

С. Г. Скрипкин¹, С. В. Дремов^{1,2}, С. И. Шторк^{1,2}, И. К. Кабардин¹

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

skripkin.s.g@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРЫ ПРЕЦЕССИРУЮЩИХ СПИРАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ *

Работа посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия пары прецессирующих вихрей в гидродинамической вихревой камере. Закрученное течение создавалось с помощью 12 тангенциально направленных прямооточных прямоугольных сопел. Конструктивный параметр крутки, определяемый исходя из геометрии данного закручивающего устройства, варьировался в диапазоне $0 \div 6,6$. Число Рейнольдса изменялось в диапазоне $6\,000 \div 52\,000$. Для контроля параметров вихревой структуры были проведены предварительные визуальные эксперименты с изменением выходных граничных условий. Было установлено, что при полностью открытом выходе реализуется устойчивый режим с двойной прецессирующей структурой. Диафрагмирование выхода вихревой камеры позволяет подавить прецессию и значительным образом стабилизировать течение. Дальнейшие эксперименты включали в себя количественные измерения распределений скорости, проводимые с использованием лазерной доплеровской анемометрии.

Ключевые слова: спиральный вихрь, тангенциальная камера, прецессирующее вихревое ядро.

Введение

Закрученные потоки используются в разных отраслях промышленности, особенно там, где требуется ускорение процессов смешения. Так, закрученный поток применяется для интенсификации теплообмена в теплообменниках, сепараторах для очистки газовых и жидких сред, при процессах гомогенизации в химической промышленности, а также для стабилизации процессов горения [1]. Основными типами закручивающих устройств для создания закрученного течения являются аксиальный (лопаточный) и

тангенциальный завихрители. Отдельное внимание следует уделить формированию прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) и сопутствующей ему крупномасштабной зоне рециркуляции. Данное вихревое крупномасштабное образование приводит к интенсификации процессов горения, а зона возвратного течения увеличивает время нахождения частиц, участвующих в реакции горения [2; 3].

Кроме того, исследование закрученных потоков представляет большой интерес с точки зрения фундаментальной науки. При достижении в потоке определенного значе-

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 15-08-05220 А).

ния параметра закрутки потока, чаще всего определяемого как отношение потоков момента количества движения и движения в осевом направлении, происходит распад вихря, в области которого начинают формироваться различные вихревые структуры [4; 5]. В зависимости от граничных условий и интенсивности закрутки тип и форма вихревой структуры могут в значительной степени различаться. Это может быть тонкая вихревая нить с концентрированным полем завихренности или спиралевидный распад вихря в форме ПВЯ [6]. Ввиду сложности изучаемых вихревых структур для развития теоретических подходов, описывающих их динамику, необходимы детальные экспериментальные данные, полученные методами физического и численного моделирования в канонических моделях.

В данной работе исследования проводились в вихревой камере с тангенциальным типом завихрителя. При максимальном параметре крутки потока, когда подводящие сопла направлены по касательной к окружности рабочей камеры, в потоке формируется крупномасштабная вихревая структура, состоящая из пары прецессирующих винтовых вихрей. Подобное явление можно наблюдать в определенных режимах работы горелки [3], а также при работе гидротурбин в неоптимальных условиях, когда прецессирующий вихревой жгут за рабочим колесом гидротурбины теряет свою стабильность и разбивается на два прецессирующих спиральных вихря [7]. Такой процесс связан с мгновенным перестроением поля скорости и сопровождается дополнительными нерасчетными пульсациями давления. Взаимодействие пары вихрей осложняется еще тем, что каждый из них движется не только в закрученном потоке, но и в поле, индуцированном другим вихрем.

В предыдущей работе [8] в схожей геометрии изучалась стационарная двойная спираль, сформированная за счет установки специального двухскатного дна. Однако полученная двойная спираль была неустойчива, зачастую происходило доминирование одного из вихрей и вырождение двойной спирали в одинарный вихрь, что затрудняло экспериментальное исследование. Целью данной работы является исследование пары устойчивых прецессирующих вихрей в закрученном потоке и получение количественной информации о структуре течения,

необходимой для верификации численных моделей и дальнейшего развития теории винтовых вихрей.

Экспериментальная установка и измерительное оборудование

Эксперименты проводились на замкнутом гидродинамическом контуре, состоящем из рабочего участка, подающего насоса, блока расходомера и резервуара с водой. Рабочий участок, изготовленный из оргстекла, представляет собой вихревую камеру тангенциального типа с цилиндрической вставкой диаметром $D = 190$ мм. Всего в цилиндрическую часть вмонтированы 12 сопел, по три в каждом из четырех симметрично расположенных блоков. Симметричное расположение сопел позволяет создавать более равномерный профиль скорости, чем при подводе с одной стороны. Прозрачные плоские стенки позволяют использовать современные измерительные методики, такие как PIV и LDA, в любой области рабочего участка.

Рабочая жидкость подавалась из бака в вихревую камеру с помощью центробежного насоса (рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расход в гидродинамическом контуре на протяжении экспериментов варьировался в диапазоне от 3 до 25 м³/ч, что соответствует числу $Re = 52\,000$, при максимальном расходе, которое определялось как

$$Re = \frac{Q \times D_{\Gamma}}{v \times A},$$

где Q – объемный расход потока; D_{Γ} – гидравлический диаметр; v – кинематическая вязкость среды; A – площадь сечения цилиндрической части рабочего участка. Значение расхода контролировалось ультразвуковым расходомером с погрешностью, не превышающей 1 %.

Помимо числа Re , одним из определяющих структуру течения в рабочей камере является параметр S , характеризующий интенсивность закрутки потока. Обычно его определяют как отношение осевой компоненты момента количества движения к произведению осевой компоненты потока количества движения и радиуса рабочей камеры. Однако на практике ввиду отсутствия экспериментальных данных, содержащих профили скоростей и их пульсацион-

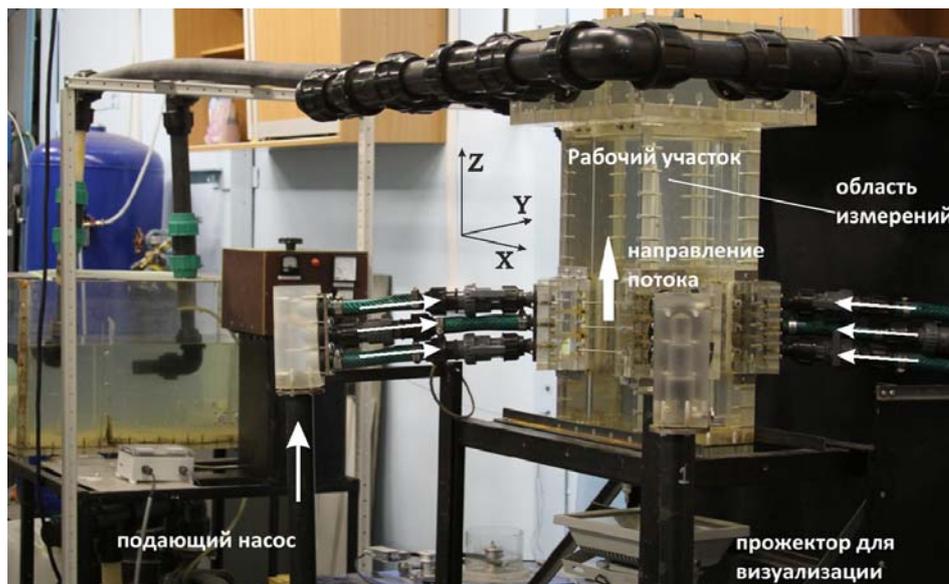


Рис. 1 (фото). Тангенциальная вихревая камера

ные характеристики, зачастую используют упрощенные определения [2; 6]. Для модельной вихревой камеры, использованной в данной работе, параметр крутки потока можно ввести как:

$$S = \frac{m \times d}{n \times \sigma},$$

где m – поперечный размер камеры; σ – площадь поперечного сечения сопла; n – количество открытых сопел; d – диаметр условной окружности, связанный с углом поворота сопла. Отличительной особенностью закручивающего аппарата такого типа является возможность регулирования параметра крутки потока в широком диапазоне. Тонкая регулировка угла подводящих сопел, позволяет с хорошей точностью изменять и контролировать параметр закрутки потока. Максимальный параметр S для данной установки равен 6,5, минимальный близок к нулю. Также в данной работе варьировались граничные выходные условия потока. На выходе из рабочего участка устанавливались специальные диафрагмирующие пластины с центральной и смещенной диафрагмой радиусом $0,4R$ (R – радиус цилиндрического участка).

Измерение профилей скорости в вихревой камере осуществлялось с применением лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) с адаптивной временной селекцией вектора скорости (ЛАД-05). Измеритель был разработан и произведен в Институте теплофизи-

ки СО РАН (Новосибирск). Измерения проводились на высоте $Z = 484$ мм, поперек оси камеры в диапазоне координаты $Y = -R \div R$, начало системы координат располагается в центре на дне вихревой камеры. ЛАД-05 позволяет измерить две проекции вектора скорости (в нашем случае это аксиальная и тангенциальная компоненты скорости) в диапазоне $0,001\text{--}30$ м/с с относительной погрешностью, не превышающей 0,1%. Размер измерительной зоны составляет $0,1 \times 0,1 \times 1,5$ мм. Позиционирующее устройство полностью автоматизировано и позволяет перемещать измерительный блок в области $250 \times 250 \times 250$ мм с точностью 0,1 мм. Количество вспышек ЛДА в каждой точке измерения равнялось 5 000, а максимальное время регистрации – 60 с. Достоверность определения средней скорости составляла 95%. В качестве рассеивающих частиц для получения доплеровского сигнала использовались частицы полистирола диаметром 20 мкм и плотностью $1,069$ г/мм³.

Визуализация течения

На первом этапе была выполнена визуализация течения. Для визуализации использовался прожектор LED, освещающий рабочий участок со стороны дна, и цифровая камера Canon 7D. В исходном варианте геометрии с полностью открытым выходом было обнаружено присутствие двух пере-

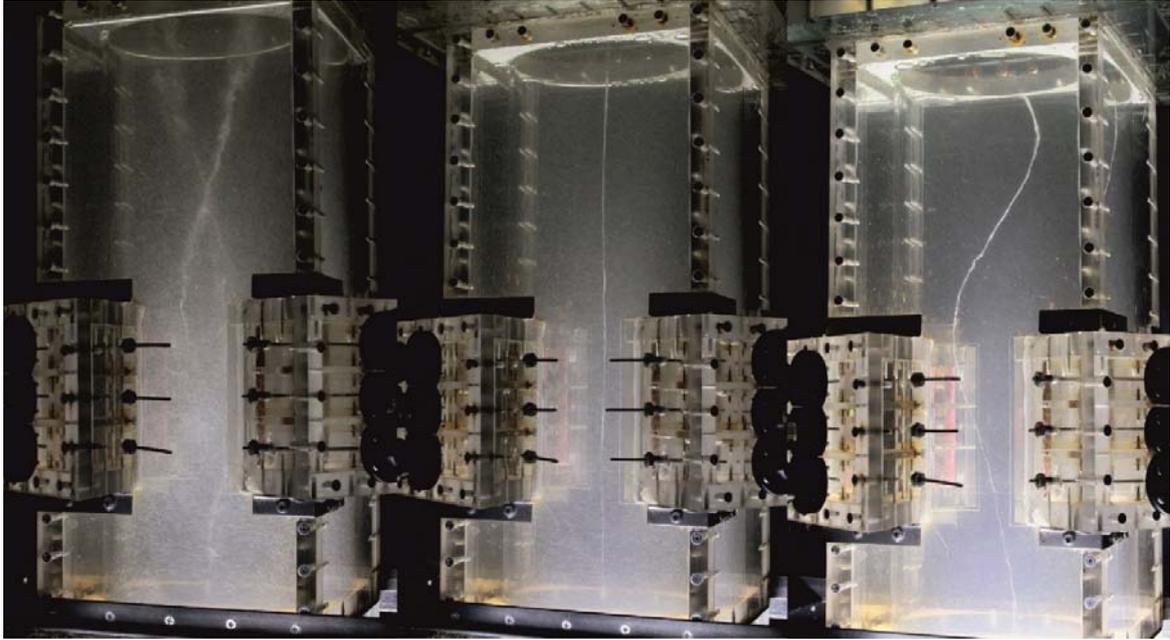


Рис. 2. Визуализация основных режимов течения, реализуемых в тангенциальной камере. Двойная спираль (базовый режим), стационарный вихрь (центральная диафрагма $0,4R$ камеры), стационарный спиралевидный вихрь (смещенная на $0,8R$ относительно оси диафрагма)

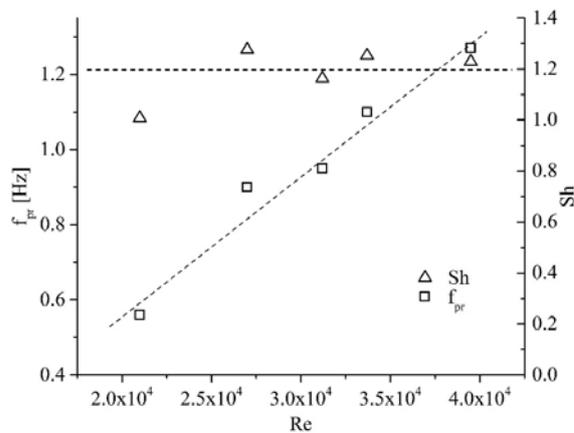


Рис. 3. Зависимость частоты прецессии двойной спирали и ее безразмерного эквивалента от числа Re при $S = 6,6$

плетенных друг с другом прецессирующих винтовых вихрей (рис. 2).

Установка центральной диафрагмы стабилизирует поток, и двойная прецессирующая спираль сменяется прямолинейным концентрированным вихрем. В свою очередь, смещение диафрагмы относительно оси камеры позволяют управлять геометрическим периодом образующейся вихревой структуры. Вихрь, как и в случае с цен-

тральной диафрагмой, остается стационарным, а его период напрямую зависит от положения выходного отверстия.

На основе полученных в процессе визуализации видеоматериалов построена зависимость частоты прецессии системы из двух вихрей от расхода жидкости. Например, для максимального параметра крутки $S = 6,6$ зависимость хорошо описывается линейной функцией $f[\text{Гц}] = 0,97 \cdot Q[\text{м}^3/\text{ч}] - 0,45$ в рамках погрешности 10 % (рис. 3). Также на графике представлена зависимость числа Струхалья Sh, которое является безразмерным аналогом частоты в колебательных процессах, от числа Re:

$$\text{Sh} = \frac{D \times f}{U},$$

где f – частота прецессии вихревой структуры; D – диаметр вихревой камеры; U – средняя по расходу скорость. Можно видеть, что число Струхалья примерно постоянно ($\text{Sh} \approx 1,2$) в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

ЛДА измерения

Количественная информация о структуре течения в вихревой камере была получена

с использованием техники ЛДА. На рис. 4, 5 представлены профили тангенциальной и аксиальной компонент скорости, полученные методом ЛДА при различных значениях расхода и параметра крутки. На рис. 4 иллюстрируется зависимость величины акси-

альной скорости от расхода жидкости. Геометрический параметр крутки оставался постоянным и имел значение 6,6. Текущий радиус обезразмерен через радиус камеры, а скорость – через среднюю по расходу скорость в сечении камеры (рис. 4, з).

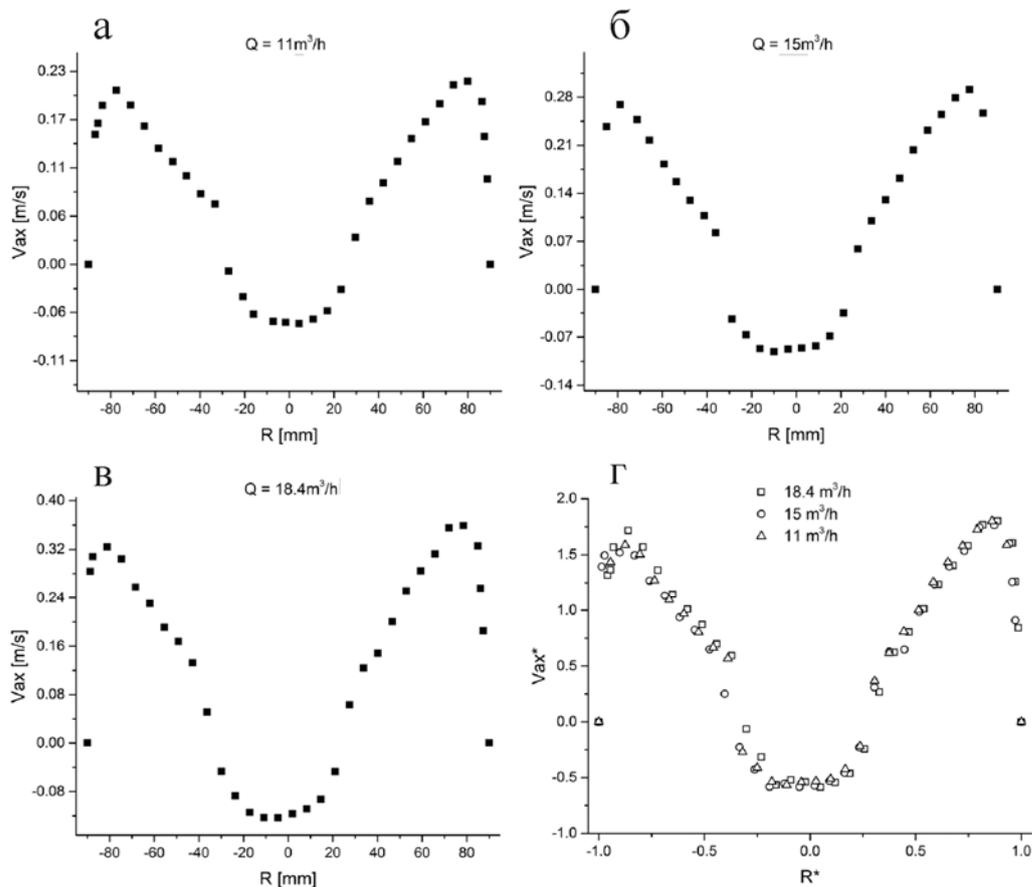


Рис. 4. Средние профили аксиальной компоненты скорости в зависимости от расхода жидкости в вихревой камере

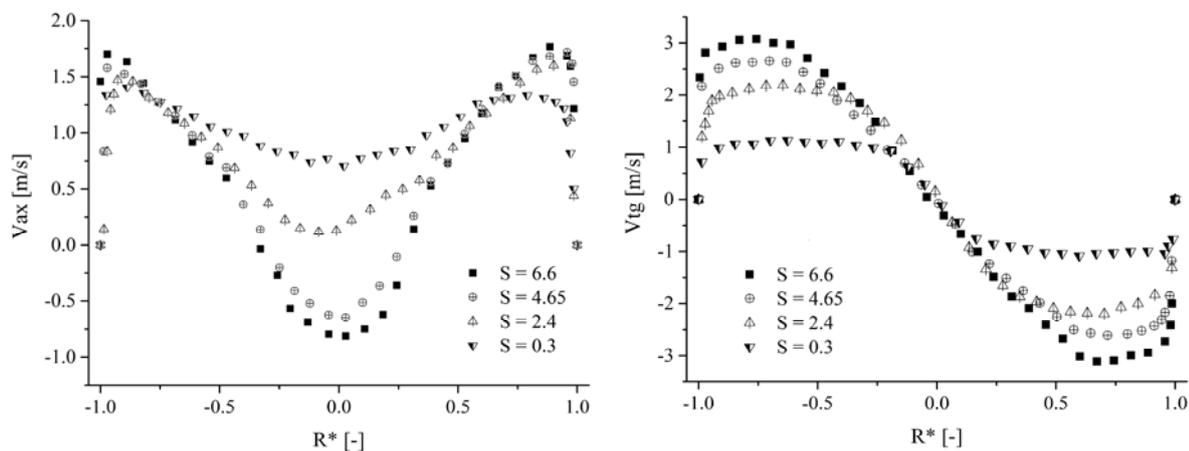


Рис. 5. Влияние геометрического параметра крутки на структуру течения в тангенциальной камере (аксиальные профили скорости – слева, тангенциальные – справа)

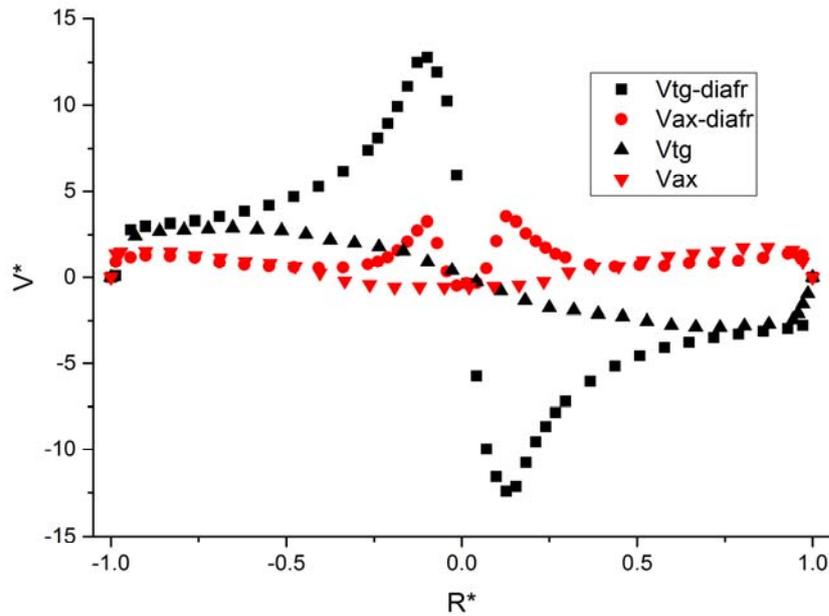


Рис. 6. Безразмерные профили скорости
с установленной центральной диафрагмой и без диафрагмы
 $Q = 11,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $S = 6,6$

Как видно из графика (рис. 4, з), безразмерные профили скорости остаются неизменными, т. е. величина расхода не влияет на структуру течения, что хорошо согласуется с частотными измерениями (см. рис. 3). На рис. 5 представлены зависимости тангенциальной и аксиальной скоростей от геометрического параметра крутки. Расход при этом оставался постоянным при значении $11,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Из рис. 5 можно увидеть, что профили скорости значительно меняются при варьировании параметра крутки потока. Течение при максимальном параметре крутки $S = 6,6$ характеризуется большими значениями тангенциальной скорости и развитой зоной рециркуляции с поперечным размером порядка $0,8R$. Следует отметить, что при уменьшении параметра закрутки зона рециркуляции, которой соответствуют отрицательные значения осевой скорости, уменьшается вплоть до полного исчезновения.

Отклонение вихревой структуры от оси камеры (радиус прецессии) можно оценить исходя из среднего распределения аксиальной скорости как расстояние между центральной осью и границей зоны возвратного течения [9]. Так, для $S = 6,6$ радиус прецес-

сии составляет около $0,4R$. Видно, что при уменьшении параметра крутки начиная с $S = 2,4$ зона рециркуляции исчезает, однако профиль тангенциальной скорости имеет прямолинейный участок, что говорит о твердотельном вращении жидкости. Другими словами, в таком режиме двойная спираль перестает существовать, а вместо нее формируется одиночный нестабильный колоннообразный вихрь.

Для изменения параметров вихревой структуры был проведен ряд экспериментов с установленными центральной и смещенной диафрагмами радиусом $0,4R$ вихревой камеры. При установленной центральной диафрагме течение изменяется коренным образом (см. рис. 2). Вместо двойной прецессирующей спирали формируется прямолинейный концентрированный вихрь, который незначительно отклоняется от оси камеры. Радиус этого отклонения, согласно подходу описанному в [8], очень невелик, порядка $0,05R$. Диафрагмирование выхода приводит к стабилизации потока и смещению максимумов тангенциальной скорости ближе к оси камеры (рис. 6). Резкое увеличение тангенциальной скорости вблизи оси камеры приводит к падению давления на оси, кото-

рая хорошо визуализируется пузырьками воздуха, подаваемыми в поток перед рабочим участком.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование закрученного течения при различных числах Рейнольдса, параметрах крутки потока и геометрии рабочего участка. Визуализация течения в базовом варианте без выходной диафрагмы выявила наличие устойчивой вихревой структуры – двух переплетенных спиралевидных прецессирующих вихрей. На основе полученных в процессе визуализации видеоматериалов построена зависимость частоты прецессии системы из двух вихрей от расхода жидкости, показана автомодельность числа Sh от Re . Данное условие позволяет фиксировать расход жидкости и проводить измерения, варьируя только параметр крутки потока. Количественные экспериментальные данные были получены с использованием лазерной доплеровской анемометрии. Показано, что при уменьшении степени закрутки потока начиная с параметра крутки $S = 2,4$ зона рециркуляции исчезает, а профиль аксиальной компоненты скорости значительно выполаживается. Изменение выходных условий потока путем установки диафрагмы диаметром $0,4R$ на выходе вихревой камеры приводит к стабилизации потока и формированию стационарного концентрированного вихря.

Дальнейшая работа будет направлена на применение методики фазового осреднения в совокупности с использованием PIV системы. Это значительным образом расширит информацию о наблюдаемых вихревых структурах, а также позволит сопоставить ее с аналитической теорией концентрированных вихрей.

Список литературы

1. Radu Cazan, Cyrus K. Aidun. Experimental investigation of the swirling flow and the helical vortices induced by a twisted tape inside a circular pipe // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. P. 037102.
2. Гунта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
3. Viguera-Zuñiga M. O., Valera-Medina A., Syred N. Studies of the Precessing Vortex Core

in Swirling Flows // *J. Appl. Res. Technol.* 2012. Vol. 10. No. 5. P. 755–765.

4. Kurosaka M., Kikuchi M., Hirano K., Yuge T., Inoue H. Interchangeability of vortex-breakdown types // *Experiments in Fluids*. 2003. Vol. 34 P. 77–86.

5. Escudier M. P., Zehnder N. Vortex-flow regime // *J. Fluid Mech.* 1982. Vol. 115. P. 105–121.

6. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2005. 504 с.

7. Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И. Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 73–82.

8. Анохина Е. С., Дектерев Д. А., Шторк С. И., Алексеенко С. В. Исследование стационарных вихревых структур в модельной камере сгорания // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2012. Т. 7, вып. 2. С. 56–65.

9. Литвинов И. В., Шараборин Д. К., Шторк С. И., Алексеенко С. В. Применение трехкомпонентной стерео-PIV техники для измерения параметров винтового прецессирующего вихря в интенсивно закрученном потоке // *Вестн. инженерной школы ДВФУ*. 2015. № 2 (23).

S. G. Skripkin¹, **S. V. Dremov**^{1,2}, **S. I. Shtork**^{1,2}, **I. K. Kabardin**¹

¹ *Institute of Thermophysics, SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

skripkin.s.g@gmail.com

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COUPLE PRECESSING VORTEX ROPES IN A HYDRAULIC VORTEX

The work is devoted to the experimental study of the interaction of the precessing vortex pair in the hydrodynamic vortex chamber. Swirling flow was created by a 12 tangentially directed rectangular nozzles. Design swirl number was varied in the range 0÷6.6 based on the geometry of the swirl device. The Reynolds number was varied in the range of 6 000÷52 000. Preliminary visual experiments has been conducted with changing output boundary conditions for controlling parameters of the vortex structure. It was found that stable mode with a double precessing structure is realized at full open outlet. Setting of diaphragm on the outlet of vortex chamber allows us to suppress the precession motion and significantly stabilize the flow. Further experiments included the quantitative measurement of the velocity distributions carried out using a laser Doppler anemometry (LDA).

Keywords: spiral vortex, tangential chamber, precessing vortex core.