

УДК 621.4

Формирование застойной зоны на оси замкнутого закрученного течения*

И.В. Наумов¹, Р.Ф. Миккельсен², В.Л. Окулов¹

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

²Датский технический университет, Люнгби, Дания

E-mail: naumov@itp.nsc.ru

Выявлены особенности образования области с противотоком (пузыревидного распада или взрыва вихря) в центре интенсивно закрученного потока, генерируемого в заполненном жидкостью цилиндрическом контейнере с помощью вращения одного из торцов. В ходе проведенных наблюдений установлено, что сценарий возникновения области пузыревидного распада с образованием возвратного течения един как для малого, так и для большого относительного удлинения и не зависит от границы перехода от стационарного к нестационарному режиму основного вихревого движения.

Ключевые слова: ограниченное вихревое течение, нестационарный распад вихря, возвратное течение, цифровая трассерная визуализация.

Явление пузыревидного распада вихря характеризуется самопроизвольной сменой структуры закрученного течения и образованием застойных зон с обратным током жидкости. В классическом примере закрученного течения, индуцированного вращающейся крышкой в закрытом, заполненном жидкостью неподвижном цилиндре, режимными параметрами течения являются относительное удлинение h — 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 таком 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. В работе [1] для умеренных удлинений h от 1 до 3,5 были визуальны зафиксированы и систематизированы отклонения от этой очевидной структуры течения с регистрацией в центральном восходящем вихре замкнутых зон с противотоком. Аномальное поведение было ассоциировано с распадом вихря: с одним, двумя или тремя пузырями. В цилиндре с большими удлинениями в диапазоне h от 3,3 до 5 была выявлена новая форма распада центрального вихря в виде вихревых мультиплетов [2, 3]. Однако при проведении более

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

детального экспериментального исследования для одного фиксированного удлинения $h = 4,5$ было также обнаружено и существование нестационарного распада пузырьвидного типа [4]. Интересно отметить, что возможность пузырьвидного распада ранее наблюдалась в численном расчете для $h = 4$ [5]. Целью настоящей работы является экспериментальное изучение регулярности образования застойных зон — пузырей на оси цилиндра при разных удлинениях — путем анализа мгновенных и средних полей скорости течения цифровой трассерной визуализацией (PIV). Предметом исследования стало наблюдение формирования и эволюции распада вихря пузырьвидного типа в каверне с удлинениями от 1 до 5.

PIV-визуализация осевого вихря и его распада была проведена в вертикальном цилиндрическом контейнере, выполненном из прозрачного оргстекла оптического качества, внутренним диаметром 288 мм ($R = 144$ мм) и с вращающейся верхней крышкой для разных значений высоты цилиндра. Детальное описание экспериментальной установки и ограничений применимости оптических методов для данной конфигурации течения можно найти в работах [6, 7]. Трассерами служили засеивающие полиамидные частицы нейтральной плавучести размером 10 мкм. В качестве рабочей жидкости использовалась 80-процентная водно-глицериновая смесь. Кинематическая вязкость предварительно измерялась капиллярным вискозиметром в нескольких точках в диапазоне температур 18,5–26,3 °С. Экспериментальные исследования выполнялись при температуре 22,1 °С и кинематической вязкости рабочей жидкости $\nu = 46,7 \times 10^{-6}$ м²/с. Для устранения оптических искажений криволинейной поверхности цилиндра и термостабилизации рабочей жидкости контейнер был помещен в стеклянный куб объемом 1 м³, заполненный водопроводной водой. Угловая скорость вращения крышки цилиндрического контейнера изменялась от 0,29 оборотов в секунду при $Re = 900$ до 1,74 при $Re = 5000$.

Для наблюдения полной структуры течения мгновенное поле скорости впервые фиксировалось во всем вертикальном сечении цилиндра в отличие от предыдущих работ [4, 6 и 7], где применялись окна наблюдения с возможностью частичного исследования течения в диаметральном сечении. Для создания такой возможности была адаптирована стерео PIV система. Учитывая, что появление противотока регистрируется в двумерном диаметральном сечении, обе камеры стереосистемы были установлены фронтально с вертикальным сдвигом напротив геометрической оси контейнера. Размер регистрируемого суммарного сечения был эквивалентен максимальной высоте цилиндра при незначительном перекрытии измеряемых областей для минимизации ошибок при склеивании областей. Синхронизация работы камер обеспечивалась стандартными средствами работы стерео системы. Регистрация полной картины течения сразу во всем сечении цилиндра позволяет проследить особенности поведения осевой компоненты скорости вдоль оси цилиндра и выявить условия формирования застойной зоны.

На рис. 1 приведено изменение структуры осевой компоненты скорости при увеличении числа Рейнольдса на примере течения для $h = 2,5$. При увеличении скорости вращения диска на оси цилиндра сначала происходит замедление осевой компоненты скорости. При дальнейшем увеличении вращения диска эта область с пониженным значением осевой компоненты скорости увеличивается и ее граница движется вниз против восходящего вдоль оси закрученного потока, т.е. перемещается в направлении неподвижного торца цилиндра с одновременным торможением течения на его оси. На фиксированном расстоянии X от неподвижного торца (рис. 1, $Re = 1700$) осевая скорость достигает нулевого значения. Дальнейшее увеличение скорости вращения диска приводит к формированию области возвратного течения в виде пузырьвидного распада вихря. Следует указать на один обнаруженный интересный факт: место этой первой остановки восходящего потока

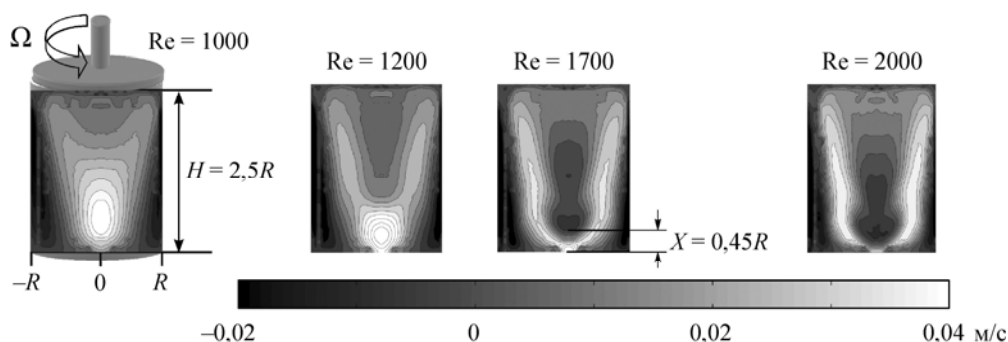


Рис. 1. Структура течения в диаметральном сечении контейнера при увеличении числа Рейнольдса для удлинения $h = 2,5$.

на оси цилиндра не зависит от его удлинения. Эта первая критическая точка практически всегда находится на высоте $X = 0,45R$ от неподвижного дна цилиндра (см. таблицу).

Хотя формирование первой критической точки и происходит на одинаковой высоте относительно неподвижного дна, сценарии развития течения немного отличаются при разных относительных удлинениях цилиндра. Общей закономерностью является то, что после формирования критической точки, при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса наблюдается возникновение замкнутой рециркуляционной зоны — пузыря. Его смещение вниз происходит практически до дна цилиндра ($X = 0,1 R$). Различием является возможность появления при некоторых удлинениях второй и третьей критических точек вверх по оси цилиндра и соответственно второго и третьего пузырей, описанных в работе [1]. Другим отличием в развитии течений является развитие нестационарных колебаний: при относительно малых удлинениях ($h \leq 3,2$) первая критическая точка возникает при еще стационарном течении, тогда как при больших удлинениях возвратные течения формируются на фоне развитых колебаний течения. Еще одна особенность связана с разным типом колебаний основного течения от осевой до нескольких азимутальных мод, на фоне которых развивается возвратное течение [6]. Поэтому дальнейшее исследование проводилось для осредненных картин течения. Период пульсаций пузыря на оси цилиндра был порядка 10 с, а восстановленное среднее поле скорости и положение критической точки определялись по усреднению 300 мгновенных полей скорости, полученных с временным разрешением 0,25 с. Статистический интервал положения критической точки Δx для нестационарных режимов течения дополнительно приведен в таблице. Видно, что с увеличением числа Рейнольдса наблюдается ожидаемый рост амплитуды колебаний.

В результате проведенных исследований по средним характеристикам течения была определена зависимость (штрихпунктирная линия на рис. 2, проведенная через экспериментальные точки 1) появления первой критической точки от h и Re . Зависимость оказалась

Таблица

Зависимость положения первой критической точки на оси контейнера от Re

H/R	Re	X , мм	X/R	Δx , мм	$\Delta x/R$
1,5	900	67	0,47	—	—
2,0	1200	71	0,49	—	—
2,5	1700	65	0,45	—	—
3,0	2100	63	0,44	—	—
3,5	2400	64	0,44	14	0,1
4,0	2900	63	0,44	28	0,2
4,5	3300	62	0,44	85	0,6
4,7	3400	63	0,44	100	0,7

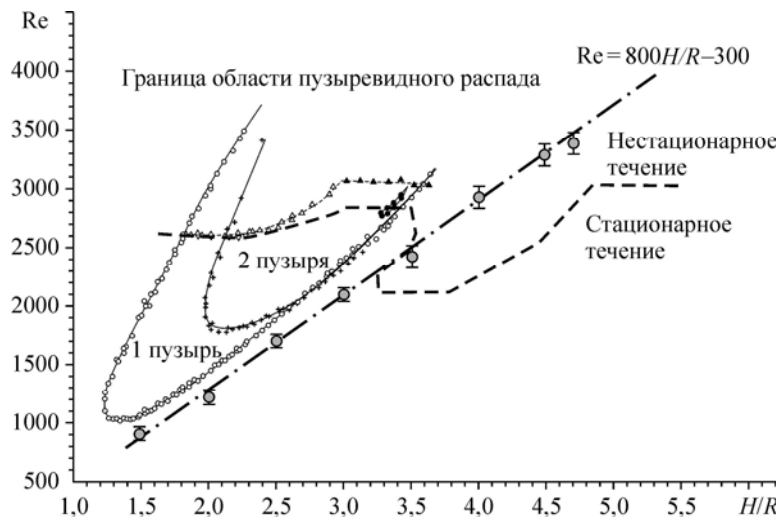


Рис. 2. Диаграмма возникновения нижней критической точки появления возвратного течения.
Кружки — критические точки на оси.

линейной и находилась ниже кривой (сплошная линия с мелкими символами), которая соответствует возникновению пузыря в работе [1]. Это вполне согласуется с тем, что появление критической точки должно предшествовать возникновению нового топологического образования в виде замкнутой области распада вихря.

Таким образом, более детальная PIV визуализация и обширное параметрическое исследование эволюции структуры течения в замкнутом цилиндре с вращающимся торцом позволили впервые установить линейное поведение границы возникновения критической точки на оси цилиндра в зависимости от изменения числа Рейнольдса и параметра удлинения. Дополнительно было установлено, что точка возникновения первого критического значения не зависит от удлинения цилиндра и находится всегда на расстоянии $X = 0,45R$ от его неподвижного дна.

Список литературы

1. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall // *Exp. Fluids*. 1984. Vol. 2. P. 189–196.
2. Sørensen J.N., Naumov I.V., Okulov V.L. Multiple helical modes of vortex breakdown // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 683. P. 430–441.
3. Наумов И.В., Окулов В.Л., Соренсен Ж.Н. Диагностирование пространственной структуры вихревых мультиплетов в закрученном течении // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 4. С. 585–593.
4. Куликов Д.В., Миккельсен Р., Наумов И.В., Окулов В.Л. Диагностика пузырьвидного распада вихря в закрученном течении в цилиндре большого удлинения // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, № 4. С. 87–94.
5. Serre E., Bontoux P. Vortex breakdown in a three-dimensional swirling flow // *J. Fluid Mech.* 2002. Vol. 459. P. 347–370.
6. Sorensen J.N., Naumov I., Mikkelsen R. Experimental investigation of three-dimensional flow instabilities in a rotating lid-driven cavity // *Exp. Fluids*. 2006. Vol. 41, No. 3. P. 425–440.
7. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77, № 5. С. 47–57.

Статья поступила в редакцию 18 августа 2014 г.,
после доработки — 6 сентября 2014 г.