

УДК 532.5  
DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-1-40-50

## Смена винтовых мод возмущений закрученного течения жидкости при подаче дисперсной газовой фазы

С. В. Дремов<sup>1,2</sup>, С. Г. Скрипкин<sup>1</sup>, С. И. Шторк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
Новосибирск, Россия*

### Аннотация

Работа посвящена изучению крупномасштабного двойного прецессирующего вихря, возникающего в двухфазном потоке в проточном гидродинамическом вихревом реакторе тангенциального типа. Обнаружен эффект стабилизации и объединения двойной спирали в одиночный квазистационарный колоннообразный вихрь путем инъекции газовой фазы в поток. Изменение структуры течения было зафиксировано посредством техники скоростной визуализации. Количественные измерения, характеризующие структуру течения, проведены с использованием лазерного доплеровского анемометра.

### Ключевые слова

закрученный поток, вихревая камера, прецессирующее вихревое ядро, двойной вихрь

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00732 мол\_а

### Для цитирования

Дремов С. В., Скрипкин С. Г., Шторк С. И. Смена винтовых мод возмущений закрученного течения жидкости при подаче дисперсной газовой фазы // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 1. С. 40–50. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-1-40-50

## Changing of Disturbance Helical Modes in Swirling Flow during Dispersed Gas Phase Injection

S. V. Dremov<sup>1,2</sup>, S. G. Skrypkin<sup>1</sup>, S. I. Shtork<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation*

### Abstract

The research is devoted to studying of large-scale precessing double vortex arising in two-phase flow in flowing hydrodynamic tangential vortex reactor. The effect of stabilizing and merging of double helix into a single quasistationary columnar vortex by injecting the gas phase into the flow was discovered. The flow structure changing was recorded by means of a high-speed visualization technique. Quantitative measurements characterizing the flow structure were obtained by using laser Doppler anemometry technique.

### Keywords

swirling flow, vortex chamber, precessing vortex core, double helix

### Acknowledgements

The study was funded by RFBR according to research project No. 18-38-00732 mol\_a

### For citation

Dremov S. V., Skrypkin S. G., Shtork S. I. Changing of Disturbance Helical Modes in Swirling Flow during Dispersed Gas Phase Injection. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 1, p. 40–50. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-1-40-50

© С. В. Дремов, С. Г. Скрипкин, С. И. Шторк, 2019

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2019. Том 14, № 1  
Siberian Journal of Physics, 2019, vol. 14, no. 1

## Введение

Исследования закрученных течений являются одним из важных направлений современной гидродинамики. Закрученные потоки встречаются во многих технических устройствах. Например, в циклонном сепараторе используется центробежная сила, возникающая в вихревой камере, для отделения твердых частиц от газообразной фазы [1; 2]. В приложении к задачам тепло- и массопереноса течение в вихревой трубке Ранка – Хилша способствует разделению газа на горячий и холодный потоки. В камерах сгорания вихревой генератор используется для улучшения стабильности пламени, обеспечивая наличие обширной зоны рециркуляции [3; 4]. Активное применение находит закрутка потока в солнечных вихревых реакторах, обеспечивая равномерное перемешивание, а также и увеличение среднего времени нахождения частиц в камере за счет увеличения длины пути частиц [5; 6]. В гидротурбинах закрученный поток возникает при работе гидроагрегата в нерасчетных режимах [7; 8]. Многообразие эффектов, связанных с закруткой потока (возникновение зоны рециркуляции, формирование стационарных и нестационарных вихревых структур), привлекает пристальное внимание исследователей многие годы [9–14]. Наряду с экспериментальными работами активно разрабатываются и совершенствуются аналитические модели для описания вихревого течения [15–19]. Наиболее полной представляется теория концентрированных вихревых структур, в которой представлено аналитическое решение для вихревых структур с учетом их спиральной формы [11]. Тем не менее, существующие модели имеют ряд ограничений, а для развития обобщающих закономерностей необходимо получение детальных экспериментальных данных.

Отдельным классом задач является изучение закрученного потока и вихревых структур в цилиндрической трубе. Kitoh и др. систематизировали экспериментальные данные по структуре течения в трубе, используя в качестве закручивающего устройства лопаточный завихритель на входе [13]. Они рассмотрели важный вопрос о затухании окружной компоненты скорости, связанном с трением на стенках, а также установили аналитические зависимости для изменения интенсивности закрутки по длине рабочего участка. Escudier и др. провели значительный цикл экспериментальных исследований, используя схожую конфигурацию вихревой камеры [21; 22]. Поток на входе закручивался несимметричным тангенциальным подводом, обеспечивая варьирование параметра крутки в широком диапазоне. Основной акцент в работе был сделан на изучение влияния изменения выходных граничных условий на структуру вихревого течения путем установки диафрагмирующих пластин с различным соотношением диаметров отверстия и диаметра вихревой камеры. Эксперименты показали заметное изменение вихревой структуры с уменьшением выходного отверстия: от толстого ядра с дефицитом осевой скорости в центре и даже обратного потока до тонкого кольцевого струйного ядра с максимальной осевой скоростью, на порядок большей среднего значения, но при этом с сохранившимся центральным дефицитом осевой скорости.

При переходе к двухфазным газожидкостным потокам ситуация значительно усложняется. Добавление даже небольшого количества воздуха приводит к значительному изменению структуры течения, еще более затрудняя аналитическое представление параметров потока [23–27]. Понимание влияния инъекции газовой фазы на структуру вихревого течения очень важно, например, при управлении прецессией вихревого жгута в гидротурбинах, когда с целью погасить нежелательные пульсации давления или вывести частоту прецессии вихря из области резонанса производят выпуск воздуха под рабочее колесо. Однако большинство работ не рассматривают физику сложного многофазного процесса, не выходя за рамки конкретных технических приложений [28–30].

Uchiyama и др. показали, что увеличение расхода пузырьков воздуха выше критической отметки в цилиндрической камере с вращающимся диском приводит к стабилизации прецессии вихревого жгута, появляющегося вдоль вертикальной оси камеры [24]. Liu и др. исследовали затухание закрутки потока в газожидкостном потоке внутри длинной цилиндрической трубы в широком диапазоне расходов жидкости и инжектируемого газа. Авторы предложили

и экспериментально верифицировали простейшую аналитическую модель, описывающую затухание параметра крутки вдоль трубы при различном газосодержании [25]. Hreiz и др. провели оптические измерения полей скорости в двухфазном потоке в цилиндрическом сепараторе [26]. На основе полученных результатов было предложено увеличить эффективность циклона с помощью начальной закрутки газожидкостной смеси.

Среди обширного разнообразия режимов течения в двухфазных закрученных потоках с образованием вихревых структур одним из наиболее интересных на сегодняшний день является режим прецессирующей пары вихрей [31]. В некоторых случаях возникновение двойного вихря в закрученном потоке является нежелательным эффектом. Так, при определенном режиме течения в гидротурбине возникает переходный режим, в котором одиночная вихревая спираль периодически расщепляется на два вихревых жгута, частоту прецессии которых крайне сложно спрогнозировать [32]. Таким образом, несмотря на многочисленное количество научных исследований, существует огромное разнообразие эффектов, явлений и режимов течения, которые до сих пор не могут быть описаны в рамках современных теорий, что требует получения новых экспериментальных данных в области закрученных многофазных течений.

В ходе данной работы было произведено экспериментальное исследование закрученного потока в цилиндрическом вихревом реакторе тангенциального типа с формированием в потоке двух левовинтовых прецессирующих вращающихся в противоположных фазах вихрей. Зачастую подобная двойная вихревая структура оказывается неустойчивой, один из вихрей начинает доминировать, увеличивает частоту вращения, а затем происходит слияние двух вихрей в один. Тем не менее, использование определенных симметричных граничных условий (4 тангенциальных подвода) и тонкая регулировка угла входных сопел позволили добиться формирования устойчивой двойной спирали. В ходе экспериментов по инъекции воздуха для визуализации двойной вихревой спирали маленькими пузырьками воздуха, аккумулирующимися в области пониженного давления, был обнаружен новый эффект – мгновенная стабилизация двойной нестационарной вихревой структуры и формирование устойчивого колоннообразного торнадоподобного осесимметричного вихря.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперимент проводился на замкнутом гидродинамическом контуре с фиксированными значениями входных параметров (расход и параметр крутки). С помощью центробежного насоса из накопительного резервуара вода по распределительной системе труб подавалась в вихревую камеру. С боков в цилиндрический участок (рис. 1) вмонтированы 12 тангенциально направленных прямоугольных прямооточных сопел, объединенных по 3 штуки в 4 угловых блока. Подобная конфигурация позволяет создавать симметричные входные граничные условия для закрученного потока, а также с большой точностью регулировать и изменять конструктивный параметр крутки. Расход жидкости измерялся ультразвуковым расходомером и варьировался в экспериментах в диапазоне от 10 до 25 м<sup>3</sup>/ч с относительной погрешностью, не превышающей 1,5 %. Рабочий участок представляет собой тонкостенный цилиндрический канал, изготовленный из прозрачного полиметилметакрилата с внутренним диаметром  $D = 190$  мм и высотой 600 мм, помещенный во внешний контейнер, заполненный водой, что позволяет значительно уменьшить оптические aberrации при использовании бесконтактных методов диагностики потока (ЛДА, PIV).

Режим течения в вихревом реакторе с тангенциальным типом закрутки можно охарактеризовать двумя основными параметрами: числом Рейнольдса ( $Re$ ) и параметром крутки потока ( $S$ ). Ранее было показано [33], что вместо безразмерного отношения осевых компонент потока момента количества движения и потока количества движения, рассчитанного интегрированием осредненных по времени профилей скорости, можно использовать конструктивный параметр крутки, оцененный исходя из геометрических параметров вихревой камеры.

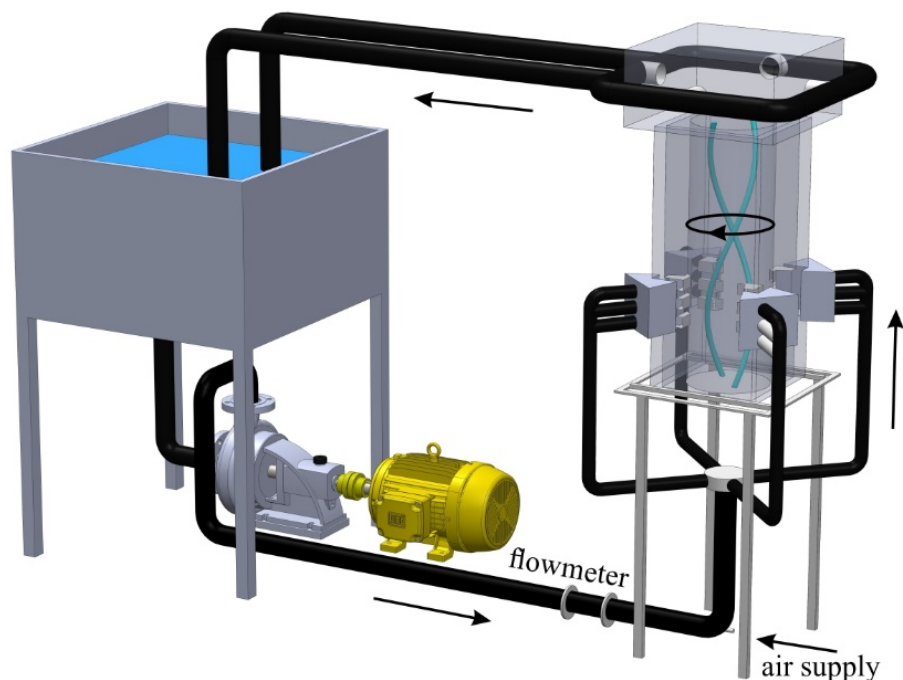


Рис. 1. Схема экспериментального стенда  
(стрелками обозначено направление движения потока)

Fig. 1. The experimental stand scheme (a flow direction is shown by arrows)

Следуя определению закрутки потока [12]

$$S = \frac{F_{mm}}{l \cdot F_m},$$

где  $F_{mm}$  – поток момента импульса в осевом направлении, а  $F_m$  – поток импульса в осевом направлении. Согласно Алексеенко и др. [33],  $F_m$  и  $F_{mm}$  можно оценить как

$$F_{mm} = \sum_{i=1}^n (GVd/2)_i = \frac{G^2 d}{2\rho S},$$

$$F_m = GV = \frac{G^2}{\rho S^2},$$

суммируя вклад от каждого из тангенциальных сопел (в предположении их идентичности) и в итоге получая для  $S$ :

$$S = D^2 \sin(\gamma) / NS,$$

где  $\gamma$  – угол поворота сопел относительно центра камеры.

Максимальное значение параметра крутки  $S = 6,6$  достигается, когда все сопла повернуты под максимальным углом к вертикальной оси. Именно в этом режиме для широкого диапазона чисел  $Re$  ( $10^5 - 6 \times 10^5$ ) формируется двойная прецессирующая вихревая спираль.

Скорость в потоке измерялась методом лазерной доплеровской анемометрии. Метод широко используется при изучении закрученных потоков, так как обладает рядом преимуществ

по сравнению с другими методами измерения скоростей [34–36]. В проводимых исследованиях была использована разработанная в ИТ СО РАН двухкомпонентная система ЛДА – «ЛАД 06-и» на базе полупроводникового лазера Mitsubishi ML1013R, генерирующего оптическое излучение мощностью 70 мВт с длиной волны 684 нм. Анемометр был установлен на автоматическое координатно-перемещающее устройство (КПУ), минимальный шаг позиционирования которого составляет 0,1 мм. В качестве трассеров использовались частицы полистирола диаметром 20–50 мкм и плотностью 1,069 г/см<sup>3</sup>, позволяющие минимизировать эффекты плавучести и присутствия в потоке твердой фазы. Управление КПУ осуществлялось компьютерной программой<sup>1</sup>.

Измерение пульсаций давления в потоке осуществлялось с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, которые были вмонтированы в стенки в верхней части цилиндрического участка. Датчики были подключены к усилителю заряда, который, в свою очередь, был подключен к АЦП L-card (E14-440). Сигнал с АЦП поступал на компьютер и записывался посредством программы LGraph. Последующий анализ и обработка сигналов осуществлялись в программе OriginPro.

### Результаты экспериментов: визуализация течения, измерения скоростей и пульсаций давления

При максимальной закрутке потока, которая соответствовала максимальному углу поворота тангенциальных сопел, в рабочем участке формируется устойчивая прецессирующая двойная спираль, простирающаяся по всей длине рабочего участка от нижней торцевой стенки до выходной секции (рис. 2).

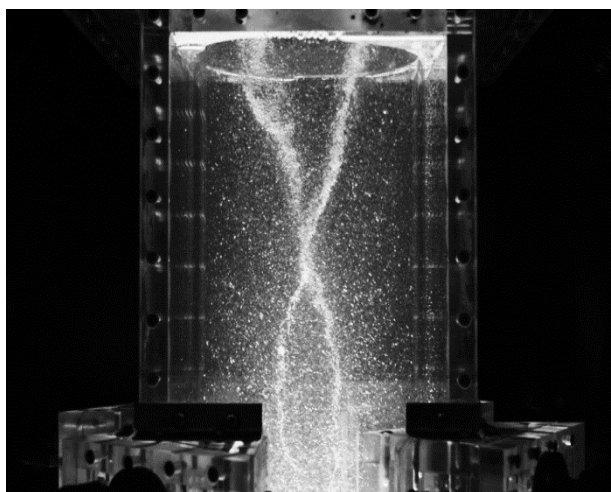


Рис. 2. Прецессирующая двойная вихревая спираль

Fig. 2. The precessing double helix

При увеличении расхода данный режим остается устойчивым, приобретая наиболее выраженную форму начиная с  $Q \sim 8$  м<sup>3</sup>/ч, когда двойная спираль хорошо визуализируется мелкими пузырьками воздуха, естественным образом попадающими в поток. При дополнительной подаче воздуха начиная со среднерасходного газосодержания  $\beta \sim 1,5\%$  ( $\beta = Q_g/Q_g + Q_l$ ) был обнаружен интересный эффект слияния двойной вихревой спирали в один интенсивный

<sup>1</sup> Более подробную информацию об измерительной системе см.: Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЛАД 06-и». Новосибирск: Ин-т оптико-электронных информационных технологий, 2006 (URL: <http://www.ioit.ru>).

торнадообразный практически осесимметричный вихрь, совершающий незначительные колебания относительно центральной оси (рис. 3).

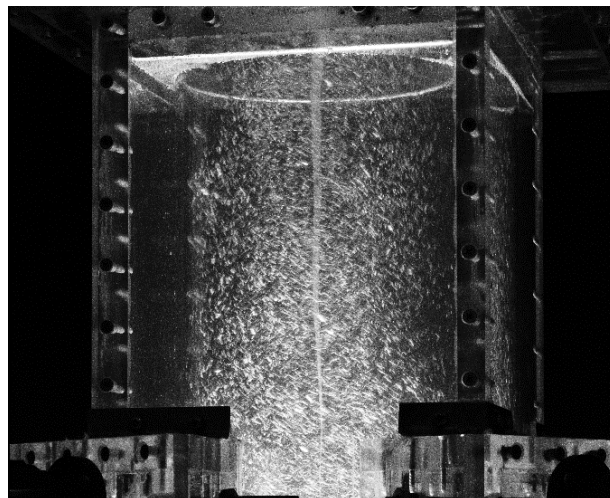


Рис. 3. Колоннообразный вихрь, образующийся после инъекции воздуха  $\beta \sim 1,5$

Fig. 3. A columnar vortex, arising after air injection  $\beta \sim 1.5$

При уменьшении подачи воздуха наблюдается обратный переход от одиночной спирали к двойной. Прямой и обратный переходы реализуются при разной подаче воздуха, т. е. имеет место некий гистерезис. При плавном увеличении расхода воздуха слияние двух вихрей начинается при  $\beta \sim 1,5$  %. Однако после образования одиночной вихревой структуры можно снизить  $\beta$  до 1 %, не теряя ее стабильности. При резком выключении подачи воздуха вихревая нить какое-то время сохраняет свою структуру, жидкость становится практически прозрачной (воздух только в тонком вихре), после чего возникает неустойчивость, и вихрь распадается на две спирали.

Профили скоростей для одиночного вихря были измерены при расходе жидкости  $Q = 11,5$  м<sup>3</sup>/ч и минимальном  $\beta = 1$  %, при котором можно наблюдать данное явление (рис. 4). При увеличении газосодержания колоннообразный вихрь визуализируется лучше, однако избыточное количество мелких пузырьков в потоке делает измерение профилей скорости системой ЛДА невозможным. Ввиду симметрии течения относительно вертикальной центральной оси и трудностей измерения скорости за колоннообразным вихрем с воздушным ядром (значительное рассеивание лазерного луча) профили скоростей были измерены вдоль половины диаметра камеры от ближней стенки до центральной оси.

Без добавления воздуха в поток в режиме с двойной прецессирующей спиралью отчетливо видна крупномасштабная зона рециркуляции  $\sim 0,35R$ , которая исчезает при перестроении потока в случае режима с добавлением воздуха. Изменения наблюдаются и в распределении компоненты, когда профиль скорости, схожий с моделью твердотельного вращения в области до  $0,6R$ , трансформируется, и линейный участок при инъекции воздуха наблюдается только в узкой области до  $0,05R$ , что хорошо согласуется с данными визуализации (см. рис. 3).

Заметим, что конструктивный параметр крутки при добавлении воздуха оставался практически неизменным, так как вклад от подачи воздуха в поток момента импульса  $F_{mm}$  незначительный из-за малой плотности воздуха и пренебрежимо малого массового расхода. При этом структура многофазного закрученного течения претерпевает кардинальные изменения. В частности, на профиле осевой скорости появляется узкий максимум.

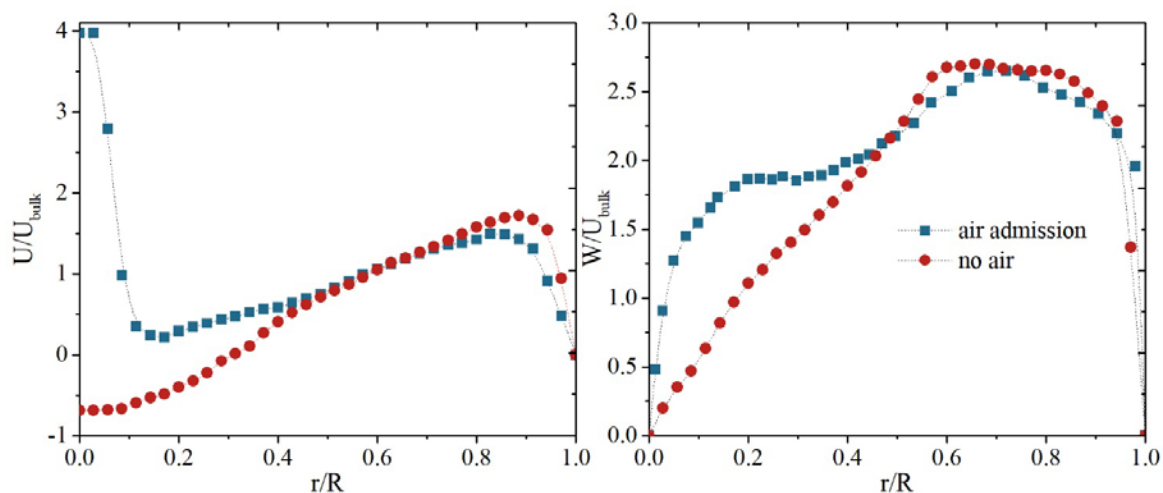


Рис. 4. Профили аксиальной и тангенциальной скорости с добавлением воздуха (режим с одинарным вихрем) и без него (двойной вихрь), обезразмеренные на среднерасходную скорость

Fig. 4. The axial and tangential velocity profiles with (the single vortex mode) and without air injection (the double helix), dimensionless by mean velocity at the constant flowrate

Схожее распределение скоростей в вихревой трубе с тангенциальной закруткой потока было выявлено в работе [13] при использовании диафрагмирующей вставки, перекрывающей выходное сечение. В этих экспериментах максимум аксиальной скорости наблюдался на оси камеры начиная с относительного диаметра диафрагмы 0,25 и меньше.

Интересным представляется также изменение пульсаций давления на стенке вихревого реактора в момент инжекции воздуха. Реализация сигнала с датчиков представлена на рис. 5 (амплитуда пульсаций ортонормированна на максимальное значение в сигнале).

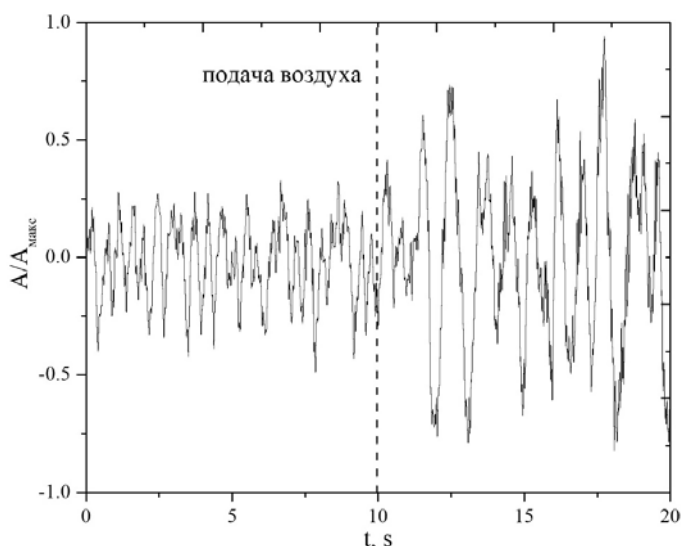


Рис. 5. Реализация сигнала давления вблизи выхода из цилиндрического участка при подаче воздуха ( $\beta \sim 1,5\%$ ) в  $t = 10$  с

Fig. 5. Pressure signal realization near the outlet from cylindrical zone with air injection ( $\beta \sim 1.5\%$ ) at  $t = 10$  s

Из рис. 5 видно, что до момента инъекции воздуха двойная прецессирующая вихревая спираль генерирует на стенке периодический сигнал, частота пульсаций которого равна удвоенной частоте вращения двойной спирали как целого. При подаче воздуха, как это видно из визуализации на рис. 3, происходит объединение двух вихрей в одну колоннообразную вихревую структуру, качественно похожую на вихревой торнадо. Ближе к выходу из цилиндрического канала наблюдается уширение вихревой полости наполненной воздухом, а более детальный анализ визуализации выявил некоторые периодические отклонения от оси камеры. Качественным образом подобное поведение колоннообразного вихря схоже с типом прецессии вихревого ядра, описанным в работе [29], когда вместо классического распада вихря с точкой торможения потока и образованием спиральной структуры реализуется режим, при котором вихрь немного изгибается и начинает вращаться вокруг центральной оси, что и является источником более высоких по амплитуде пульсаций давления, однако с меньшей частотой.

Механизм рассмотренного эффекта перехода от двойного к одинарному вихрю может быть связан с тем, что при увеличении объемного газосодержания под верхней торцевой крышкой образуется воздушная полость, и появляется свободная поверхность. Вихревые воронки, которые образуются на свободной поверхности в месте контакта вихрей, начинают увеличиваться в диаметре, и при достижении критического значения происходит их слияние, что приводит к объединению двойной вихревой спирали ниже по течению.

### Заключение

В работе представлено экспериментальное исследование закрученного двухфазного потока с образованием прецессирующего двойного вихря. Посредством цифровой визуализации было установлено, что инъекция даже небольшого количества газовой фазы в закрученный поток может кардинальным образом перестроить топологию течения. Так, было экспериментально исследовано слияние двойной спиральной вихревой структуры в осесимметричный колоннообразный вихрь. Количественные измерения посредством ЛДА техники выявили значительные отличия в распределениях осевой и тангенциальной скорости. При переходе от двойного вихря к одинарному полностью исчезла приосевая крупномасштабная рециркуляционная зона, а вместо нее возник приосевой проток. Измерения пульсаций давления на стенке вихревой камеры также претерпевают значительные изменения. Так как вместо двойной спирали формируется одиночный вихрь, частота пульсаций, регистрируемая датчиками давления, уменьшается, однако амплитуда значительно возрастает вследствие того, что одиночный вихрь аккумулирует энергию, которая распределяется между двумя вихрями.

Данное явление требует дальнейшего исследования для более глубокого понимания механизмов, отвечающих за подобное резкое изменение топологии вихревых структур в многофазных закрученных потоках.

### Список литературы / References

1. **Zhou L. X., Soo S. L.** Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator. *Powder Technology*, 1990, vol. 63, no. 1, p. 45–53.
2. **Cortes C., Gil A.** Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in energy and combustion Science*, 2007, vol. 33, no. 5, p. 409–452.
3. **Gupta A.** PVC and instability in swirl combustors. In: 22<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting, 1984. DOI <https://doi.org/10.2514/6.1984-206>



4. **Oberleithner K., Stohr M., Im S. H., Arndt C. M., Steinberg A. M.** Formation and flame-induced suppression of the precessing vortex core in a swirl combustor: Experiments and linear stability analysis. *Combustion and Flame*, 2015, vol. 162 (8). DOI 10.1016/j.combustflame.2015.02.015
5. **Chinnici A., Arjomandi M., Tian Z. F., Nathan G. J.** Novel Solar Expanding-Vortex Particle Reactor: Experimental and Numerical Investigation of the Iso-thermal Flow Field and Particle Deposition. *Sol. Energy*, 2016, no. 133, p. 451–464. DOI10.1016/j.solener.2016.04.006
6. **Chinnici A., Arjomandi M., Tian Z. F., Nathan G. J.** Novel Solar Expanding-Vortex Particle Reactor: Influence of Vortex Structure on Particle Residence Times and Trajectories. *Sol. Energy*, 2015, no. 122, p. 58–75. DOI 10.1016/j.solener.2015.08.017
7. **Romeo S.-R. et al.** Axisymmetric swirling flow simulation of the draft tube vortex in Francis turbines at partial discharge. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2009, vol. 2, no. 4, p. 295–302.
8. **Nishi M., Liu S.** An outlook on the draft-tube-surge study. *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, 2013, no. 6, p. 33–48. DOI10.5293/IJFMS.2013.6.1.033
9. **Weske D. R., Sturov G. Ye.** Experimental Study of Turbulent Swirled Flows in a Cylindrical Tube. *Fluid Mechanics – Soviet Research*, 1974, vol. 3 (1).
10. **Gupta A., Lilley D. G., Syred N.** Swirl Flow. In: Energy & Engineering Sciences Series. Abacus Press, 1984.
11. **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.
12. **Chigier N. A., Beer J. M.** Velocity and static-pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles. *Journal of Basic Engineering*, 1964, vol. 86 (4), p. 788–796.
13. **Kitoh Osami.** Experimental Study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 225, p. 445–479.
14. **Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I.** An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor. *Experiments in Fluids*, 2006, vol. 40 (2), p. 177–187.
15. **Talbot L.** Laminar Swirling Pipe Flow. *Trans. of the ASME*, 1954, no. 21, p. 1–7.
16. **Bradshaw P.** The Analogy between Streamline Curvature and Buoyancy in Turbulent Shear Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, no. 36, p. 77.
17. **Rochino A., Lavan Z.** Analytical Investigations of Incompressible Turbulent Swirling Flow in Stationary Ducts. In: *Trans. of the ASME*, 1969, p. 151–158.
18. **Lilley D. G., Chigier N. A.** Non Isotropic Turbulent Stress Distribution in Swirling Flows From Mean Value Distribution. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1971, no. 14, p. 573.
19. **Gibson N. M., Younis B. A.** Calculation of Swirling Flow Jets With a Reynolds Stress Closure. *Physics of Fluids*, 1986, no. 29, p. 38.
20. **Kobayashi T., Yoda M.** Modified k – Model for Turbulent Swirling Flow. *Int. J. JSME*, 1987, no. 30, p. 66.
21. **Escudier M. P., Bornstein J., Zehnder N.** Observations and LDA measurements of confined turbulent vortex flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, vol. 98 (1), p. 49–63.
22. **Escudier M. P., Nickson A. K., Poole R. J.** Influence of outlet geometry on strongly swirling turbulent flow through a circular tube. *Physics of Fluids*, 2006, vol. 18 (12), p. 125103.
23. **Magaud F., Najafi A., Angilella J., Souhar M.** Modeling and Qualitative Experiments on Swirling Bubbly Flows: Single Bubble With Rossby Number of Order 1. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, vol. 125, p. 239–246.

24. **Uchiyama T., Ishiguro Y.** Study of the interactions between rising air bubbles and vortex core of swirling water flow around vertical axis. *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 142, p. 137–143.
25. **Liu W., Bai B.** Swirl decay in the gas-liquid two-phase flow inside a circular straight pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, vol. 68, p. 187–195.
26. **Hreiz R., Gentric C., Midoux N., Lainé R., Fünfschilling D.** Hydrodynamics and velocity measurements in gas – liquid swirling flows in cylindrical cyclones. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, vol. 92, p. 2231–2246.
27. **Alekseenko S. V., Shtork S. I., Yusupov R. R.** The Effect of the Air-Delivery Method on Parameters of the Precessing Vortex Core in a Hydrodynamic Vortex Chamber. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44 (3), p. 217–220.
28. Rivetti A., Angulo M., Lucino C., Liscia S. Pressurized air injection in an axial hydro-turbine model for the mitigation of tip leakage cavitation. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2015, no. 656, p. 012069. DOI 10.1088/1742-6596/656/1/012069
29. **Скрипкин С. Г., Куйбин П. А., Шторк С. И.** Влияние инжекции воздуха на параметры закрученного течения в модели отсасывающей трубы Turbine-99 // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41 (13). С. 48–55.  
**Skripkin S. G., Kuibin P. A., Shtork S. I.** The effect of air injection on the parameters of swirling flow in a Turbine-99 draft tube model. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41 (13), p. 48–55. (in Russ.)
30. **Papillon B., Sabourin M., Couston M., Deschênes C.** «Methods for air admission in hydroturbines. In: Proc. 21<sup>st</sup> IAHR Symp. Hydraul. Mach. Syst. Lausanne, 2002.
31. **Скрипкин С. Г., Дремов С. В., Шторк С. И., Кабардин И. К.** Экспериментальное исследование пары прецессирующих спиральных вихрей в гидродинамической вихревой камере // Сибирский физический журнал. 2016. Т. 11 (4). С. 17–24.  
**Skripkin S. G., Dremov S. V., Shtork S. I., Kabardin I. K.** Experimental Investigation of Couple Precessing Vortex Ropes in a Hydraulic Vortex. *Siberian Journal of Physics*, 2016, vol. 11, no. 4, p. 17–24. (in Russ.)
32. **Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И.** Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10 (2). С. 73–82.  
**Skripkin S. G., Tsoy M. A., Shtork S. I.** Experimental Investigation of Double Precessing Vortex Rope Forming in Draft Tube Models. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10 (2), p. 73–82.
33. **Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л.** Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003.  
**Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L.** Theory of concentrated vortices: An introduction. Novosibirsk, 2003. (in Russ.)
34. **Naumov I. V., Dvoynishnikov S. V., Kabardin I. K., Tsoy M. A.** Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections. *Physics of Fluids*, 2015, vol. 27 (12), p. 124103. DOI 10.1063/1.4936764
35. **Naumov I. V., Mikkelsen R., Okulov V. L., Sorensen J. N.** PIV and LDA measurements of the wake behind a wind turbine model. *Journal of Physics Conference Series*, 2014, vol. 524 (1), p. 012168. DOI 10.1088/1742-6596/524/1/012168

36. **Akhmetov D. G., Nikulin V. V.** Features of the vortex-core precession in a cylindrical chamber. In: Dokl. Phys., 2010, no. 55, p. 196–198. DOI 10.1134/S1028335810040105

*Материал поступил в редколлегию  
Received  
28.11.2018*

### Сведения об авторах / Information about the Authors

**Дремов Сергей Вячеславович**, студент, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия), лаборант, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

**Sergey V. Dremov**, student, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation), laboratory assistant, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS (2 Kutateladze Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

srdreamov@gmail.com

**Скрипкин Сергей Геннадьевич**, аспирант, инженер-исследователь, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

**Sergey G. Skripkin**, post-graduate student, Research Engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS (2 Kutateladze Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

**Шторк Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 7.1, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия); ведущий научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

**Sergey I. Shtork**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory 7.1, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS (2 Kutateladze Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Leading Researcher, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)