

ЗАТУХАНИЕ ВОРОНКИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ В СОСУДЕ

Е.Е.Мешков¹, А.А.Сироткин²

¹*СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия*

²*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*

Аннотация. В ходе исследований вихревой воронки, образующейся при вытекании воды через отверстие в дне сосуда, была разработана методика, которая позволяет управлять изменением уровня воды в сосуде за счет ее постоянного пополнения извне (с минимальным возмущением основного течения). Управляемый темп пополнения позволяет не только компенсировать потерю воды в сосуде при сливе через сливное отверстие и поддерживать постоянство уровня, но и наращивать его. Повышение уровня в разные моменты времени после образования воронки приводит к постепенному угасанию воронки вплоть до полного ее исчезновения при достижении некоторого критического уровня воды в сосуде. Форма воронки при понижении уровня воды (при сливе) и при его повышении существенно различаются.

Ключевые слова: вытекание воды через отверстие в дне сосуда, вихревая воронка, повышение уровня воды в сосуде, затухание воронки.

1. Введение

При вытекании воды через отверстие в дне сосуда может образовываться вихревая воронка (см. напр. [1]). Во многих бытовых и промышленных устройствах и в гидротехнических сооружениях, в которых происходит вытекание жидкости через сливные отверстия, образование вихревых воронок является серьёзной проблемой. Оно приводит к существенному снижению пропускной способности сливных отверстий и препятствует нормальному функционированию этих устройств (проникновение воздуха в трубопроводы, изменение характеристик потока, нарушение работы насосов и т.д.) [2].

С 2008 г. в гидродинамической лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ проводятся экспериментальные исследования механизмов образования и развития воронки при вытекании воды через отверстие в дне экспериментального сосуда [3-5].

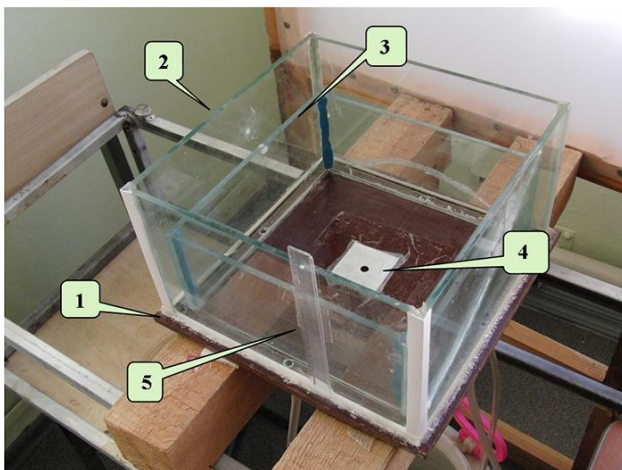
В известных нам экспериментах при вытекании воды из сосуда уровень воды в нем постоянно понижается; в зависимости от объема сосуда и диаметра сливного отверстия время слива воды может варьироваться в широких пределах. В гидродинамической лаборатории СарФТИ была разработана методика, которая позволяет управлять изменением уровня воды в сосуде за счет ее постоянного пополнения извне (с минимальным возмущением основного

течения) [4,5]. Управляемый темп пополнения позволяет не только компенсировать потерю воды в сосуде при сливе через сливное отверстие и поддерживать постоянство уровня, но и наращивать его. В экспериментах с повышением уровня после образования вихревой воронки было экспериментально обнаружено явление затухания воронки [4]. Ниже описаны результаты экспериментального исследования этого явления.

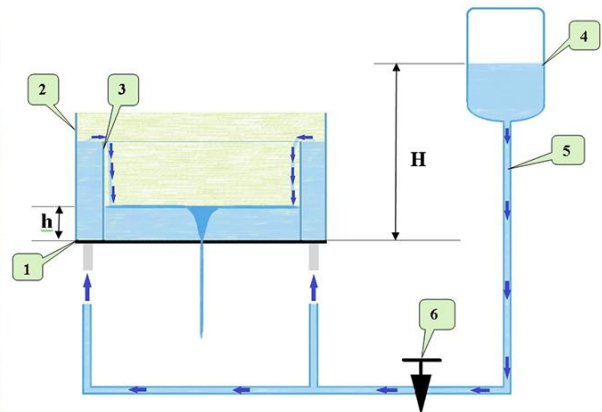
2. Техника экспериментов

На фиг.1 приведена фотография экспериментального сосуда [4]. Сосуд состоит из текстолитового днища (1) и боковых стеклянных стенок: наружной (2) и внутренней (3). Поперечные размеры внутренней части сосуда 20х20см. В центре днища имеется отверстие диаметром 20 мм; сверху отверстие закрыто пластинкой из алюминиевой фольги (4) толщиной 0,3 мм, в которой имеется отверстие диаметром 8 мм. В зазоре между наружной (2) и внутренней (3) стенками по периметру зазора (~1 см) имеются 4 отверстия диаметром 5мм (отверстия располагались по центру каждой грани сосуда).

На фиг.2 приведена схема проведения эксперимента. Экспериментальный сосуд соединен с резервной емкостью (4) шлангом (5)



Фиг.1. Фотография экспериментального сосуда. Обозначения: 1-дно; 2-наружная стенка; 3-внутренняя стенка; 4-пластинка из алюминиевой фольги с отверстием диаметром 8мм; 5-линейка для определения уровня воды в сосуде.



Фиг.2. Схема проведения эксперимента. Обозначения: 1-дно; 2-наружная стенка; 3-внутренняя стенка; 4- резервная емкость, 5- шланг, 6- шаровой кран.

с установленным на его конце распределителем, откуда, по четырем трубкам, вода поступала в зазор между стенками сосуда. Шланг оснащен шаровым краном (6) для обеспечения регулировки скорости поступающей воды.

Регистрация течения осуществлялась цифровым фотоаппаратом в режиме видео со скоростью 30 кадров в секунду. Для подсветки течения в экспериментальной кювете использовалась галогеновая лампа мощностью 1кВт со светорассеивающим экраном.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Перед проведением эксперимента резервная емкость заполнялась водой до заданного уровня H ; экспериментальный сосуд (внутренний отсек) также заполнялась до необходимого уровня h_0 ; объем в зазоре между стенками заполнялся водой доверху. При этом дренажное отверстие в центре затыкалось пробкой. Затем включалась лампа и фотоаппарат и после этого открывалось сливное отверстие в сосуде. В процессе вытекания из сосуда уровень воды h снижался и затем можно было наблюдать образование воронки. Спустя какое-то время открывался шаровой кран (6) (Фиг.2) и во внутренний отсек сосуда начиналось поступление воды; при этом уровень воды h в сосуде начинал подниматься. При достижении определенной величины уровня h наблюдалось затухание воронки.

Все это время поддерживался уровень воды H в резервной емкости; воду в емкость

постоянно подливали вручную, колебания уровня не превышали 0,5см.

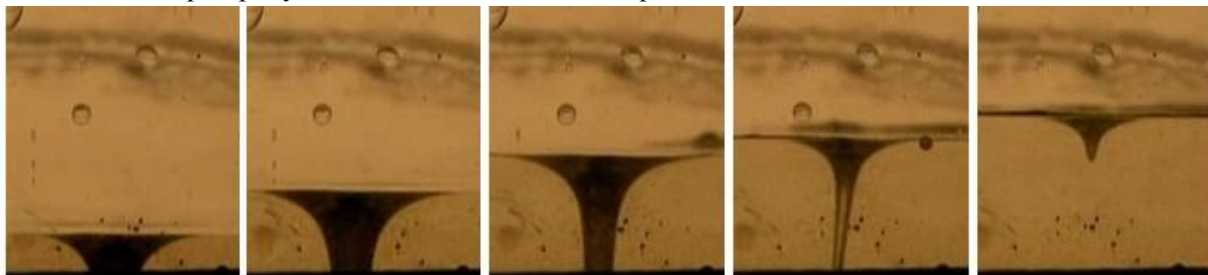
Была проведена серия экспериментов по описанной методике. Типичные условия проведения экспериментов:

- высота уровня воды в сосуде перед началом слива (h_0) ~ 38 мм;
- уровень воды в момент образования воронки при сливе (h_1) $\sim 15 \div 23$ мм;
- уровень воды перед началом притока (h_2) $0 < h_2 < 15$ мм;
- уровень воды в момент исчезновения воронки (h_3) $\sim 26 \div 29$ мм;
- высота уровня воды в резервной емкости (H) $\sim 19 \div 25$ см.

На фиг.3 приведены кадры видеороликов эксперимента, в котором прилив воды в сосуд начал производиться при уровне $h_2 \approx 15$ мм; к этому моменту уже развилась устойчивая вихревая воронка. Скачкообразная смена режима изменения уровня h не отразилась на поведении воронки, но при последующем подъеме уровня воронка начала трансформироваться и, в конечном итоге, затухла.

Изменение со временем диаметра воронки на высоте 8.5мм от дна иллюстрирует график фиг.4 (непрозрачный клеевой шов высотой 8,5мм в месте крепления боковой стеклянной стенки сосуда с дном создает «мертвую зону» для наблюдения воронки у дна сосуда). Некоторая не монотонность зависимости при $t \approx 5$ с и $t \approx 15$ с скорее всего связана с неравномерностью

прилива воды в резервную емкость и не имеет физического смысла.

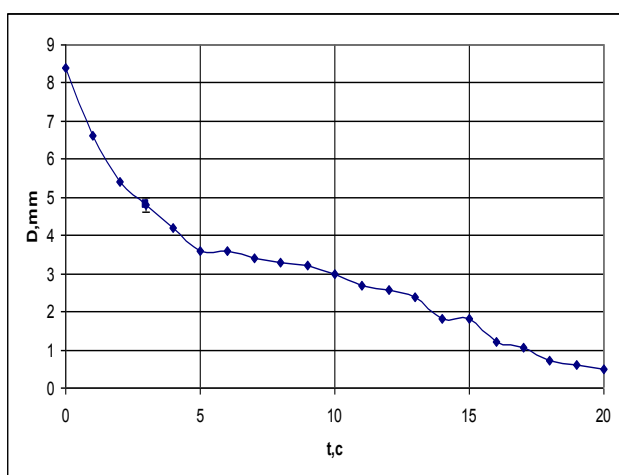


Фиг.3. Затухание воронки в процессе подъема уровня воды в сосуде вследствие притока из резервной емкости.

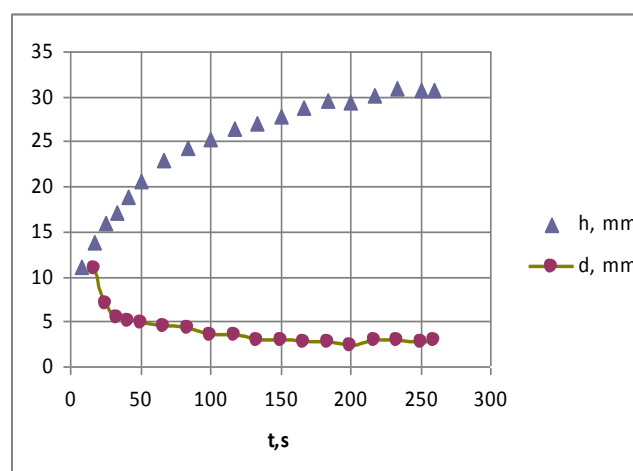
В экспериментах [4] прилив воды производился вскоре после образования воронки; высота уровня воды в сосуде при этом составляла $\sim 55 \div 60$ мм. При этих условиях наблюдалось стремительное (за время менее 0,5с) затухание воронки. Схлопывание воздушной трубки воронки начиналось от сливного отверстия и распространялось вверх. При этом режим схлопывания распространялся так быстро, что из части трубки не успевал выходить воздух и она распадалась на цепь воздушных пузырьков, которые не всплывали, а затягивались в сливное отверстие (через которое продолжает вытекать вода). Характерно, что за время затухания воронки уровень воды за счет прилива вырастал незначительно.

В экспериментах, описываемых ниже, уровень воды в сосуде перед началом прилива

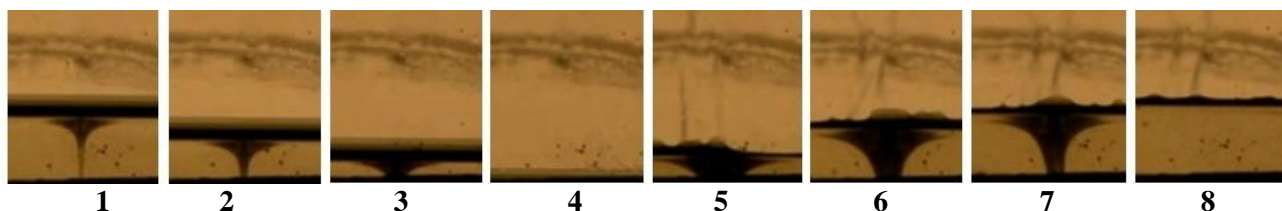
был менее 15 мм. При этом время затухания воронки возросло до десятков секунд и более. В опыте, результаты которого приведены на фиг.5, прилив воды в сосуд был начат при минимальном значении начального уровня ($< 8,5$ мм) при образовавшейся к этому времени воронке. Здесь воронка существовала до конца регистрации процесса в течение более 4-х минут. Уровень воды в сосуде при этом вырастал постепенно до ~ 30 мм и к концу наблюдения практически перестал расти. Все это время воронка существует. По сути этот эксперимент указывает на возможность реализации «стационарной» воронки, которая может существовать сколь угодно долго.



Фиг.4. График зависимости диаметра воронки (фиг.3) от времени. Измерения диаметра воронки производились на высоте 8,5 мм от дна сосуда



Фиг.5. Изменение со временем t уровня воды h_1 в сосуде и диаметра воронки d на высоте $\sim 8,5$ мм от дна в процессе прилива воды в сосуд.



Фиг.6. Образование и развитие воронки на стадии понижения уровня воды в кювете (первые три кадра) и последующее затухание и исчезновение ее при повышении уровня (последние четыре кадра).

В ходе экспериментов выяснилось, что если производить заполнение сосуда из резервной емкости после полного слива воды ($h_2=0$), то воронка не образуется. Но, если заполнение сосуда начинать до полного слива воды ($h_2>0$) (даже если величина h_2 равна нескольким миллиметрам), то наблюдается обычный режим сохранения воронки и ее затухание при достижении критической величины h_3 . Пример такого режима течения приведен на кадрах видеогаммы фиг.6. Здесь заполнение сосуда начиналось при $h_2<8.5$ мм (по визуальным наблюдениям величина h_2 составляла 1-3 мм).

Зависимость от времени уровня воды $h(t)$ (начиная с момента достижения величины уровня $h=8.5$ мм) приведена на фиг.7.

На фиг.8 приведены результаты измерений диаметра воронки (на высоте 8,5мм от дна сосуда) а) в процессе снижения уровня воды в кювете и б) при повышении уровня (на фиг. 7 и 8,6 время отсчитывается от момента достижения уровня воды $h=8.5$ мм).

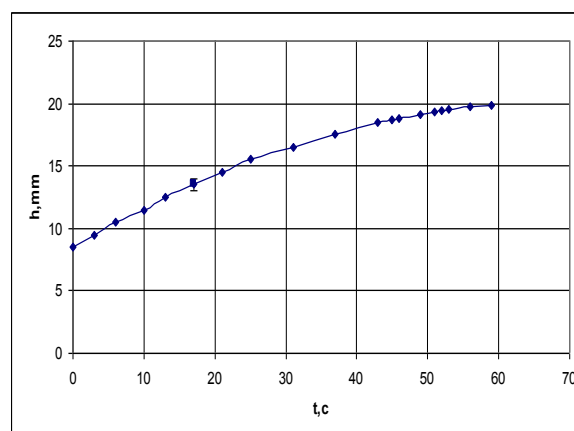
Обращает на себя внимание тот факт, что конфигурация воронки при понижении уровня h и при его повышении существенно различаются; достаточно сравнить на фиг.6 кадры №1 и №7 и еще №2 и №6. При приблизительно одинаковой величине h на этих кадрах конфигурация воронок сильно различаются. Характер течения в области, примыкающей к воздушной трубке воронки, при повышении уровня воды, по-видимому, заметно отличается от характера течения в случае его понижения [1].

При проведении экспериментов с малой величиной h_2 воронка при подъеме уровня образовывалась не всегда, а только при достаточно малой величине H . Так при величине $H=25$ см воронка при подъеме уровня не формировалась, но она устойчиво образовывалась при $H=22$ и 19см. В эксперименте, результаты которого

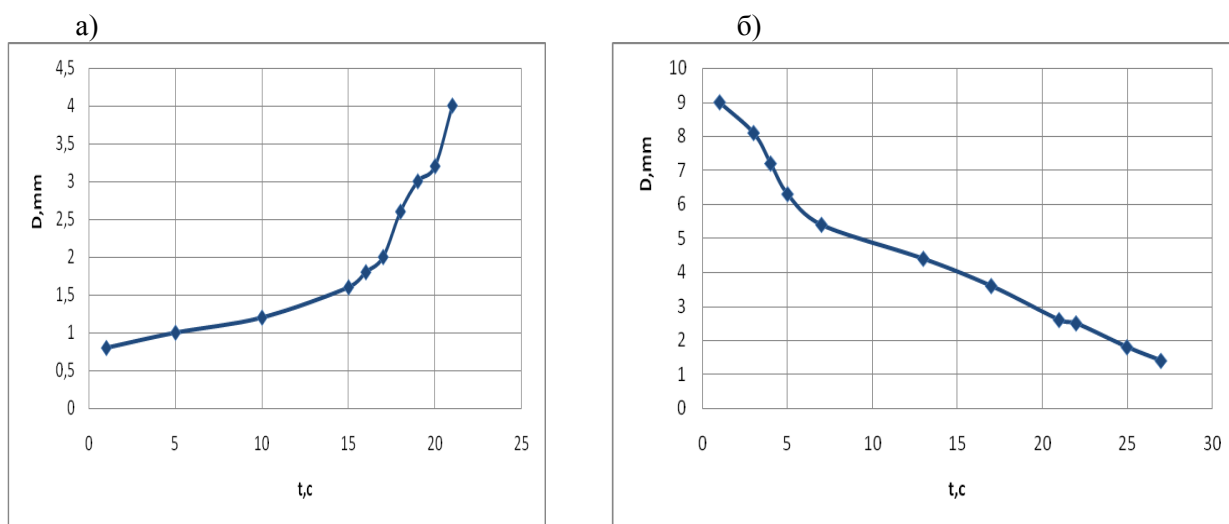
представлены на фиг.6-8, $H=19$ см, $h_0=38$ мм, $h_1=20,5$ мм, $h_3=28,5$ мм.

Существование воронки, образующейся при сливе воды из сосуда, поддерживается за счет баланса двух противодействующих сил: а) центробежной силы и б) силы, связанной с гидростатическим давлением столба жидкости, стремящимся захлопнуть воронку. Изменение этого баланса должно приводить к изменению формы воронки. С этой точки зрения можно объяснить некоторые наблюдаемые особенности поведения воронки при повышении уровня вследствие притока воды в сосуд.

При повышении уровня воды после образования воронки давление столба воды нарастает и это приводит к уменьшению диаметра воронки в районе сливного отверстия и выше. В конечном итоге повышение этого давления приводит к схлопыванию воронки и ее полному затуханию. Результаты наблюдений показывают, что в условиях наших экспериментов существует критическая высота уровня воды в сосуде, при которой образуется воронка.



Фиг.7. Изменение уровня в кювете (фиг.5) со временем при поступлении воды из резервной емкости (время отсчитывается от момента достижения уровня воды $h=8.5$ мм).



Фиг.8.Изменение со временем диаметра воронки (на высоте 8,5мм от дна сосуда) а)в стадии снижения уровня воды в сосуде (время отсчитывается с момента образования воронки и до момента достижения уровня воды $h=8.5$ мм)и б)при повышении уровня (время отсчитывается от момента достижения уровня воды $h=8.5$ мм и до момента затухания воронки).

В опытах [4] прилив воды в сосуд начинался при уровне воды, близком к критическому; при незначительном повышении уровня нарушался баланс сил, обеспечивающих существование воронки, и этим объясняется столь быстрое ее затухание. Если прилив начинается при уровне воды, существенно ниже критического, то при подъеме воды в сосуде уровень воды до конца наблюдения может не достигать критической величины, течение успевает подстраиваться к изменениям, связанным с приливом и воронка продолжает существовать неограниченно долго. И таким образом создаются условия для реализации «стационарной» воронки, когда характер течения (высота уровня воды в сосуде, конфигурация воронки) не меняется со временем.

Такая ситуация может облегчить возможность исследования процессов развития и условий существования вихревой воронки. Большой диаметр воронки в устье в начале подачи воды в кювету из резервной емкости может быть связан с малым гидростатическим давлением. Важную роль может играть характер течения при притоке воды - при относительно медленном втекании воды поступающая вода и вода в кювете не перемешиваются, что должно приводить к сжатию области вращающейся воды. При быстрой подаче воды в кювету и интенсивном перемешивании объемов может происходить быстрое затухание воронки. Как

показывают опыты, для развития воронки при подаче воды в кювету необходимо наличие в ней, по крайней мере, тонкого слоя воды. Если вода была слита полностью, при подъеме уровня воронка не образуется.

4.Заклучение.

Существование воронки, образующейся при сливе воды из сосуда, поддерживается за счет баланса двух противодействующих сил: а) центробежной силы и б)силы, связанной с гидростатическим давлением столба жидкости, стремящимся захлопнуть воронку. Увеличение давления, связанного с приливом и повышением уровня воды в сосуде, приводит к изменению формы воронки и при достижении критической величины уровня к ее полному затуханию.

В случае, когда прилив воды в сосуд и повышение высоты жидкости в сосуде начинается при уровне, близком к критическому, затухание воронки происходит стремительно, в условиях описываемых экспериментов за доли секунды. При начальном уровне воды существенно ниже критической величины процесс затухания воронки при подъеме уровня растягивается и достигает десятков секунд.

При управляемом приливе уровень воды в сосуде может не достигать критической величины, течение успевает подстраиваться к изменениям и воронка может существовать неограниченно долго. И таким образом могут

быть созданы условия для реализации «стационарной» воронки, когда характер течения (высота уровня воды в сосуде, конфигурация воронки) не меняется со временем. Это может предоставить дополнительные возможности исследования процессов развития и условий существования вихревой воронки.

5. Благодарности

В заключение авторы выражают признательность Ю.К.Барсукову, Г.Б.Красовскому, Г.М.Янбаеву, Ю.В.Алеханову и С.А.Ломтеву за техническую помощь и М.Е.Мешкову за помощь при оформлении статьи.

Литература

1. A.Andersen, T.Bohr, B.Stenum, J.Juul Rasmussen, and B.Lautrup. Anatomy of a Bath tub Vortex.//Phys.Rev.Lett. **91**, 104502-1 (2003)
2. A. Pavel'ev, A. A. Shtarev. Experiment on Vortex Formation in a Fluid Flowing out of a Reservoir. //Fluid Dynamics, 2001, Vol. 36, #5,.
3. B.Yu.Bazarov, Yu.B.Bazarov, M.B.Golubev, A.E.Kortuyukov, E.E.Meshkov, D.I.Orlov, T.A.Vorsina. Instability as possible cause of bath-tube vortex initiation. Experiment. // Selected Papers of the Intern. Confer. "Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres-2009", Moscow, 2010. Editors Yu.Chashechkin & V.Baydulov, p.p.43-48.
4. E.E.Meshkov, A.A.Sirotkin. Annihilation of bath-tube vortex. //Theses of reports of the Russian Conf. «Multiphase systems: the nature, the person, a society, technologies», Ufa, on June, 21-25, 2010г., p. 155 (in Russian).
5. E.E.Meshkov, A.A.Sirotkin, D.N.Zamyslov. Bath tube vortex attenuation at water level increase in the vessel. //Proc. Abstracts of 3 Int. Conf. "Turbulent Mixing and Beyond". Trieste, Italy, 21-28 August 2011, p. 97