное влияние на эффективность и безопасность работы технических устройств. Поэтому важной задачей является предсказание и оценка воздействия ПВЯ на закрученное течение для различных конструкций вихревых устройств. Цель настоящей работы заключалась в непосредственном определении параметров винтовых вихревых структур при анализе мгновенного поля течения, измеренного с помощью стерео-PIV методики, а также в применении теории винтовых вихрей для расчета частоты ПВЯ.

Как и в предыдущей работе авторов [1], исследования проводились на аэродинамическом стенде с вихревым устройством тангенциального типа, которое представляет собой осесимметричную камеру диаметром $D_0 = 145$ мм с двумя входными патрубками диаметром $d = 40$ мм и сменным выходным соплом (рис. 1а). Высота завихрителя соответствует диаметру входных патрубков и равна 40 мм. В текущей работе эксперименты проводились с соплом диаметром $D = 55$ мм при расходе воздуха 15 л/с, соответствующем среднерасходной скорости в сопле $U_0 = 7,06$ м/с и числу Рейнольдса $Re = U_0 D / \nu = 2,3 \cdot 10^4$ (ν — кинематическая вязкость). Конструктивный параметр крутки определялся через геометрию завихрителя по формуле $S = DD_0 / 2d^2$ и для данного сопла был равен 2,4. Применимость теории для различных параметров крутки (S) и чисел Re обсуждалась в работе [1], в настоящей работе внимание уделено проверке теории с помощью параметров винтового вихря, определенных напрямую из фазово-осредненных распределений полей скорости.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФНФ (проект № 14-29-00203).

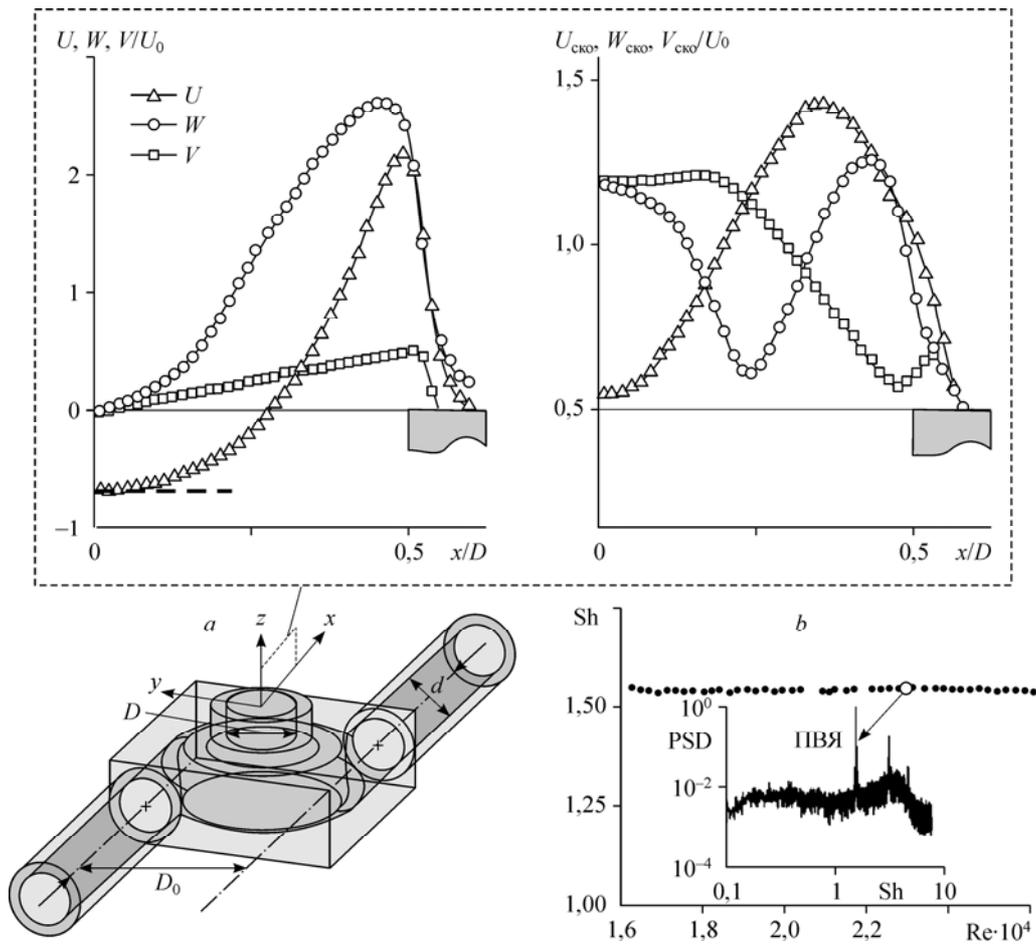


Рис. 1. Конструкция тангенциального закручивающего устройства (а) и зависимость Sh от Re (б).

В верхней части отображены профили осредненных по времени и среднеквадратичных отклонений скоростей $U_{ско}$, $W_{ско}$, $V_{ско}$ (осевой, тангенциальной и радиальной компонент соответственно), на фрагменте (б) показана спектральная плотность мощности (PSD, Power Spectral Density) пульсаций давления, измеренная с помощью микрофона.

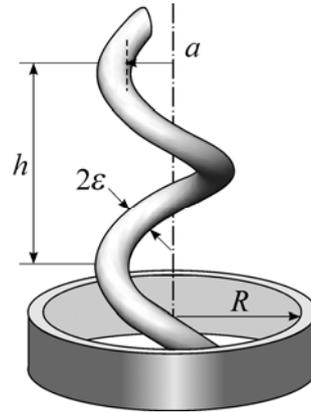
В текущем эксперименте реализуется автоколебательный процесс с постоянным значением числа Струхала $Sh = f \cdot D / U_0$ вне зависимости от значения Re (рис. 1б). Здесь f — доминантная частота в спектре пульсаций давления, которая ассоциировалась с частотой ПВЯ [1]. Интенсивные периодические пульсации давления, регистрируемые микрофоном, являлись базисным сигналом и меткой во времени для проведения условного усреднения распределений скорости, привязанных к фиксированной фазе вихря. Высокий уровень среднеквадратичных пульсаций скорости обусловлен когерентным движением ПВЯ, что дает также дискретный пик в спектре пульсаций давления.

Для измерения полей мгновенной скорости использовалась стерео-PIV система «ПОЛИС», аналогичная представленной в работе [2]. Лазерный нож проходил через плоскость $x-y$ (см. рис. 1а). Измерительное сечение $z = 0$ являлось самым близким сечением к соплу и располагалось на высоте 0,5 мм от среза сопла. Поток засеивался частицами парафинового масла со средним диаметром около 3 мкм, которые служили маркерами течения для проведения PIV-измерений.

Аналитический подход, использующийся в настоящей работе, основан на теории винтовых вихрей, описанной в работах [3, 4]. В частности, в [4] приводится формула для расчета частоты прецессии винтового вихря в цилиндрической трубе. Для применения модели винтовой вихревой структуры необходимо ввести в рассмотрение следующие

Рис. 2. Схема модели винтовой вихревой структуры.

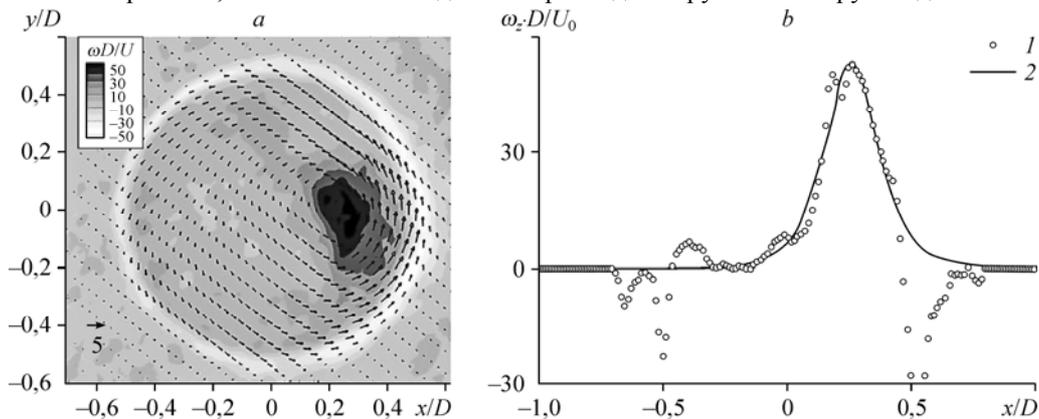
параметры (рис. 2): a — радиус винтовой вихревой структуры, ε — радиус ядра вихря, h — шаг винтовой структуры, Γ — интенсивность вихревой структуры, а также два дополнительных параметра: R — радиус трубы и u_0 — скорость на оси трубы. Аксиальная скорость на оси камеры $u_0 = U|_{x,y=0}$ (рис. 1а) и радиус $R = D/2$ трубы, внутри которой вращается винтовая структура, находятся непосредственно из средних распределений скорости и геометрии устройства (рис. 1а). Необходимо отметить, что здесь используется теория для движения вихря в трубе, однако из соображений оптической доступности, необходимой для используемой методики измерений, параметры вихря измерялись вне сопла (0,5 мм выше среза сопла), подразумевая, что поток не успевает заметно перестроиться и сохраняет структуру, которую он имел при течении внутри сопла.



Для определения остальных параметров вихревой винтовой структуры использовались вычисленные из измеренных фазово-осредненных полей скорости распределения осевой компоненты завихренности (рис. 3а). Смещенная относительно центра сопла область максимума в распределении завихренности соответствует ПВЯ, которое также явно обозначено векторами скорости. Для оценки параметров ПВЯ анализировался профиль завихренности вдоль линии, проходящей через центр вихря (рис. 3б). Профиль представлялся моделью вихря Скулли $\omega_z \text{Skully} = \left(\Gamma \cdot \varepsilon^2 / \pi \right) \cdot \left(1 / \left((x-a)^2 + \varepsilon^2 \right)^2 \right)$, которая, по

мнению авторов [4], наиболее точно описывает турбулентное вихревое течение с концентрированной завихренностью. Параметры a , ε , Γ определялись из условия лучшего соответствия модели измеренному профилю завихренности.

Для определения шага винтового вихря h были проведены фазово-осредненные измерения для нескольких сечений по высоте с шагом 5 мм в диапазоне $z = 0-25$ мм. В общем случае параметр h может быть определен на основе изменения углового положения центра вихря вдоль осевой координаты по формуле $h = 2\pi / (d\alpha/dz)$. Измерения показали монотонное увеличение угла α , которое в первом приближении можно аппроксимировать линейной зависимостью. Это дает примерно постоянное значение шага, равное 176 мм. При этом радиус прецессии вихря (параметр a) при отдалении от сопла возрастает, что является следствием распада закрученной струи над соплом.

Рис. 3. Поле течения в горизонтальной плоскости $z = 0$.

a — проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость и распределение осевой компоненты завихренности $\omega_z D/U_0$, b — профиль завихренности вдоль линии, проходящей через центр вихря; 1 — эксперимент, 2 — модель вихря Скулли.

Таблица

Параметры винтовой структуры						
u_0/U_0	Γ/DU_0	a/D	ε/D	h/D	Sh_{th}	Sh_{exp}
-0,68	6,4	0,257	0,195	3,38	$1,42 \pm 0,14$	$1,54 \pm 0,03$

Вследствие распада происходит быстрая диссипация вихревого ядра (для $z > 30$ мм ядро вихря уже не идентифицировалось по распределению завихренности). Значение параметра a в контрольном сечении $z = 0$ составляет величину близкую 13 мм, что в 13,5 раз меньше измеренного шага винта, т.е. ПВЯ имеет форму сильно вытянутой в продольном направлении спирали. Вследствие того, что сразу за соплом вихревое ядро разрушается, в эксперименте реализуется только достаточно короткий, слабоискривленный участок вихря. Возможно аналогичная ситуация имела место в работе [5], авторы которой наблюдали прецессирующий вихрь в виде короткого, почти прямолинейного стержня.

Таким образом, в эксперименте происходит заметная эволюция ПВЯ вдоль осевой координаты, в то время как в теории рассматривается бесконечно протяженный в аксиальном направлении винтовой вихрь. В работах [3, 4] обосновывается возможность использования теории в локальном смысле для выделенного поперечного сечения винтового вихря. Этот подход может быть применим и к текущим исследованиям, исходя из выявленных особенностей ПВЯ, представляющего собой вихрь со слабо искривленной осью.

Параметры вихря a , ε , Γ , h , определенные на основе фазово-осредненных распределений скоростей, собраны в таблице. Здесь же приведены значения рассчитанной на основе теории и измеренной частоты прецессии Sh_{th} и Sh_{exp} , которые достаточно близки между собой. Данный результат, с одной стороны, подтверждает адекватность выбранной теории, с другой стороны, предложенный подход для экспериментального определения параметров прецессирующего вихря представляет дополнительные возможности для анализа на основе теории факторов, определяющих динамику ПВЯ.

Таким образом, в представленной работе техника фазово-осредненных стерео-PIV измерений была использована для прямого определения параметров прецессирующего винтового вихря в реальном закрученном потоке на выходе из сопла тангенциального завихрителя. Измеренные параметры использовались для расчета частоты прецессии по аналитической формуле, полученной на основе теории винтовых вихрей [4]. Отличие расчетной частоты от измеренной с помощью акустического датчика укладывается в 10 %. Соответствие выглядит вполне приемлемым, учитывая, что формула для расчета выведена с привлечением сильных допущений, таких как идеальность среды и бесконечная протяженность винтовой структуры в цилиндрической трубе. Отметим, что настоящая работа представляет практически первую апробацию теории на основе непосредственно измеренных параметров винтового вихря. Предыдущие проверки основывались на экспериментальных параметрах, определенных косвенным образом из осредненных по времени распределений скорости [3, 4].

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН С.В. Алексеенко, а также д.ф.-м.н. П.А. Куйбину за полезное обсуждение результатов представленной работы.

Список литературы

1. Litvinov I.V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2013. Vol. 42. P. 251–64.
2. Abdurakipov S.S., Dulin V.M., Markovich D.M., Hanjalic K. Expanding the stability range of a lifted propane flame by resonant acoustic excitation // *Combust. Sci. Technol.* 2013. Vol. 185. P. 1644–1666.
3. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. Helical vortices in swirl flow // *J. Fluid Mech.* 1999. Vol. 382. P. 195–243.
4. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
5. Ахметов Д.Г., Никулин В.В. Механизм генерации автоколебаний при истечении закрученной струи // *Докл. РАН*. 2004. Т. 399, № 4. С. 486–489.

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2015 г.,
после переработки — 14 мая 2015 г.