

УДК 532.527

© 2005 г. А. А. ПАВЕЛЬЕВ, А. А. ШТАРЕВ

ВЛИЯНИЕ СИММЕТРИИ ПОЛОЖЕНИЯ СЛИВНОГО ОТВЕРСТИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ ВОРОНОК

Выполнено экспериментальное исследование влияния положения сливных отверстий на формирование нестационарных вихревых воронок при истечении жидкости из емкости, диаметр которой значительно больше диаметра сливного отверстия. Устройства для заполнения емкости выполнены таким образом, что открытие отверстия на оси цилиндрической емкости непосредственно после ее заполнения не приводило к формированию вихревой воронки при истечении жидкости. Исследовалось формирование вихревых воронок, когда перед открытием сливного отверстия вращался погруженный в жидкость диск. В этом случае над сливным отверстием через некоторое время после начала истечения формировалась вихревая воронка. Это время определялось с помощью цифровой кино съемки, зависело от положения сливного отверстия и возрастало по мере удаления сливного отверстия от оси. Полученные результаты позволяют сделать заключение о сильном влиянии симметрии на формирование вихревых воронок.

Ключевые слова: истечение жидкости из емкости, симметрия течения, вихревая воронка, эксперимент, цифровая кино съемка.

Нестационарное истечение из предварительно заполненных жидкостью емкостей через сливные отверстия небольшого диаметра реализуется во многих бытовых и технических устройствах. В некоторых случаях истечение сопровождается образованием у сливных отверстий вихревых воронок. Систематических экспериментальных исследований данного явления выполнено недостаточно для определения причин образования вихревых воронок в каждом конкретном случае. Кроме того, данный вопрос – часть более общей проблемы, которая может быть охарактеризована как определение условий формирования интенсивного вихревого течения в системах, изначально не содержащих таких вихревых течений.

Можно указать на несколько возможных причин возникновения вихревых воронок: действие сил Кориолиса, неустойчивость течения, асимметрия граничных условий и существование вращения в жидкости перед истечением. Из этих причин экспериментально изучено действие сил Кориолиса [1, 2], которые приводят к образованию вихревых воронок лишь в специальных условиях, не реализуемых обычно в бытовых и технических устройствах. Исследование влияния сил Кориолиса требует, чтобы возмущения, возникшие в жидкости при заполнении емкости и открытии сливного отверстия, угасли до уровня меньшего, чем возмущения, возникшие вследствие вращения Земли в том месте, где проводится эксперимент. В [1, 2] для этого приходилось выдерживать жидкость после заполнения не менее 24 ч.

Особое внимание при образовании вихревых воронок в [3] обращено на возмущения в жидкости перед открытием сливного отверстия. Использование специальных устройств для заполнения жидкости в [4] позволило уменьшить уровень начальных возмущений, возникающих при заполнении емкости. Открытие отверстия на оси цилиндрической емкости непосредственно после ее заполнения в [4] не приводило к формированию вихревых воронок при истечении жидкости. Это позволило исследо-

вать формирование воронок в зависимости от искусственно внесенных возмущений, без необходимости отстаивания жидкости в течение длительного времени.

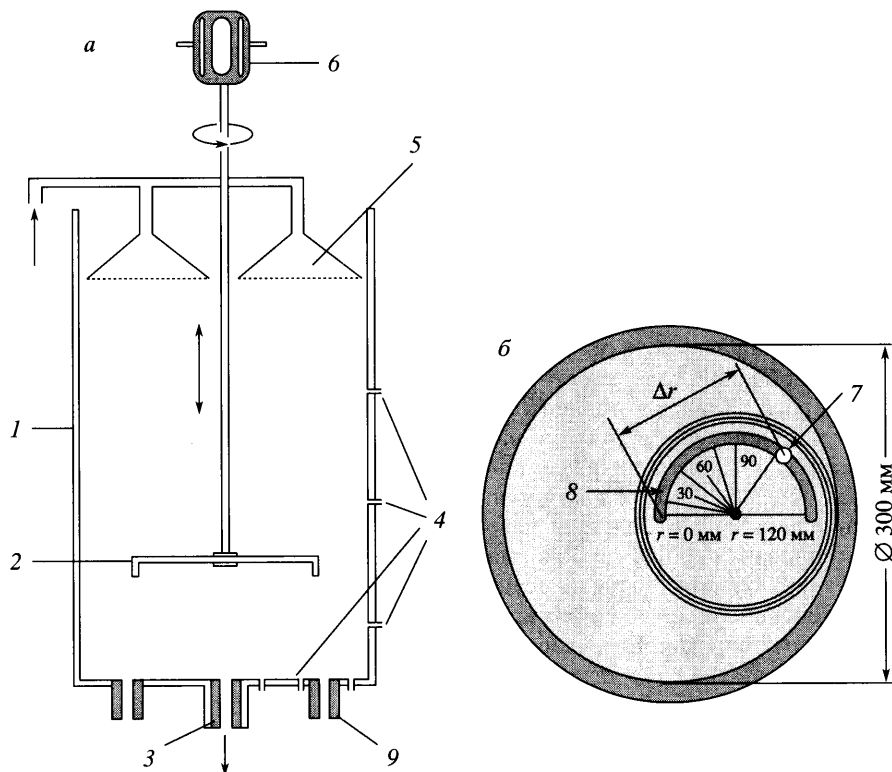
В [5] исследовалось истечение жидкости из емкости без формирования вихревой воронки, предварительно приняв меры по предотвращению возможного вращения жидкости и образования воронки-вихря [6].

Использование специального устройства для заполнения емкости позволило изучить влияние интенсивности вихревого движения в жидкости перед открытием сливного отверстия на формирование вихревой воронки [7]. Исследовался симметричный случай, когда сливное отверстие располагалось на оси цилиндрической емкости. Увеличение интенсивности вращения в [7] приводило к увеличению высоты образования вихревой воронки.

В [8] исследовалась высота образования вихревых воронок при приближении водозаборника к свободной поверхности. Водозаборник состоял из вертикальной трубы, срез которой располагался заподлицо с горизонтальной пластиной. При приближении водозаборника к водной поверхности на некоторое критическое расстояние над сливным отверстием возникала вихревая воронка. Просуществовав некоторое время, воронка могла исчезнуть и снова возникнуть. Направление вращения вихря было как правым, так и левым. В [8] делается вывод, что высота образования воронки не может быть зафиксирована строго, так как она, по мнению авторов, относится к категории величин, подчиняющихся статистическим закономерностям.

На формирование вихревой воронки в [4] существенное влияние оказывало положение сливного отверстия. Если после вращения погруженного в жидкость диска открывалось два сливных отверстия: одно в центре, а другое на расстоянии 110 мм от центра, то в центре сосуда формировалась вихревая воронка, а истечение из бокового сливного отверстия происходило без формирования над ним вихревой воронки. Вместе с тем, если перед истечением незакрученной жидкости внутри емкости устанавливался горизонтальный диск, то при любых положениях диска относительно оси и дна цилиндрической емкости и при любых положениях сливного отверстия формирования вихревой воронки не происходило. Следовательно, несимметричность геометрии необязательно приводит к возникновению вращения. Поэтому остается открытым вопрос о том, при каких именно несимметричных условиях происходит формирование вихревой воронки. Цель данной работы – получение экспериментальной зависимости высоты образования воронки от положения сливного отверстия при постоянной интенсивности вихревого движения перед открытием сливного отверстия.

Исследование влияния положения сливного отверстия и интенсивности вихревого движения перед его открытием на время образования воронки проводилось на установке, основные элементы которой описаны в [4]. Установка, схема которой приведена на фиг. 1, а, состоит из прозрачного цилиндра диаметром 0.306 м и высотой 0.7 м, сливного отверстия, диаметр и форму которого можно изменять в широких пределах, и узлов подвода жидкости. Конструкция узлов подвода жидкости была разработана таким образом, что открытие сливного отверстия непосредственно после заполнения емкости не приводило при истечении к образованию вихревой воронки. Для того, чтобы изучить влияние симметрии на возникновение вихревой воронки, закрутка жидкости создавалась искусственно с помощью диска устанавливаемого на оси цилиндра. Закрутка жидкости во всех экспериментах проводилась одинаковым образом. При раскручивании жидкости диск опускался на ~5 см в жидкость и включался электродвигатель, скорость вращения которого можно было изменять в широких пределах. После того как скорость вращения подкрашенных частиц жидкости переставала изменяться, вращающийся диск поднимался над уровнем жидкости и открывалось сливное отверстие. С целью получения экспериментальной зависимости времени образования воронки после начала истечения от положения сливного отверстия в данной работе была изменена конструкция дна бака фиг. 1, б, позволившая непрерывным

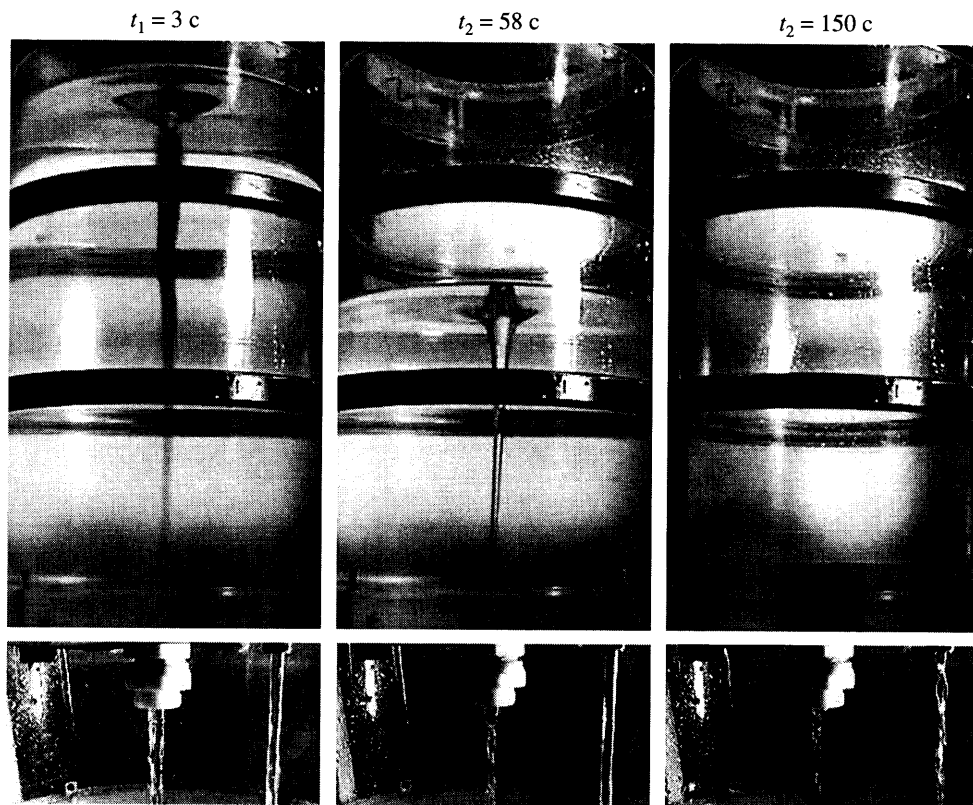


Фиг. 1. Схема установки: 1 – прозрачный бак, 2 – прозрачный диск, 3 – центральное отверстие, 4 – отверстия для визуализации течения жидкости, 5 – узел подвода жидкости, 6 – электродвигатель, 7 – сливное отверстие, 8 – подвижный диск, 9 – боковые отверстия

образом изменять положение сливного отверстия диаметром 8 мм от 0 до 120 мм относительно оси бака.

После подъема диска скорость вращения жидкости существенно изменялась в вертикальном и радиальном направлениях, что было хорошо видно по движению подкрашенных частиц жидкости. В радиальном направлении скорость вращения возрастала от стенки к оси бака. Мерой вращения, качественно характеризующей интенсивность вращения жидкости перед открытием сливного отверстия, была принята величина w_0 , равная скорости вращения подкрашенных частиц жидкости на радиусе $\Delta r/D = 0.33$. Скорость движения подкрашенных частиц жидкости определялась с помощью съемки на видеокамеру. При описании экспериментов использовалась безразмерная скорость вращения жидкости $W_0 = w_0(D/g)^{1/2}$, где D – диаметр бака, g – ускорение свободного падения.

Вытекание жидкости из бака снималось на цифровую видеокамеру. Строилась зависимость высоты столба жидкости от времени $h(t)$, которую сглаживали с помощью сплайн-аппроксимации и дифференцированием получали зависимость скорости опускания столба жидкости от времени. Расход q рассчитывался по формуле $q = Sdh/dt$, S – площадь сечения бака. Данный метод определения расхода жидкости требует учиты-

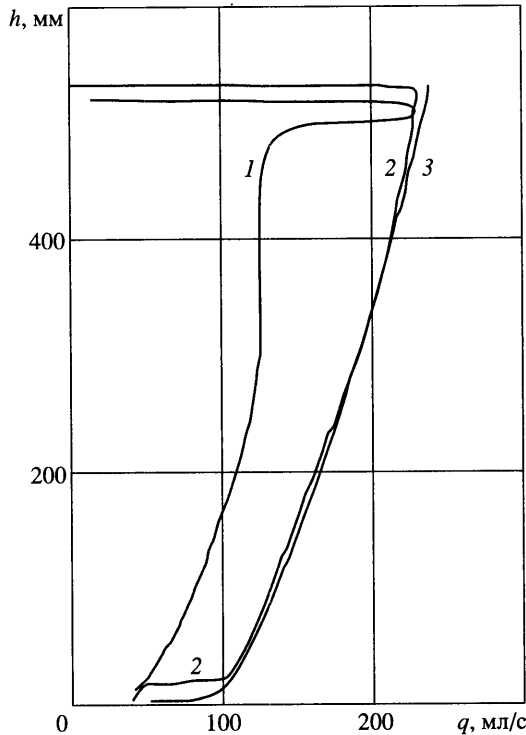


Фиг. 2. Вытекание изначально закрученной жидкости из бака через центральное и боковое отверстия ($H_0 = 1.73$, $W_0 = 0.088$)

вать объем, занимаемый воздушным ядром воронки и дает погрешность $\sim 20\%$ в момент пробивания воронкой столба жидкости. Более подробно методика расчета расхода описана в [7].

На фиг. 2 приведен ряд фотографий, отражающих последовательность вытекания жидкости из бака одновременно через два сливных отверстия, диаметром 10 мм при наличии вращения $W_0 = 0.088$. Бак заполнялся жидкостью до высоты $H_0 = h_0/D = 1.73$. Одно отверстие находилось на оси бака, а другое смещено на $\Delta R = \Delta r/D = 0.33$ относительно оси.

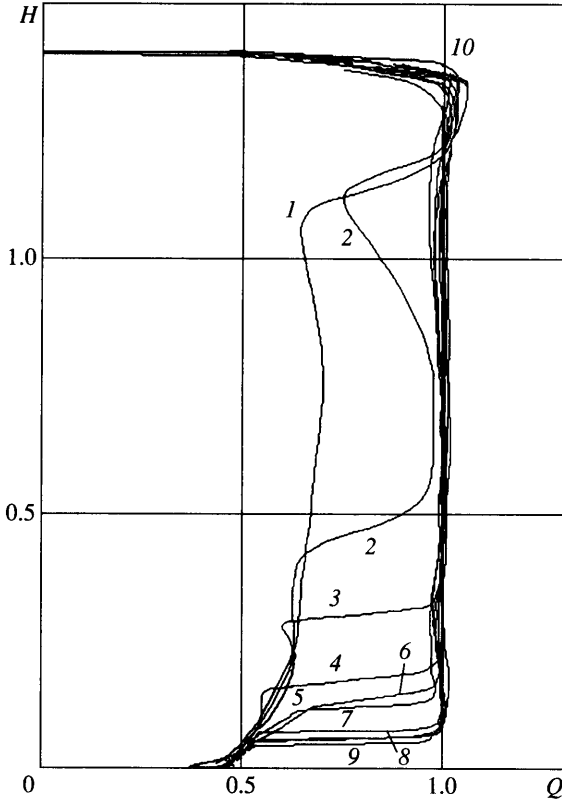
Наличие вращения в жидкости приводило к формированию интенсивной вихревой воронки над центральным сливным отверстием через ~ 10 с после открытия сливных отверстий при высоте столба жидкости $H \sim 1.68$. Появление вихревой воронки сопровождалось изменением структуры струи, вытекающей из бака. Образовавшаяся вихревая воронка над центральным сливным отверстием наблюдалась в течение всего времени истечения. Появление вихревой воронки над боковым отверстием наблюдалось только через ~ 150 с после начала истечения при высоте столба жидкости $H \sim 0.03$. На фиг. 3 приведены зависимости расхода от высоты столба жидкости при истечении через центральное отверстие, когда существует вихревая воронка 1, при истечении через боковое отверстие, когда воронка формируется через 150 с после начала истечения 2 и при истечении через боковое отверстие без вихревой воронки 3. Зависимости



Фиг. 3. Зависимость расхода от высоты столба жидкости: 1 – центральное отверстие ($W_0 = 0.053$), 2 – боковое отверстие ($W_0 = 0.012$), 3 – боковое отверстие ($W_0 = 0$)

расхода от высоты столба жидкости при наличии и отсутствии вихревой воронки различаются между собой. Образование воронки приводит к резкому уменьшению расхода. Данные, приведенные на фиг. 3, показывают, что при одинаковых начальных условиях высота столба жидкости, на которой образуется вихревая воронка, при смещенном относительно центра сливном отверстии значительно меньше, чем в случае центрального расположения сливного отверстия.

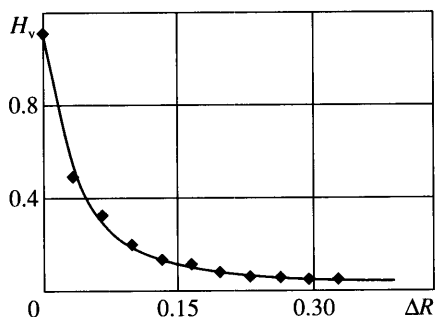
На фиг. 4 приведены зависимости относительного расхода жидкости $Q(H) = q_w(h)/q_0(h)$ от высоты столба жидкости $H = h/D$ для различных значений смещения $\Delta R = \Delta r/D$ сливного отверстия, где $q_w(h)$ и $q_0(h)$ – расходы жидкости, вытекающей через сливное отверстие с вращением и без вращения при одном и том же h . При небольшом смещении от центра $\Delta R = 0.033$ ($\Delta r = 1$ см) вихревая воронка образуется на такой же высоте, как и для центрального отверстия $H_v = 1.15$. Однако через ~ 10 с она исчезает и появляется снова лишь на высоте $H_v = 0.48$. Таким образом, даже незначительное смещение от оси бака может препятствовать быстрому образованию вихревой воронки. За высоту образования воронки принималась средняя высота перехода от кривой вытекания незакрученной жидкости к кривой вытекания закрученной жидкости. Время перехода является малым по сравнению со временем истечения из бака. При увеличении смещения сливного отверстия ΔR от оси бака высота образования вихревой воронки монотонно уменьшается (фиг. 5).



Фиг. 4. Зависимость расхода от высоты столба жидкости ($H_0 = 1.4$; $W_0 \sim 0.04$): $\Delta R = 0$; 0.033; 0.065; 0.098; 0.131; 0.163; 0.196; 0.229; 0.261 (кривые 1–9); ($\Delta R = 0$; $W_0 = 0$) (кривая 10)

Таким образом, показано, что изменение положения сливного отверстия существенно влияет на высоту образования вихревой воронки. При наличии в жидкости некоторого вращения истечение из центрального отверстия сопровождалось формированием вихревой воронки непосредственно после его открытия. При смещении сливного отверстия от центра вихревая воронка формируется через некоторое время, которое возрастает по мере удаления отверстия от оси. Данное свойство можно использовать при проектировании различных технических устройств, располагая сливные отверстия на различных расстояниях от центра. Поскольку асимметрия граничных условий, создаваемая смещением сливного отверстия, влияет на возникновение вихревой воронки, то представляет интерес вопрос о влиянии различных видов асимметрии на образование воронок.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование влияния положения сливных отверстий на формирование вихревых воронок при истечении жидкости из емкостей. Время формирования вихревых воронок зависит от положения сливного отверстия и возрастает по мере удаления сливного отверстия от оси. Полученные результаты позволяют сделать заключение о сильном влиянии симметрии на формирование вихревых воронок.



Фиг. 5. Зависимость высоты образования воронки H_v от смещения сливного отверстия ΔR ($H_0 = 1.4$; $W_0 \sim 0.04$)

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№№ 05-01-00081, 04-01-00365).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shapiro A.I.* Bath-tub vortex // *Nature*. 1962. V. 196. № 4859. P. 1080, 1081.
2. *Trefelhen L.M., Ringer R.W., Fink P.T. et al.* The bath-tub vortex in the southern hemisphere // *Nature*. 1965. V. 207. № 5001. P. 1084, 1085.
3. *Faber T.E.* Fluid Dynamics for Physicist. Cambridge: Univ. Press, 1995. 440 p.
4. *Павельев А.А., Штарев А.А.* Эксперимент по формированию вихря при вытекании жидкости из бака // *Изв. РАН. МЖГ*. 2001. № 5. С. 203–207.
5. *Токарев В.Е.* Истечение жидкостей из емкости с образованием воронки // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1967. № 3. С. 89–95.
6. *Поликовский В.И., Перельман Р.Г.* Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 191 с.
7. *Штарев А.А.* Экспериментальное исследование расхода при нестационарном истечении жидкости из заполненной емкости // *Изв. РАН. МЖГ*. 2005. № 2. С. 114–122.
8. *Эпштейн Л.А., Вольгрот И.Э.* Физика процессов, связанных с засасыванием брызг и частиц в воздухозаборники двигателей // *Тр. ЦАГИ*. 1982. Вып. 2143. С. 1–26.

Москва

Поступила в редакцию
26.X.2004