

УДК 621.4

Структура ограниченного закрученного течения при различных фазовых граничных условиях на неподвижном торце цилиндра *

И.В. Наумов¹, М.В. Кашкарова¹, Р.Ф. Миккельсен², В.Л. Окулов^{1,2}

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

²Датский технический университет, Люнгби, Дания

E-mail: naumov@itp.nsc.ru

В работе анализируется сложная топология закрученных течений, генерируемых в цилиндре его вращающимся торцом. С помощью визуализации течения при различных параметрах крутки верхнего торца цилиндра показаны общие закономерности эволюции области с противотоком (пузыревидный распад вихря) вне зависимости от контакта исследуемого вихревого потока с различными жидкостями или газом на свободном торце. В ходе исследований впервые установлено, что сценарий возникновения области пузыревидного распада слабо зависит от свойств среды, ограничивающей циркуляцию рабочей жидкости, но существенно отличается от динамики вихревых течений, ограниченных «твердой» второй стенкой — неподвижным торцом цилиндра. Например, при распаде приосевого вихря выявлены режимы стационарного вихревого движения с возникновением контакта рециркуляционной зоны с поверхностью границы раздела двух сред, что не свойственно замкнутым течениям.

Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего развития вихревых аппаратов и реакторов, обеспечивающих сложное вихревое движение ингредиентов для интенсификации массопереноса, как в отношении оптимизации работы действующих установок, так и для проектирования новых устройств.

Ключевые слова: вихревые аппараты и реакторы, распад вихря, тепло- и массоперенос в закрученных потоках.

Введение

Цилиндр с вращающимся торцом является элементарной моделью, используемой в различных вихревых устройствах, интенсифицирующих тепломассообмен и другие процессы в различных химических, биологических реакторах и т.п. В работах [1–3] рассматривались различные устройства с разными формами контакта закрученной рабочей жидкости с внешней средой на невращающемся торце цилиндра. В классическом примере закрученного течения этим торцом является неподвижная твердая крышка, выполненная из того же материала, что и стенки цилиндра. В таком закрытом и полностью заполненном жидкостью цилиндре режимными параметрами течения являются относительное удлинение h , равное отношению высоты цилиндра к его радиусу (H/R), и число

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 19-19-00083).

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 жидкость, вращаясь, опускается вниз вдоль стенок цилиндра и, разворачиваясь у дна цилиндра, концентрируется в центральный винтообразный вихрь с восходящим потоком вдоль оси. В работе [4] для умеренных удлинений h (от 1,0 до 3,5) были визуальны зафиксированы и систематизированы отклонения от этой очевидной структуры течения с регистрацией в центральном восходящем вихре замкнутых зон с противотоком. Такие застойные рециркуляционные зоны обычно исключены из общего циркуляционного движения, способствующего обменным процессам, поэтому регистрация режимов с их появлением играет важную роль в оценке работы вихревых реакторов [5, 6].

В отличие от приведенного классического примера во многих вихревых аппаратах допускается взаимодействие вращающейся рабочей жидкости со свободной границей другой жидкости или воздуха, например, при неполном заполнении реактора рабочей жидкостью и пр. [2, 7]. В настоящей работе впервые сообщается о выявленном подобии в закономерностях образования и эволюции рециркуляционных зон в центре и на свободном торце интенсивно закрученного потока, генерируемого в неоднородно заполненном цилиндре с помощью вращения противоположного торца. В ходе проведенных сопоставлений результатов наблюдений, полученных в работах [2, 8–10] и в данном исследовании, было установлено, что сценарий возникновения рециркуляционной области слабо зависит от типа среды на свободной границе. Демонстрация и анализ данного факта является основной целью настоящей работы.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Для определения диаграммы режимов возникновения рециркуляционных зон в системе из двух несмешиваемых жидкостей различной плотности использовалась установка для бесконтактных оптических методов исследования ограниченных закрученных течений, изображенная на рис. 1а, где $h_0 = h - h_w$ — безразмерная высота слоя масла в состоянии покоя (в отсутствии вращения диска), нормированная на R . Существование рециркуляционных зон на этой установке для классического случая одной жидкости ранее было установлено в работах [5, 11], где было показано, что вне зависимости от того, какой торец цилиндра вращается, этапы эволюции распада вихря в цилиндрическом контейнере не меняются и полностью соответствуют диаграмме, полученной в работе [4]. Это означает, что сила тяжести не оказывает существенного

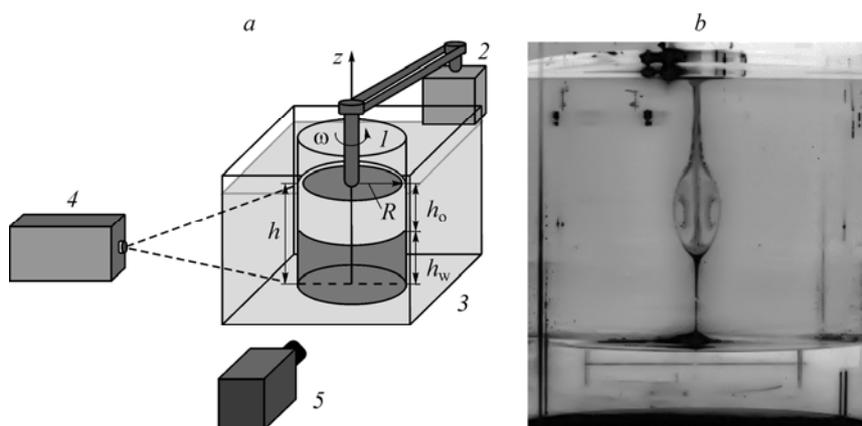


Рис. 1. Схема установки (а) и пример визуализации течения в центральном сечении цилиндра (б) при $h_0 = 1,5$, $h_w = 0,5$ и $Re = 800$. Пояснения см. в тексте.

влияния на развитие структуры течения. Эксперименты проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере l с радиусом $R = 144$ мм и высотой $50 \text{ мм} < h < 600$ мм, выполненном из оргстекла оптического качества. Для исследований контейнер заполнялся двумя несмешивающимися жидкостями: водой ($0 < z < h_w$) и подсолнечным маслом ($h_w < z < h$), где z — расстояние от дна контейнера. При комнатной температуре ($22,6$ °C) плотности и кинематические вязкости жидкостей составляют: $\rho_w = 1000$ кг/м³, $\rho_o = 920$ кг/м³, $\nu_w = 1,011$ сСт, $\nu_o = 54,86$ сСт; индексы «w» и «o» обозначают «вода» и «масло» соответственно. Поверхностное натяжение на границе раздела жидкостей $\sigma = 0,0315$ Н/м. Разница в плотности жидкостей обеспечивала устойчивую границу раздела. В качестве верхней крышки, ограничивающей рабочую высоту цилиндра, был установлен вращающийся диск радиусом $R_D = 143,5$ мм и толщиной 10 мм. Зазор между диском и неподвижными стенками цилиндра составлял 0,5 мм и не вносил видимых искажений в топологию вихревого течения [11]. Движение жидкостей генерировалось верхним диском, который вращался с угловой скоростью Ω , в то время как другие стенки контейнера были неподвижны. Вращение диска задавалось шаговым двигателем 2, а его интенсивность характеризуется числом Рейнольдса $Re = \Omega R^2 / \nu_0$. Для поддержания постоянной температуры с точностью до 0,1 °C и предотвращения оптических искажений использовался резервуар 3 размером $0,7 \times 0,7 \times 0,8$ м³, заполненный водопроводной водой. Для изучения характеристик применялись оптические методы бесконтактной диагностики — визуализация течения в центральном сечении цилиндра с помощью лазерного «ножа». Система включала импульсный лазер Nd: YAG 4 с длиной волны 532 нм, толщиной лазерного ножа 1 мм, мощностью импульсов 120 мДж, рабочей частотой 4 Гц. Изображения регистрировались камерой HiSense II 5 с разрешением 1344×1024 пикселей и объективом NIKON AF 28 mm f/2.8D. В качестве светорассеивающих частиц использовались полиамидные частицы нейтральной плавучести со средним диаметром 10 мкм. Для каждого режима течения была получена серия из 400 изображений с временным интервалом 0,25 сек и затем проведено осреднение. На рис. 1b приведен пример визуализации потока для параметров $Re = 800$, $h_o = 1,5R$, $h_w = 0,25R$.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Данное исследование по влиянию невращающихся торцов разных типов на состояние течения проводилось путем сопоставления результатов, полученных описанным выше методом, с результатами других наблюдений. В работе [9] аналитически и численно изучалось течение в цилиндрическом контейнере с вращающимся дном и свободной воздушной границей. В работах [8, 10] была проведена визуализация течения для различных значений относительного удлинения (определяемого отношением радиуса цилиндра к его высоте) с помощью лазерного ножа и флуоресцентного красителя. Во всех трех случаях формировалась устойчивая приосевая рециркуляционная зона возвратного течения (рис. 2), характерная для структуры течения в моножидкости. Перечисленные

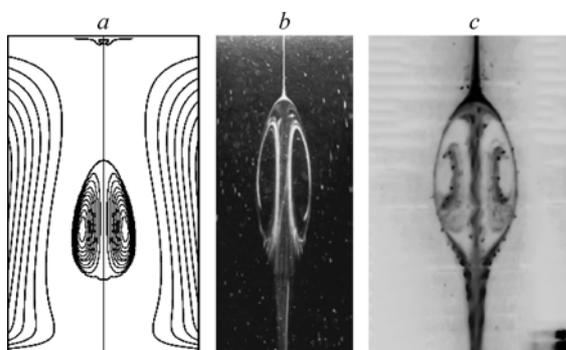


Рис. 2. Примеры появления приосевых возвратных течений при взаимодействии со свободными торцами из сред разной вязкости.

a: вода/воздух, $h = 1,45$, $Re = 810$ [10];
b: глицерин/воздух, $h = 2,0$ и $Re = 1210$ [8];
c: масло/вода, $h_o = 1,5$, $Re = 800$ — результаты настоящей работы.

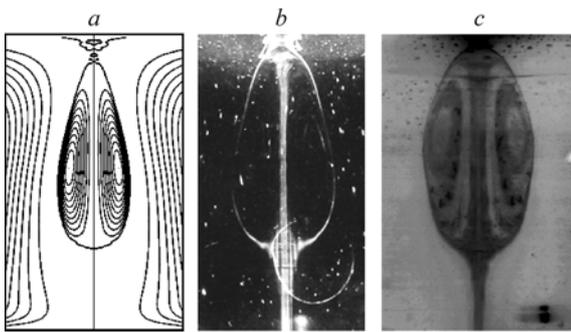


Рис. 3. Примеры зон возвратных течений на начальном этапе взаимодействия со свободными торцом для сред разной вязкости.

a: вода/воздух, $h = 1,45$, $Re = 1010$ [10];
b: глицерин/воздух, $h = 1,5$, $Re = 975$ [8];
c: масло/вода, $h_0 = 1,5$, $Re = 950$ —
 результаты настоящей работы.

режимы диагностируются достаточно хорошо, поскольку течение жидкости остается стационарным

и рециркуляционная зона не осциллирует вдоль оси цилиндра. В работах [8], [10] вращался нижний торец цилиндра, в то время как в настоящей работе — верхний. Поэтому для наглядного сравнения и сопоставления структур течения результаты настоящей работы, представленные на рис. 2*c*, 3*c* и 4*c*, изображены с поворотом на 180°. В случае вращающегося дна и свободной поверхности условия формирования приосевого распада пузыря и его форма значительно отличаются от результатов в закрытом контейнере [4]. В частности, было найдено, что при росте числа Рейнольдса зона возвратного течения на оси цилиндра начинает увеличиваться в диаметре и смещается вверх по течению вдоль оси цилиндра, а затем достигает свободной поверхности (рис. 3). При дальнейшем увеличении крутки торца происходит рост области соприкосновения зоны возвратного течения со свободной границей и видоизменение формы вихря: нижний «полюс» пузыря приближается к свободной границе и «пузырь» преобразуется в два осесимметричных «лепестка», изменяя таким образом свою топологию и переставая быть приосевым (рис. 4).

На рис. 5 показан процесс эволюции «пузыря» — изменение положения и формы области возвратного течения на оси цилиндра при увеличении угловой скорости вращения диска: пузырь зарождается в центральной части цилиндра (рис. 5*a*), далее, с увеличением числа Рейнольдса, он перемещается вверх по течению (вниз к границе раздела двух жидкостей), увеличиваясь в размере (рис. 5*b*), и достигает границы раздела (рис. 5*c*). При дальнейшем увеличении крутки происходит деформация приосевой рециркуляционной зоны и изменение ее топологии с приосевой на поверхностную торообразную: форма сначала становится сердцевидной (рис. 5*d*), а затем полностью распадается на два лепестка (рис. 5*e*). Для более подробного сравнения областей существования рециркуляционных течений в цилиндрическом контейнере при различных типах граничных условий на неподвижном торце цилиндра были построены диаграммы режимов существования приосевой области возвратного течения и прилипания «пузыря» к границе раздела двух сред. Для установления этих границ были проведены серии экспериментов с разными режимными параметрами, полученные результаты сопоставлены с данными работ экспериментального и численного моделирования [4, 8, 9, 12].

Возникновение области возвратного течения «пузыря» определялось визуально по увеличению толщины следа частиц на оси цилиндра в вертикальном сечении при

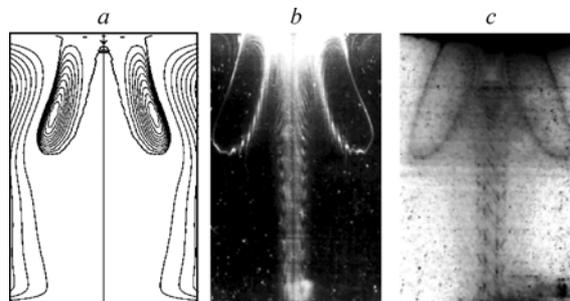


Рис. 4. Примеры присутствия в потоке возвратных течений поверхности при взаимодействии со свободными торцами из сред разной вязкости.

a: вода/воздух, $h = 1,45$, $Re = 1850$ [10];
b: глицерин /воздух, $h = 1,5$, $Re = 2095$ [2];
c: масло/вода, $h_0 = 1,5$, $Re = 2000$ —
 результаты настоящей работы.

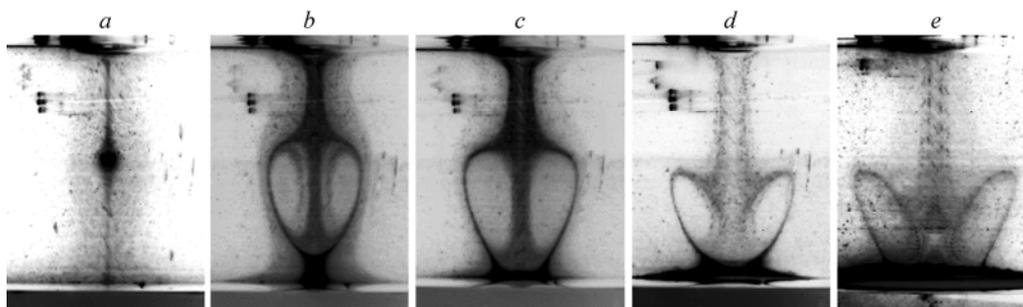


Рис. 5. Структура течения в цилиндрическом контейнере с крутящейся крышкой, заполненного двухкомпонентной рабочей жидкостью ($h_0 = 1,0R$, $h_w = 0,5R$).
 $Re = 450$ (a), 600 (b), 700 (c), 850 (d), 1000 (e).

шаге по числу Рейнольдса, равном 20. Аналогичным способом (визуально) фиксировалось примыкание области возвратного течения к границе раздела и последующее изменение топологии — распад «пузыря» на два лепестка. Таким образом, разброс и неопределенность чисел Рейнольдса составляли ± 20 .

Рис. 6a воспроизводит диаграмму возникновения приосевого распада при взаимодействии с разными торцами. Рис. 6b воспроизводит диаграмму касания рециркуляционной зоны возвратного течения границы раздела двух сред со свободной поверхностью. Для наглядного представления результатов на диаграммах рисунка размер символов, представляющих данные экспериментальных наблюдений (4 на рис. 6a и 2 на рис. 6b), выбран таким образом, чтобы заведомо перекрыть неопределенность по числу Рейнольдса в диапазоне 30–40. Следует отметить, что для случая твердого дна параметры, при которых происходит касание «пузырем» неподвижного торца цилиндра, не фиксируются, так как касание имеет место при развитом нестационарном режиме течения, когда наблюдается перемещение области распада вдоль оси цилиндра и за счет влияния азимутальных волновых мод значительно искажается его форма [5].

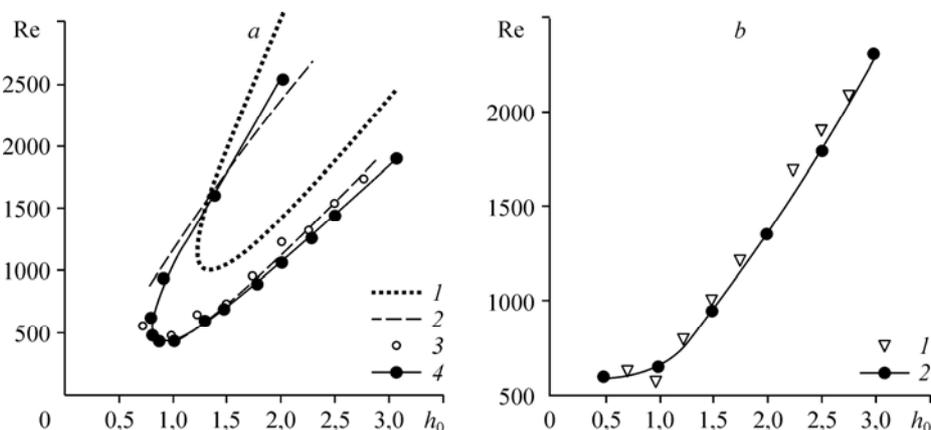


Рис. 6. Диаграммы наличия пузыревидной области возвратного течения на оси цилиндра (a) и примыкания «пузыря» к границе раздела двух сред (b).

- a: 1 — область существования пузыря с неподвижным твердым торцом [4],
 2 — область существования приосевого «пузыря» на оси цилиндра с крутящимся дном и свободной границей, полученная численным моделированием в работе [9],
 3 — данные экспериментов [8], 4 — область существования возвратного течения пузыревидного типа в настоящем исследовании — в замкнутом цилиндре с верхней вращающейся крышкой и «жидким» дном;
 b: 1 — данные работы [8], 2 — данные настоящей работы.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что наличие торца со свободной поверхностью, где свободной поверхностью являются воздух или жидкость другой плотности, существенно влияет на образование рециркуляционной зоны возвратного течения, сдвигая диаграмму его формирования в область меньших чисел Рейнольдса ($\Delta Re \approx 500$) и меньшего относительного удлинения ($\Delta h \approx 0,5$). Однако использование контактных сред с разной на порядки плотностью и вязкостью не оказывает существенного влияния на оба процесса — образования приосевого пузыря и касания им границы раздела двух сред (рис. 6a и 6b).

Полученные результаты представляют интерес для развития вихревых технологий как с точки зрения оптимизации работы действующих установок, так и проектирования новых устройств, поскольку они регламентируют режимы возникновения рециркуляционных течений.

Список литературы

1. Shtern V.N. Counterflows. N. Y.: Cambridge University Press, 2012. 488 p.
2. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Hysteretic growth and decay of a waterspout column // Phys. Rev. Fluids. 2018. Vol. 3, Iss. 2. P. 024701-1–024701-23.
3. Fujimoto S., Takeda Y. Topology changes of the interface between two immiscible liquid layers by a rotating lid // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 80, Iss. 1. P. 015304(R).
4. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall // Exp. Fluids. 1984. Vol. 2. P. 189–196.
5. Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. Формирование застойной зоны на оси замкнутого закрученного течения // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 799–802.
6. Herrada M.A., Shtern V.N., Torregrosa M.M. The instability nature of vogel-escudier flow // J. Fluid Mech. 2015. Vol. 766. P. 590–610.
7. Liow K.Y.S., Tan B.T., Thouas G., Thompson M.C. CFD modeling of the steady-state momentum and oxygen transport in a bioreactor that is driven by an aerial rotating disk // Modern Phys. Letters B. 2009. Vol. 23. P. 121–127.
8. Spohn A., Mory M., Hopfinger E.J. Observations of vortex breakdown in an open cylindrical container with a rotating bottom // Exp. Fluids. 1993. Vol. 14. P. 70–77.
9. Brøns M., Voigt L.K., Sørensen J.N. Topology of vortex breakdown bubbles in a cylinder with a rotating bottom and a free surface // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 428. P. 133–148.
10. Lo Jacono D., Nazarinia M., Brøns M. Experimental vortex breakdown topology in a cylinder with a free surface // Physics of Fluids. 2009. Vol. 21, Iss. 11. P. 111704-1–111704-4.
11. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // Журн. техн. физики. 2007. Т. 77, № 5. С. 47–57.
12. Naumov I.V., Glavniy V.G., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow // Phys. Rev. Fluids. 2019. Vol. 4, Iss. 5. P. 054702-1–054702-17.

*Статья поступила в редакцию 29 мая 2019 г.,
после доработки — 11 июня 2019 г.,
принята к публикации 26 августа 2019 г.*