

УДК 532.527

© 2001 г. А.А. ПАВЕЛЬЕВ, А.А. ШТАРЁВ

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ВИХРЯ ПРИ ВЫТЕКАНИИ ЖИДКОСТИ ИЗ БАКА

Выполнен анализ экспериментальных данных о формировании вихря вблизи сливного отверстия при истечении жидкости из бака. Спроектирована и создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать влияние различных факторов на формирование вихря вблизи сливного отверстия. В данных экспериментах формирование вихря наблюдалось только при вращении перед открытием сливного отверстия погруженного в жидкость диска. При стационарном режиме течения кратковременное вращение диска приводило к формированию вихря и его последующему затуханию. Формирование вихревой воронки при истечении из сосуда предварительно закрученной жидкости зависит от положения сливного отверстия.

В повседневной жизни часто приходится встречаться с явлениями образования вихря вблизи сливного отверстия при вытекании жидкости из различных емкостей (баков, раковин и т.д.). Однако систематических экспериментальных исследований данного явления выполнено недостаточно для определения причин образования вихря в каждом конкретном случае. Интерес к этому вопросу поддерживается постоянно, что связано как с попытками объяснить возникновение вихря в бытовых устройствах, так и с необходимостью решения технических проблем, возникающих при вытекании жидкости из баков и при образовании вихря при течении в сужающихся каналах. Кроме того, данный вопрос является частью более общей проблемы, которая может быть охарактеризована как определение условий формирования интенсивного вихревого течения в системах, изначально не содержащих таких вихревых течений. Здесь можно отметить вопрос об условиях возникновения таких атмосферных явлений, как тайфуны, торнадо и т.д. Можно надеяться, что детальное изучение проблемы возникновения интенсивного вихревого течения в конкретном течении поможет сформулировать вопросы, на которые необходимо ответить при исследовании условий возникновения таких вихревых течений в других случаях.

Одной из гипотез, которая выдвигалась для объяснения причин возникновения вихрей при вытекании жидкостей из баков и раковин, являлось предположение об определяющем влиянии в данном случае сил Кориолиса, возникающих из-за вращения Земли.

В [1, 2] была предпринята попытка экспериментального исследования влияния сил Кориолиса на возникновение вихревого течения при истечении жидкости из бака. Эти эксперименты показали, что силы Кориолиса действительно могут вызывать вращение, причем если в Северном полушарии наблюдалось вращение против часовой стрелки, то в Южном полушарии вращение наблюдалось по часовой стрелке. Установки, на которых проводились исследования в [1, 2], имели одинаковые размеры. Диаметр бака был равен 183 см, высота 15 см, а диаметр сливного отверстия 9.5 мм. Полное опорожнение бака происходило за 20 мин. Скорость вращения, наблюдавшаяся в работах, зависела от времени, в течение которого жидкость в баках выдерживалась перед открытием сливного отверстия. Максимальная скорость вращения у сливного отверстия 1 оборот за 3 с наблюдалась при времени выдерживания,

равном 70 ч, а при времени выдерживания 18–20 ч скорость вращения составила 1 оборот за 8 с. Такие времена выдерживания требуются, чтобы движения воды в баке, возникшие при его заполнении, угасли и стали значительно меньше, чем скорость движения, связанная с вращением Земли.

В этих экспериментах тщательно контролировалось постоянство температуры и скорости движения воздуха над поверхностью воды, чтобы возникающие из-за конвекции и взаимодействия с воздушными потоками движения жидкости были малы по сравнению со скоростью из-за вращения Земли. Чтобы подчеркнуть необходимость предпринятых мер, отметим, что на краях размещенного на полюсе бака радиусом 1 м скорость из-за вращения Земли составляет ~4 мм/мин.

Таким образом, в [1, 2] было показано, что в специальных условиях из-за действия сил Кориолиса при истечении жидкости из бака возникает вихревое течение вблизи сливного отверстия, но из результатов этих же экспериментов следует, что на наблюдаемое в ваннах и раковинах вращение вблизи сливного отверстия силы Кориолиса не влияют¹. В монографии [3] отмечается, что причиной вращения вблизи сливного отверстия в данном случае являются движения в жидкости, возникающие при заполнении ванн и раковин, а также при использовании ванн и раковин человеком. Однако в [3] не приводятся экспериментальные данные, на которых это заключение основывается.

Течения, реализованные в [1, 2], а также течения, обычно наблюдаемые в быту, являются нестационарными и связаны с вытеканием из емкостей, перед этим наполненных жидкостью. В [4] вытекание жидкости из емкости исследовалось в стационарном режиме, т.е. расход жидкости, вытекающей из емкости, был равен расходу жидкости, поступающей в емкость. Таким образом, при стационарном режиме уровень жидкости в сосуде не зависит от времени. Исследования в [4] проводились в прямоугольном баке, в центре которого было сливное отверстие, а жидкость в бак поступала с двух противоположных сторон через набор сеток, которые должны были погасить возмущения, возникающие в узле подачи жидкости в бак. В зависимости от величины расхода в [4] наблюдалось или отсутствие вихря вблизи сливного устройства, или существование нескольких вихрей, которые периодически объединялись в один вихрь, или одного устойчивого вихря. Из материалов работы [4] неясно, в какой степени картина течения зависит от симметрии потока.

Можно указать на несколько возможных причин возникновения вращения при истечении жидкостей из емкостей. Выделим следующие причины: действие сил Кориолиса, неустойчивость течения, асимметрия граничных условий и существование вращения в жидкости перед истечением. Из этих причин детально изученным можно считать воздействие сил Кориолиса, которые приводят к вращению только в специальных условиях, не реализуемых обычно в бытовых и технических устройствах. Что касается трех остальных причин, то их влияние на возникновение вращения изучено недостаточно и для того, чтобы изучить возможность возникновения вращения из-за этих факторов, необходимы систематические экспериментальные исследования.

Для этого была создана экспериментальная установка, которая обеспечивает максимально симметричное и невозмущенное движение жидкости в баке при стационарном и нестационарном режиме течения. Установка позволяет контролируемым образом менять структуру вносимых в поток возмущений и симметрию потока. Установка, схема которой приведена на фигуре, состоит из прозрачного цилиндра диаметром 0.306 м и высотой 1 м. Диаметр и форму сливного отверстия можно изменять

¹ М.А. Гольдштик в неопубликованной экспериментальной работе 70-х годов обосновывал мнение, что образование вихревых воронок объясняется асимметрией резервуаров относительно сливного отверстия. Наблюдения около ста воронок в различных резервуарах показали с вероятностью 0,9 отсутствие преимущественного направления вращения, что, по мнению М.А. Гольдштика, указывало на малое влияние сил Кориолиса на наблюдавшиеся течения (частное сообщение Г.Ю. Степанова).

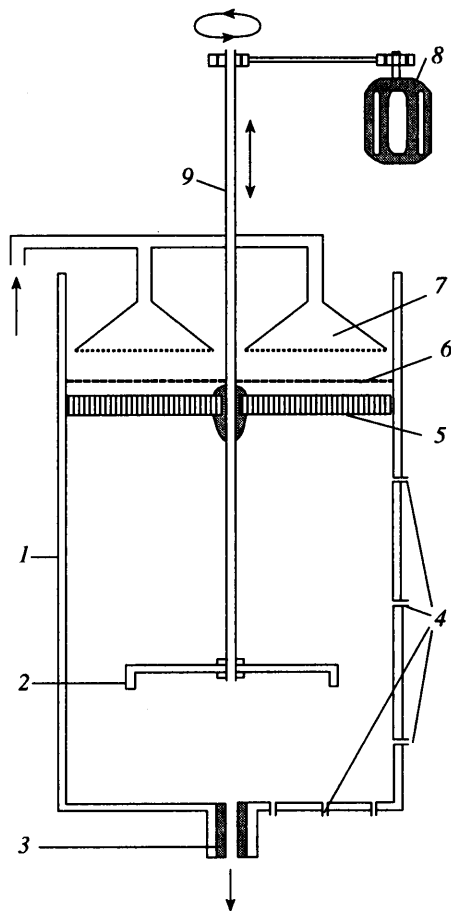


Схема экспериментальной установки: 1 – бак из прозрачного пластика, 2 – прозрачный диск, 3 – сливное отверстие, 4 – отверстия для введения струй подкрашенной жидкости, 5 – хонейкомб, 6 – сетка, 7 – узлы подвода жидкости из системы высокого давления, 8 – электродвигатель, 9 – полый металлический цилиндр

в широких пределах. В данной работе диаметр сливного отверстия был равен 0.01 м. Форма сливного отверстия была цилиндрической. Расход через бак определялся размером сливного отверстия и уровнем воды в баке.

Подвод жидкости в бак осуществляется в верхней части бака через узлы подвода, сетку и хонейкомб. Конструкция и характеристики этих устройств выбираются таким образом, чтобы возмущения в потоке жидкости после их прохождения были минимальны.

Хонейкомб набран из трубочек диаметром 1 мм. Длина трубочек выбрана из условия, чтобы при всех режимах течения в канале хонейкомба вырабатывался профиль скорости, близкий к профилю Пуазейля. При этом вихревые движения, существующие перед хонейкомбом, гасятся.

Жидкость подается в установку из системы высокого давления и ее расход может регулироваться в широких пределах, обеспечивая стационарный режим течения при различных размерах сливного отверстия и уровнях жидкости в баке. В центральную часть цилиндра может быть установлен полый металлический цилиндр с крепящемся на нем прозрачным диском, который вместе с цилиндром может перемещаться в вер-

тикальном направлении и вращаться вокруг своей оси. Вращение может иметь различные скорости и осуществляться с помощью электродвигателя. Диск имеет форму, позволяющую воздуху при погружении диска в жидкость находиться в нижней части диска, образуя свободную поверхность над сливным отверстием. Визуализация потока осуществлялась путем введения в поток струй подкрашенной жидкости через отверстия, расположенные на боковой стенке и дне установки.

Экспериментальные исследования на описанной выше установке дали следующие результаты.

1. В тех случаях, когда диск в установке отсутствовал или был неподвижным, как при стационарном, так и при нестационарном режиме течения вращение при истечении из емкости сразу после заполнения сосуда не было зафиксировано. Расход жидкости в этих экспериментах изменялся от 0,3 до 3 л/с, а высота столба жидкости изменялась от 0,05 до 1 м.

2. При стационарном режиме течения, когда уровень жидкости в сосуде поддерживался постоянным, а диск кратковременно приводился во вращение, с некоторым запаздыванием в потоке формировался вихрь, который затем затухал, и истечение происходило без вращения.

3. Если заполнить бак водой, а затем привести во вращение диск, то при последующем нестационарном истечении воды из бака вихревая воронка наблюдалась все время при истечении воды из бака.

4. Если сливное отверстие расположено на расстоянии 110 мм от центра, а центр диска смещен на 45 мм относительно центра сосуда, то при истечении жидкости из сосуда сразу после заполнения вихревая воронка не образуется при любом расположении диска относительно сливного отверстия.

5. Если после заполнения сосуда, но перед открытием сливного отверстия диск, погруженный в жидкость, привести во вращение, то при центральном расположении сливного отверстия после его открытия в сосуде формируется вихревая воронка. Если же сливное отверстие располагалось не в центре, а на расстоянии 110 мм от центра, то при истечении жидкости из сосуда после вращения диска вихревая воронка не формируется.

6. Если после вращения диска открываются два сливных отверстия: одно в центре, а другое на расстоянии 110 мм от центра, то в центре сосуда формируется вихревая воронка, а истечение из бокового сливного отверстия происходит без формирования над ним вихревой воронки.

7. Если при истечении из сосуда формируется вихревая воронка, то визуализация потока путем подачи подкрашенной жидкости через отверстие в днище сосуда показывает, что вокруг вихревой воронки образуется область, заполненная подкрашенной жидкостью.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Созданная система подачи жидкости в установку обеспечивает истечение из установки сразу после ее заполнения без вращения и соответственно без образования вихревого течения у сливного отверстия. Вращение погруженного в поток диска перед открытием сливного отверстия приводило к формированию вихревой воронки при истечении из установки, если сливное отверстие было в центре, но происходило без формирования вихревой воронки, если сливное отверстие располагалось не в центре. При стационарном течении кратковременное вращение диска приводит к возникновению и последующему затуханию вихря вблизи сливного отверстия, что может свидетельствовать об устойчивости исследуемого течения к возмущениям, создаваемым вращающимся диском. Несимметричность геометрии необязательно приводит к возникновению вращения. Остается открытым вопрос о том, при каких несимметричных условиях вблизи отверстия формируется вихрь. Неясно, возможно ли возникновение вихря из-за неустойчивости данного течения при внесении в поток возмущений, отличных от тех, которые создаются вращающимся диском. Предстоит определить, при каком смещении от центра сливного отверстия при истечении из сосуда пред-

варительно закрученной жидкости вихревая воронка над сливным отверстием не формируется.

Заключение. Формирование вихря наблюдалось только при вращении перед открытием сливного отверстия, погруженного в жидкость диска. При стационарном режиме течения кратковременное вращение диска приводило к формированию вихря и его последующему затуханию. Формирование вихревой воронки при истечении из сосуда предварительно закрученной жидкости зависит от положения сливного отверстия.

Авторы признательны Е.П. Велихову, М.В. Незлину и Е.Н. Снежкину за полезные дискуссии и поддержку при постановке этой работы.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-05-65039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shapiro A.H.* Bath-tub vortex // *Nature*. 1962. V. 196. № 4859. P. 1080–1081.
2. *Trefethen L.M., Bilger 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 Physicists*. Cambridge: Univ. Press, 1995. 440 p.
4. *Shingubara Shosou, Kawakubo Tatsuyuki.* Formation of vortices around a sinkhole // *J. Phys. Soc. Japan*. 1984. V. 53. № 3. P. 1026–1030.

Москва

Поступила в редакцию
25.XII.2000