

03

Диагностика пузырьвидного распада вихря в закрученном течении в цилиндре большого удлинения

© Д.В. Куликов, Р. Миккельсен, И.В. Наумов, В.Л. Окулов

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
Факультет ветроэнергетики Датского технического университета,
ДК-2800, Люнгни, Дания
E-mail: naumov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2013 г.

Впервые сообщается о возможности образования областей с противотоком (пузыревидного распада или взрыва вихря) в центре интенсивно закрученного потока, генерируемого в заполненной жидкостью цилиндрической камере большого удлинения с помощью вращения одного из торцов.

Ранее существование пузырьвидного распада было предметом детального исследования в камерах среднего удлинения с высотой до 3.5 радиусов цилиндра, а течение в цилиндре с большими удлинениями ассоциировалось только с режимами вращения самоорганизующихся винтообразных вихревых мультиплетов. Режим с нестационарным пузырьвидным распадом вихря был экспериментально обнаружен в цилиндре с удлинением 4.5.

Явление пузырьвидного или пузырькового распада вихря характеризуется резкой самопроизвольной сменой структуры интенсивно закрученного течения с образованием замкнутых пузырьвидных областей (пузырей) с обратным током жидкости. Данное явление присуще многим практическим приложениям в аэродинамике, геофизике и инженерных науках [1]. В некоторых русскоязычных источниках данное явление также называют взрывом вихря.

В классическом примере закрученного течения, индуцированного вращающейся крышкой в закрытом заполненном жидкостью неподвижном цилиндре, режимными параметрами течения являются относительное удлинение — отношение высоты цилиндра к его радиусу H/R и число Рейнольдса $Re = \Omega R^2/\nu$, где Ω — угловая скорость вращения крышки, а ν — кинематическая вязкость жидкости. В данном течении под действием центробежных сил возникает отток жидкости

вдоль крышки из центра на периферию, затем она, вращаясь, опускается вниз вдоль стенок цилиндра и, разворачиваясь у дна цилиндра, концентрируется в центральный винтообразный вихрь с восходящим потоком вдоль оси [2]. В работе Эскуды [3] для умеренных удлинений ($H/R < 3.5$) были зафиксированы и систематизированы отклонения от этой очевидной структуры течения с возникновением замкнутых зон с противотоком в центральном восходящем вихре, названных его пузырьвидными распадами: с одними, двумя или тремя пузырями. Затем для удлинения $H/R = 2$ при более высоком значении числа Рейнольдса был установлен и детально описан нестационарный пузырьвидный распад с колебанием рециркуляционной зоны вдоль оси цилиндра и ее исчезновением на незначительный промежуток времени в течение полного периода флуктуации [4]. Данный результат удалось получить с помощью совместного использования двух оптических систем диагностики потоков — LDA (Laser Doppler Anemometry) и PIV (Particle Image Velocimetry) [5].

Развитие экспериментальной диагностики течения для цилиндров большого удлинения ($H/R > 3.5$) сначала было сосредоточено на другой форме изменения структуры восходящего и изначально осесимметричного центрального вихря — на его мультиспиральном распаде [6,7]. Данный тип распада центрального вихря никак не связан с пузырьвидным распадом, но он был экспериментально обнаружен первым и будет интересен тем, что если на его фоне и сможет возникнуть пузырьковый распад, то, очевидно, на развитие и форму пузыря должно влиять присутствие круговых волн или вращающихся мультиплетов в исходном течении. Дополнительно данная интерпретация может дать простое объяснение искривлению пузырей от осесимметричной формы, предсказанное в численном эксперименте [8].

Следует указать, что регистрация режимов с противотоком для цилиндра большого удлинения оказалась не очень легкой задачей. Пока их удалось явно зафиксировать только для одной конфигурации цилиндра с относительным удлинением 4.5. Подробно экспериментальная установка описана в работе [6]. В качестве рабочей жидкости использовалась 80%-ная водно-глицериновая смесь. Экспериментальные исследования были выполнены при температуре 22.3°C и кинематической вязкости рабочей жидкости $\nu = 49.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Угловая скорость вращения крышки замкнутого цилиндрического контейнера составляла от 0.37 оборотов в секунду при $Re = 1000$ до 1.8 оборотов в

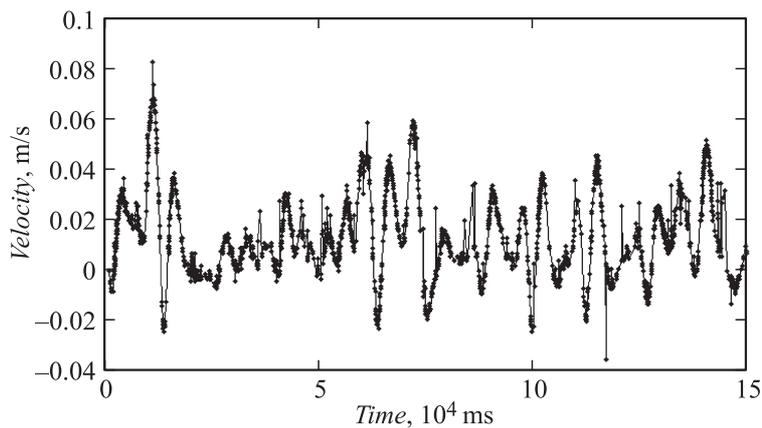


Рис. 1. Временная LDA реализация осевой компоненты скорости в точке 1/8 высоты цилиндра (высота от дна 81 mm) на оси цилиндра при $Re = 4500$.

секунду при $Re = 5000$. Изменение режима течения происходило путем изменения угловой скорости вращения крышки с помощью шагового двигателя, обеспечивающего необходимую скорость вращения крышки с погрешностью менее 0.2%. После установки определенной скорости вращения диска делалась пауза 300 s для формирования устойчивого режима течения. Для диагностики течения использовались LDA и PIV фирмы Dantec. В качестве светорассеивающих трассеров в рабочую смесь засеивались полиамидные сферы диаметром $20 \mu\text{m}$ с нейтральной плавучестью. Погрешность измерений мгновенного поля скорости PIV составляла 10–15%, в то время как погрешность измерения LDA временных реализаций не превышала 3%. Концентрация засеивающих частиц обеспечивала регистрацию доплеровских всплесков порядка 20 в секунду.

Анализ LDA временных реализаций показал возможность существования противотока для некоторых выбранных режимов течения в фиксированной точке на оси цилиндра. Характерный график осцилляций вертикальной компоненты скорости в точке 1/8 высоты цилиндра (высота от дна 81 mm) на оси цилиндра при $Re = 4500$ приведен на рис. 1. Точки, в которых амплитуда колебаний пересекает нулевую ось, говорят о наличии возвратного течения. Однако относительное время существо-

вания режимов с противотоком оказалось крайне незначительным, а их появление нерегулярным, что существенно отличает исследованный ранее [5] режим течения для относительного удлинения 2, когда время отсутствия пузыря было незначительным, а его динамика была периодическим процессом. Для рассматриваемого удлинения 4.5 установленный здесь факт вполне объяснил сложность экспериментального поиска и дальнейшего исследования режимов с пузырьвидным распадом, так как они просто оказались достаточно мимолетны. По этой причине сначала был использован только LDA, позволяющий получать информацию о непрерывном изменении скорости с хорошим временным разрешением, но только для одной фиксированной точки исследуемого течения. Для получения объективной информации о возникновении противотока (изменения направления течения вдоль оси цилиндра) в рассматриваемом случае было протестировано несколько точек вдоль оси цилиндра, упомянутых выше, так как ни положение, ни момент возникновения пузырей изначально не были известны. Схематично рабочий участок экспериментальной установки с нанесенными положениями измерительных точек изображен на левой схеме рис. 2. Временные реализации LDA были получены на оси цилиндра в измерительных точках 1/8, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3 и 3/4 высоты цилиндра, составляющей $H = 4.5R$.

Длительность реализации измерения вертикальной компоненты скорости на оси цилиндра в точках составляла 150 s, что обеспечивало регистрацию до 3000 событий. Для наглядного представления во всех протестированных точках и для всех исследованных значений чисел Рейнольдса определялись максимальное, минимальное и среднее значение осевой компоненты скорости. Примеры зависимостей этих величин от числа Рейнольдса ($1000 < Re < 5000$) приведены в правой колонке на рис. 2: сверху для крайней верхней и снизу для самой нижней точки соответственно. Из обоих графиков видно, что рост амплитуды пульсаций (или размаха между максимальным и минимальным значением скорости) начинается для верхней и нижней точки при $Re = 2800$. Остановимся сначала на анализе стационарных режимов. Наличие для них малого и примерно постоянного размаха пульсаций при Re от 1000 до 2800 следует отнести на счет погрешностей эксперимента, в частности, связанных с невозможностью точно горизонтально выставить вращающуюся крышку. Естественно, что ее влияние в верхней точке больше. В нижней части контейнера до значений числа Рейнольдса 1400 почти отсутствует движение жидкости, а начиная со значения 1600

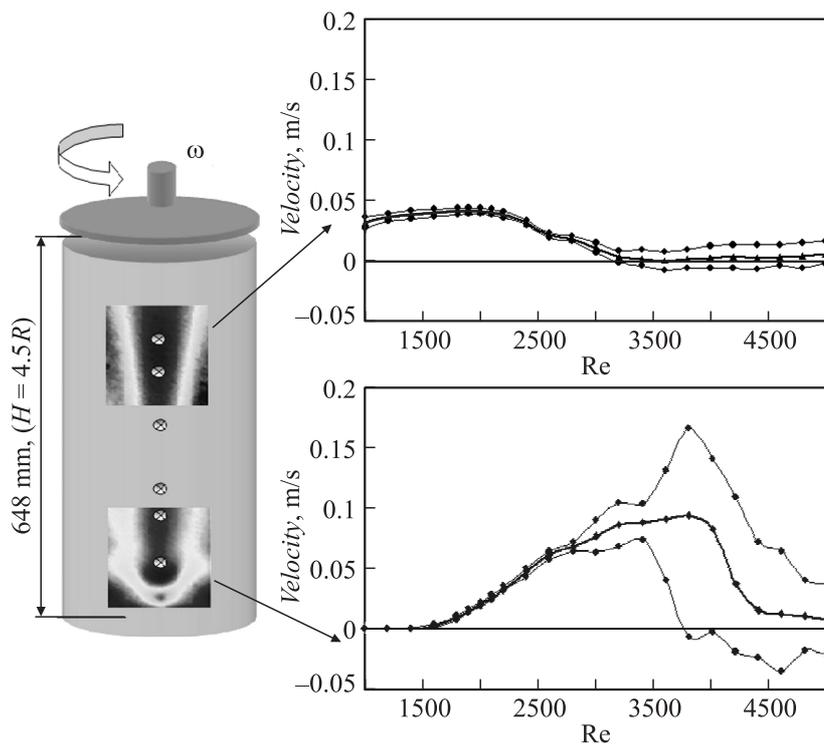


Рис. 2. Схема установки и измерительных точек (слева) и значения средней, минимальной и максимальной осевой компоненты скорости (справа) для верхней и нижней измерительных точек при увеличении числа Рейнольдса.

и до 2800 происходит практически линейный рост осевой скорости с малыми фоновыми пульсациями. Далее, при формировании нестационарных режимов, флуктуаций осевой компоненты скорости в нижней части цилиндра носят более интенсивный характер. Разница также наблюдается и в определении момента возникновения отрицательных скоростей, т.е. момента, когда минимальная скорость становится отрицательной. В верхней точке они возникают раньше при $Re \geq 3200$, а в нижней части только при $Re \geq 3800$. В обоих случаях средняя скорость с ростом Рейнольдса сначала растет, а потом резко убывает,

но никогда не становится отрицательной. С помощью проведенного LDA тестирования были обнаружены режимы с противотоком вдоль оси цилиндра, что подтверждает их численное предсказание в [8]. Отметим, что доказательство существования противотока — возвратного течения в отдельных точках на оси цилиндра не дает полную информацию о пузырьковом распаде, так как не содержит информации о структуре и размерах пузырей и их количестве. Для получения достоверного пространственного распределения мгновенного поля скорости обычно используют PIV, дающей мгновенный образ в плоских сечениях светового ножа по трекам маркировочных частиц нейтральной плавучести [5]. Для исследуемого здесь случая при $Re \geq 3200$ в потоке присутствуют сразу несколько гармонических колебаний [9]. Несмотря на то что колебание пузыря доминирует над другими гармониками, пренебрегать их влиянием при фазовом осреднении нельзя. Это становится очевидным из анализа фрагмента осциллограммы, размещенной на рис. 1. В связи с этим для получения адекватного PIV-образа было проведено квазифазовое осреднение мгновенных полей осевой скорости, т. е. все PIV-образы, измеренные для заданной фазы основных колебаний, дополнительно фильтровались и оставлялись только те, которым соответствовали близкие значения минимальной скорости согласно анализу осциллограмм.

Для детализации области возвратного течения измерительная область PIV составляла 180×145 mm, что существенно меньше размера цилиндра. По этой причине верхняя и нижние зоны образования пузырей исследовались отдельно. Одна серия экспериментов для визуализации течения около вращающегося диска проводилась на высоте 430 mm от дна цилиндра (центр измерительной зоны PIV), другая — для исследования течения у неподвижного дна на высоте 80 mm (левая схема на рис. 2).

Следует отметить, что частоты пульсаций верхнего и нижнего пузырьковидных распадов f_1 и f_2 различны и составляют 0.10 и 0.16 Hz. Общая картина течения выглядит так, что оба пузырьковых распада существуют и развиваются независимо, как и в случае двойного стационарного пузырькового распада для умеренных удлинений цилиндра [3]. Примеры распределения осевой скорости в верхнем и нижнем окне для двух противофазных изменений структуры течения при $Re = 4500$ представлены на рис. 3. В верхнем ряду показаны распределения скорости в моменты времени $t = 0$ (a) и $t = 1/(2f_1)$ (b) для верхнего

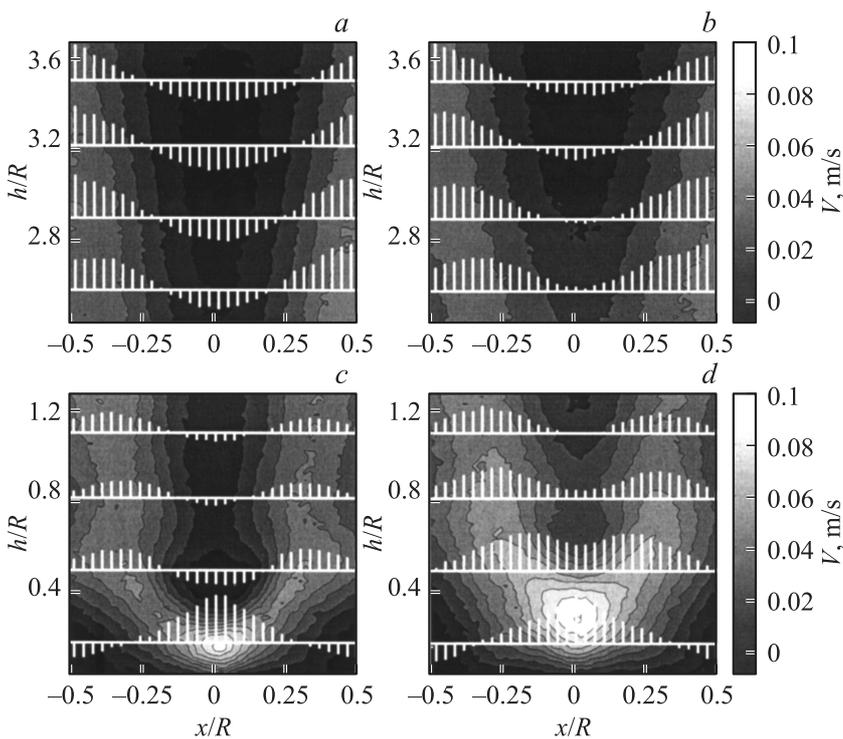


Рис. 3. Мгновенные поля скорости, выполненные в противофазе для верхнего (a) и нижнего (b) PIV окон ($H/R = 4.5$, $Re = 4500$) с нанесенными профилями осевой компоненты скорости.

окна и в моменты времени $t = 0$ (c) и $t = 1/(2f_2)$ (d) для нижнего окна. Экспериментальные результаты подтверждают наличие пузырьчатого распада с отрицательными значениями скорости, обозначенной темным цветом (рис. 3), и возвратным течением — отрицательным значением осевой компоненты скорости. Для лучшего понимания локальной структуры течения на рис. 3 дополнительно приведены профили осевой компоненты скорости $V(r)$ с равномерным шагом в различных горизонтальных сечениях цилиндра, вблизи центров замкнутых контуров изолиний. У дна цилиндра присутствует более сильная деформация

структуры течения, но зоны с отрицательными значениями скорости здесь регистрируются тоже однозначно.

Таким образом, в данном исследовании впервые открыты нестационарные пузырьвидные распады вихря для цилиндра большого удлинения $H/R = 4.5$. Сначала, начиная с чисел Рейнольдса 3200, возникновение приосевой зоны обратного течения наблюдалось только в верхней части цилиндра у вращающейся крышки. При увеличении числа Рейнольдса до 3800 происходит формирование второй зоны обратного течения у дна цилиндра, т.е. появляется нестационарный аналог двойного стационарного распада вихря пузырьвидного типа, существующего при умеренных удлинениях цилиндра.

Работа выполнена при частичной поддержке школы НШ-6686.2012.8 „Процессы переноса в вихревых и волновых течениях“.

Список литературы

- [1] *Алексеев С.В., Окулов В.Л.* // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 2. С. 101–138.
- [2] *Okulov V.L., Sorensen J.N., Voigt L.K.* // European J. Mechanics B. 2005. V. 24 (1). P. 137–148.
- [3] *Escudier M.P.* // Exp. Fluid. 1984. V. 2. P. 189–196.
- [4] *Наумов И.В., Окулов В.Л., Майер К.Е., Соренсен Ж.Н., Шен В.З.* // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10(2). С. 151–156.
- [5] *Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н.* // ЖТФ. 2007. Т. 77(5). С. 47–57.
- [6] *Sorensen J.N., Naumov I.V., Okulov V.L.* // J. Fluid Mech. 2011. V. 683. P. 430–441.
- [7] *Наумов И.В., Окулов В.Л., Соренсен Ж.Н.* // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17 (4). С. 585–593.
- [8] *Serre E., Bontoux P.* // J. Fluid Mech. 2002. V. 459. P. 347–370.
- [9] *Sorensen J.N., Gelfgat A.Yu., Naumov I.V., Mikkelsen R.F.* // Phys. Fluids. 2009. V. 21. P. 054 102.