

УДК 532.527

© 2005 г. А. А. ШТАРЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ЗАПОЛНЕННОЙ ЕМКОСТИ

Проведено экспериментальное исследование изменения расхода при истечении жидкости из предварительно заполненной цилиндрической емкости через сливные отверстия, диаметр которых был менее 0.1 диаметра емкости. Исследования проводились как при формировании вихревой воронки вблизи сливного отверстия, так и при ее отсутствии. В данных экспериментах заполнение емкости производилось таким образом, что формирование вихревой воронки наблюдалось только при вращении перед открытием сливного отверстия, погруженного в жидкость диска. Определены зависимости расхода от времени при различной начальной высоте и искусственно создаваемой закрутке жидкости. Выявлены четыре различных стадии истечения. Обнаружено, что при определенных параметрах течения существует интервал времени, на котором расход жидкости не зависит от высоты столба. Найдено критическое значение скорости вращения W_{0*} такое, что при $W_0 < W_{0*}$ интенсивная воронка не образуется. Построена предельная кривая, к которой стремятся все кривые расхода на заключительной стадии вытекания.

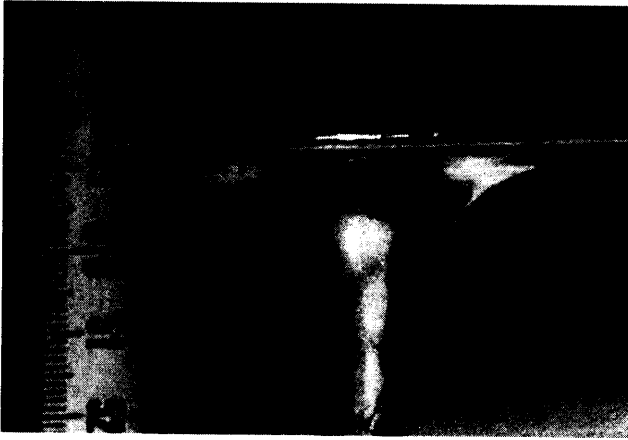
Ключевые слова: эксперимент, истечение жидкости из отверстий, фотографирование потока, вихревая воронка, стадии формирования воронки, расход жидкости.

Истечение из предварительно заполненных жидкостью емкостей через сливные отверстия небольшого диаметра реализуется во многих бытовых и технических устройствах. Во многих случаях необходимо знать время, за которое жидкость вытекает из емкости и которое можно определить, зная зависимость расхода жидкости от времени и характера течения.

Часто приходится встречаться с явлениями образования вихревой воронки вблизи сливного отверстия при вытекании жидкости из различных емкостей. Образование вихревой воронки изменяет расход жидкости, и поэтому исследование влияния вихревых воронок на расход представляет как практический, так и научный интерес, связанный также с проблемой возникновения интенсивного вихревого движения в гидродинамических системах изначально такого движения не содержащего. Речь в данном случае идет о нестационарных вихревых течениях, которые исследованы совершенно недостаточно.

При подходе к сливному отверстию жидкость в определенных условиях приобретает вращательное движение: возникает интенсивная вихревая воронка с воздушным ядром, в ряде случаев проникающим в сливное отверстие. Расход при этом может уменьшаться в несколько раз по сравнению с истечением без воронки. Так, в [1] отмечается снижение расхода отверстия в 3 раза, по данным [2] это снижение может быть еще более значительным. Снижение расхода вызывается проникновением воздушного ядра воронки в сливное отверстие, которое, как показали опыты [3], наступает при превышении величины закрутки жидкости некоторого значения. Расход воронок, воздушные ядра которых замыкаются внутри жидкости, не достигая сливного отверстия, не уменьшается [4].

Истечение жидкости из отверстий за последние годы подверглось обстоятельному изучению. Получено много экспериментальных данных. Изучено влияние на расход

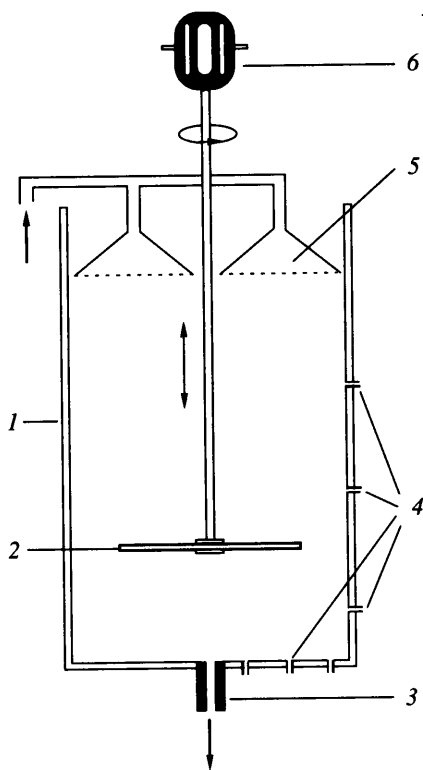


Фиг. 1. Фотография вихревой воронки

наличия воронки над сливным отверстием. Однако во всех работах исследовались течения со сформировавшимися стационарными воронками. Так, в [3] вихревая воронка создавалась в вертикальном круглом цилиндрическом баке, подача жидкости в который производилась через два подвода, радиальный и тангенциальный. Формировалась стационарная воронка, различные параметры которой в дальнейшем и изучались. В [5] исследования проводились в прямоугольном баке, в центре которого находилось 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. При изменении расхода подаваемой жидкости возникала или, наоборот, исчезала вихревая воронка, однако после выставления величины расхода всегда изучалась стационарная вихревая картина. Поведение течения жидкости в момент образования вихревой воронки ни кем из авторов не изучалось. Неясно, как взаимосвязано изменение расхода жидкости с появлением и ростом вихревой воронки при переходе течения без воронки к течению с воронкой, воздушное ядро которой пронизывает весь столб жидкости и проникает в сливное отверстие.

Изучение зависимости изменения расхода жидкости при формировании вихревой воронки для различных значений скорости вращения жидкости перед открытием сливного отверстия w_0 и высоты столба жидкости h_0 проводилось на установке, описанной в [6]. На фиг. 1 приведена фотография вихревой воронки у поверхности жидкости. Установка, схема которой приведена на фиг. 2, 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. Жидкость приводилась во вращение с помощью прозрачного диска, устанавливаемого в центральную часть цилиндра. 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 вращение жидкости стабилизировалось, вращающийся диск поднимался над уровнем жидкости и затем открывалось сливное отверстие. При проведении экспериментов жидкость вытекала через центральное сливное отверстие диаметром 10 мм.

Значение скорости вращения жидкости перед открытием сливного отверстия $w_0 = v_r/2\pi r$ определялось после подъема диска над уровнем жидкости с помощью съемки на видеокамеру и рассчитывалось по скорости вращения подкрашенных частиц жидкости v_r на радиусе $r = 100$ мм. При описании экспериментов использовалась безразмер-



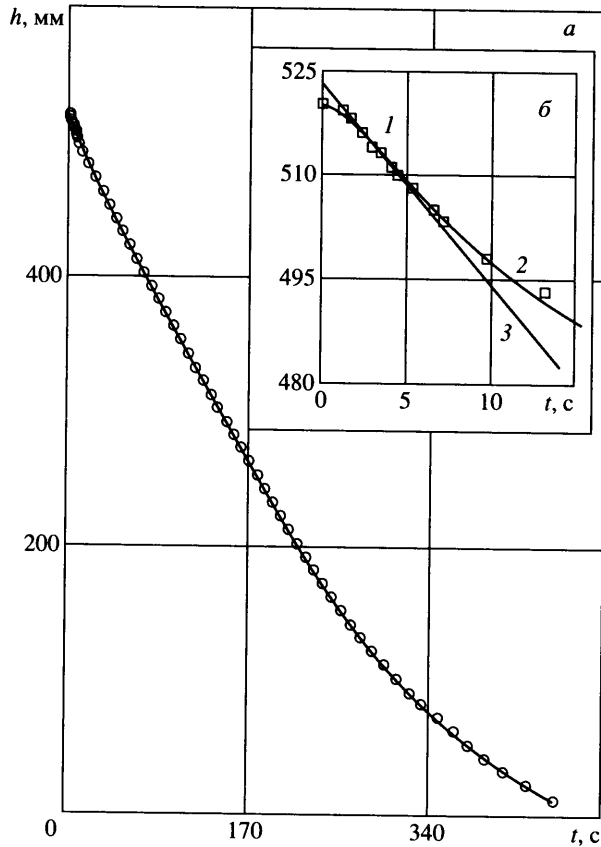
Фиг. 2. Схема установки: 1 – прозрачный бак, 2 – прозрачный диск, 3 – устройство слива, 4 – отверстия для визуализации течения жидкости, 5 – узел подвода жидкости, 6 – электродвигатель

ная скорость вращения жидкости $W_0 = w_0(D/g)^{1/2}$, D – диаметр бака, g – ускорение свободного падения.

Опускание столба жидкости фиксировалось на видеокамеру и строилась зависимость высоты столба жидкости от времени $h(t)$ (фиг. 3,а). По экспериментальным точкам на графике $h(t)$ методом скользящего среднего проводилась сглаженная кривая, дифференцированием которой получали зависимость скорости опускания столба жидкости от времени. Расход рассчитывался по скорости опускания столба жидкости $q = Sdh/dt$, S – площадь сечения бака.

Непосредственно после открытия сливного отверстия расход закрученной жидкости равнялся расходу жидкости, вытекающей без вращения (фиг. 3,б). При образовании воронки (на протяжении приблизительно 1% от общего времени вытекания) расход жидкости определяется изменением высоты столба жидкости и увеличением объема, занимаемого воздушным ядром вихревой воронки. Установление этого объема по фотографиям, получаемым видеокамерой, и времени ее образования ядра привело к увеличению расхода приблизительно на 20%.

При формировании нестационарной воронки в баке поведение кривой расхода вытекающей жидкости взаимосвязано с появлением и ростом вихревой воронки. Сопоставив появление, рост и дальнейшее развитие вихревой воронки с кривой зависимости скорости опускания столба жидкости dh/dt от высоты столба жидкости, можно при-



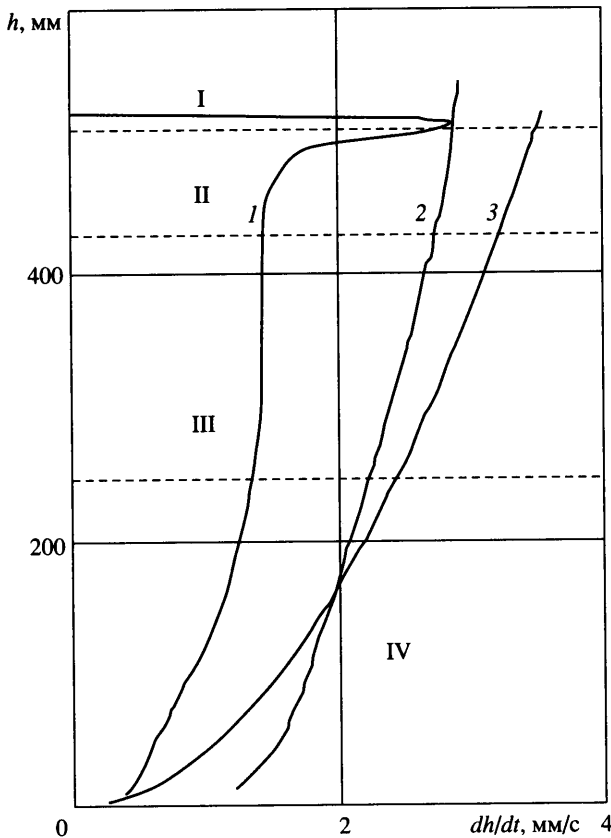
Фиг. 3. Зависимость $h(t)$ скорости опускания столба жидкости ($W_0 = 0.07$, $H_0 = 52$): 1 – экспериментальные точки, 2 – сглаженная кривая, 3 – прямая с наклоном, соответствующим наклону кривой вытекания незакрученной жидкости при $H = 51$

близительно выделить несколько качественных этапов поведения кривой dh/dt , характерных для всех кривых с различными h_0 и W_0 (фиг. 4).

Начальная фаза вытекания (фаза I). При открывании сливного отверстия (фиг. 4) перед образованием воронки расход изначально закрученной жидкости равняется расходу не закрученной жидкости. График зависимости dh/dt для закрученной жидкости 1 приближается к графику зависимости незакрученной жидкости 2. На некотором отрезке кривые совпадают. Точка, в которой кривая $h(t)$ начинает удаляться от прямой 3, соответствует началу формирования воронки (фиг. 3,б).

Появление воронки (фаза II). При появлении воронки расход резко уменьшается (фиг. 4). Уменьшение происходит до момента, пока воздушное ядро воронки не “пробьет” весь столб жидкости. Рост воронки сопровождается значительным увеличением скорости вращения жидкости у ядра воронки.

Развитие воронки (фаза II). После образования “сквозной” воронки значение dh/dt уменьшается более медленно (фиг. 4). На отрезке $h = 330 \dots 440$ мм скорость опускания dh/dt не зависит от высоты и равна 1.4 мм/с. На этой фазе вытекания скорость вращения жидкости у ядра воронки остается примерно постоянной. В некоторых случаях на этой фазе может происходить ускорение или торможение вращения жидкости в отличие от фазы II, где всегда происходит ускорение вращения.

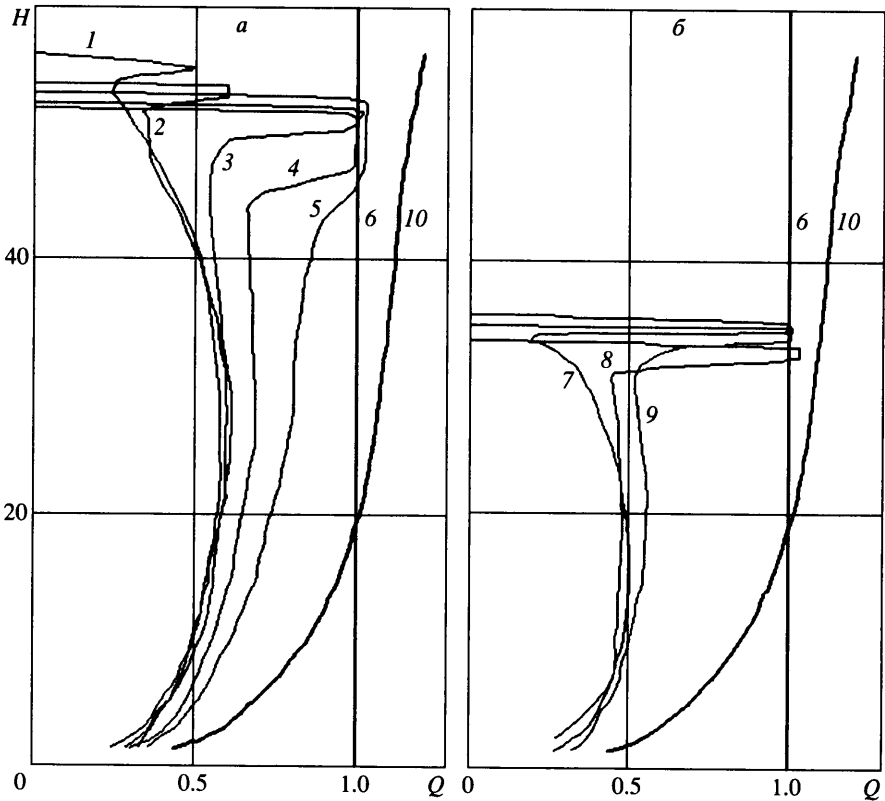


Фиг. 4. Фазы вытекания жидкости: $(W_0; H_0) = (0.07; 52)$; $(0; 56)$ кривые 1, 2, 3 – скорость истечения, определяемая по формуле $\sqrt{2gh}$ (I – начальная фаза вытекания; II – появление и рост воронки; III – развитие воронки; IV – заключительная фаза)

Заключительная фаза вытекания (фаза IV). На заключительной фазе вытекания жидкости из бака расход всегда уменьшается (фиг. 4).

Изменение скорости вращения жидкости W_0 приводит к формированию вихревых воронок различной интенсивности. При этом чем больше скорость вращения жидкости в баке, тем меньше расход жидкости. На фиг. 5 приведены зависимости относительного расхода жидкости $Q(H) = q_w(h)/q_0(h)$ от высоты столба жидкости $H = h/d$ для различных значений скорости вращения жидкости W_0 , где $q_w(h)$ – величина расхода жидкости, вытекающей через сливное отверстие, а $q_0(h)$ – расход жидкости, вытекающей без вращения при этой же h .

Проведя серию опытов по изучению влияния скорости начального вращения жидкости W_0 на расход жидкости при $H_0 = \sim 55$, был выделен ряд закономерностей (фиг. 5,а). Чем больше скорость вращения жидкости, тем короче отрезок, на котором вращающаяся жидкость вытекает так же, как и без вращения (фаза I, до начала образования воронки). При больших скоростях вращения $W_0 > 0.07$ образование воронки начинается сразу после открывания сливного отверстия. А при скоростях $W_0 > 0.18$ воронка образуется настолько быстро, что отсутствует фаза I. Чем больше скорость вращения жидкости, тем быстрее происходит образование воронки. Длина фазы II уменьшается.



Фиг. 5. Зависимость расхода от высоты столба жидкости: *a* – $(W_0; H_0) = (0.35; 56)$; $(0.16; 54)$; $(0.07; 52)$; $(0.039; 52.5)$; $(0.021; 53)$; $(0.0; 56)$ (кривые 1–6); *б* – $(0.22; 35)$; $(0.09; 35)$; $(0.07; 36)$ (кривые 7–9); 10 – расход, определяемый по формуле $S = \sqrt{2gh}$

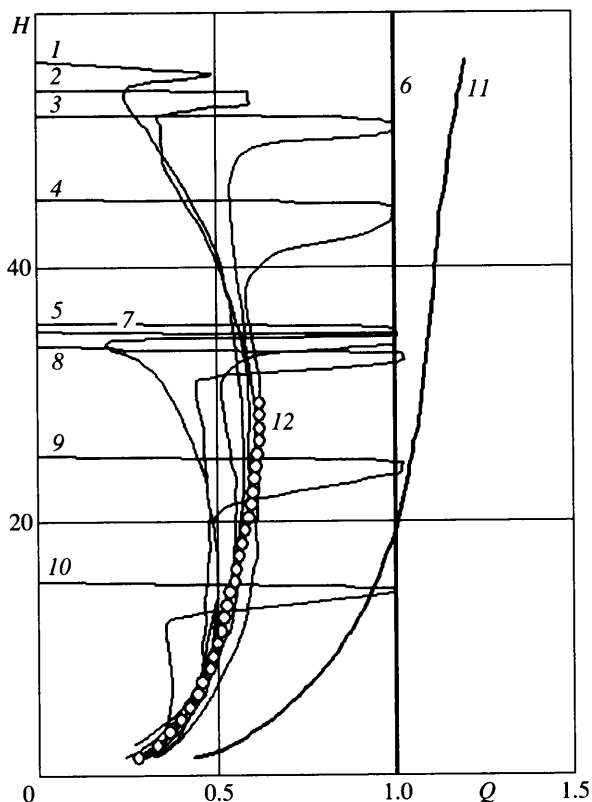
При $W_0 \sim 0.07$ после образования воронки устанавливается режим течения когда на расстоянии $H \approx$ от 45 до 25 расход остается постоянным и равен $Q = 0.58$ ($q_w = 108$ мл/с) и не зависит от высоты.

При $W_0 > 0.07$ открытие сливного отверстия приводит к быстрому образованию интенсивного вихря с воронкой. На фазе III происходит не ускорение вращения жидкости у ядра воронки, а торможение вращения. При этом расход увеличивается, пока не достигает значения $Q \sim 0.58$. Затем расход начинает уменьшаться (фаза IV). Т.е. для семейства кривых $W_0 > 0.07$ существует предельный расход $Q_p \sim 0.58$, и этот расход равен расходу жидкости в течение, когда расход не зависит от высоты.

Все сказанное выше справедливо и для высоты наполнения $H_0 = \sim 35$ (фиг. 5,б), меняется только значение предельного расхода $Q \sim 0.51$ ($q_w = 73.5$ мл/с). Течение, при котором расход не зависит от высоты, реализуется при $W_0 \sim 0.07$.

Как видно из фиг. 5,а и б, для различных значений высоты начального наполнения H_0 , меняя скорость вращения W_0 , всегда можно подобрать значение $W_0 = W_{0*}$, при котором реализуется течение с расходом на некотором интервале времени не зависящим от высоты и равным Q_* .

Будем далее называть течение “быстрым”, если начальная скорость вращения удовлетворяет условию $W_0 > W_{0*}$, и будем называть течение “медленным” при $W_0 < W_{0*}$.

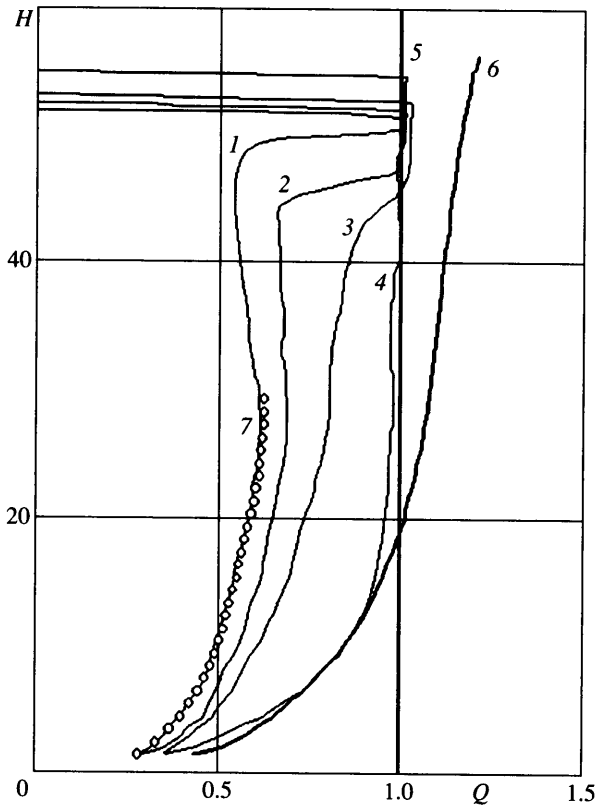


Фиг. 6. Зависимость расхода от высоты начального наполнения бака для “быстрых” течений ($W_0 > W_{0*}$): $(W_{0*}; H_0) = (0.35; 56)$; $(0.16; 54)$; $(0.07; 52)$; $(0.048; 45)$; $(0.22; 35)$; $(0.0; 56)$; $(0.09; 35)$; $(0.07; 36)$; $(0.035; 25)$; $(0.049; 15)$ (кривые 1–10); 11 – расход, определяемый по формуле $S\sqrt{2gh}$, 12 – предельная кривая

Исследование зависимости расхода жидкости для быстрых течений в зависимости от высоты начального наполнения бака H_0 и скорости вращения W_0 (фиг. 6) показало, что все кривые в конце фазы III выходят на “предельную” кривую (12) и всю фазу IV двигаются вдоль нее. Эта кривая является ограничивающей кривой для всего семейства быстрых кривых с различными W_0 и H_0 .

При малых значениях скорости вращения жидкости $W_0 < 0.05$ интенсивная воронка, пронизывающая весь столб жидкости и проникающая в сливное отверстие, не образуется. Образуются воронки, замкнутые внутри жидкости. Медленные течения также стремятся к предельной кривой 7 (фиг. 7), но уже не слева, как быстрые, а справа. Они приближаются к предельной кривой, но не достигают ее. Чем меньше начальная скорость вращения, тем медленнее они приближаются к ней. При малых величинах начальной закрутки образуются воронки, замыкающиеся внутри жидкости и не проникающие в сливное отверстие. Семейство медленных кривых для различных $W_0 < W_{0*}$ и H_0 заполняет все пространство между предельной кривой и кривой вытекания жидкости без вращения.

Значения предельной скорости вращения W_{0*} для различных высот наполнения лежат в диапазоне значений $0.05 < W_{0*} < 0.09$ и в пределах точности измерения можно считать их равными 0.07.



Фиг. 7. Зависимость расхода от высоты начального наполнения бака для “медленных” течений ($W_0 > W_{0*}$): $(W_0; H_0) = (0.4, 52)$; $(0.22, 52.5)$; $(0.12, 53)$; $(0.06, 55)$; $(0.0, 56)$ (кривые 1–5); 6 – расход, определяемый по формуле $S\sqrt{2gh}$, 7 – предельная кривая

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. При формировании вихревой воронки отчетливо прослеживаются четыре фазы: начальная фаза, образование воронки, развитие воронки, заключительная фаза. На начальной фазе вытекания перед образованием воронки расход изначально закрученной жидкости равняется расходу не закрученной жидкости. При образовании вихревой воронки расход жидкости уменьшается по сравнению с расходом не закрученной жидкости. После образования воронки формируется течение, расход которого на некотором отрезке времени не зависит от высоты столба жидкости. Такое течение формируется, когда скорость вращения жидкости перед открытием сливного отверстия W_0 превосходит некоторое значение $W_0 > W_{0*}$. На заключительной фазе вытекания таких течений кривые зависимостей расхода жидкости от высоты столба жидкости стремятся к ограничивающей их предельной кривой. Кривые зависимостей расхода жидкости от высоты столба жидкости для течений со скоростью вращения $W_0 < W_{0*}$ заполняют все пространство между “предельной” кривой и кривой вытекания жидкости без вращения.

Заключение. Проведено экспериментальное исследование зависимости от времени расхода жидкости при вытекании из предварительно заполненного цилиндрического сосуда. Получены результаты по влиянию вихревой воронки на расход жидкости на

различных стадиях формирования вихревой воронки. Обнаружено, что при определенных параметрах течения существует интервал времени, в течение которого расход жидкости не зависит от высоты столба. Найдено критическое значение W_{0*} такое, что при $W_0 < W_{0*}$ интенсивная воронка не образуется. Построена предельная кривая, к которой стремятся все кривые расхода на заключительной стадии вытекания.

Автор признателен А.А. Павельеву за постоянное внимание к работе и полезные дискуссии.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№№ 02-02-00375 и 04-01-00365).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон А.Х. Гидравлика и ее приложения. М; Л.: Госэнергоиздат, 1934. 605 с.
2. Kolf R.C., Zielinski P.B. The vortex chamber as an automatic flow-control device // Proc. ASCE: J. Hydraul. Div. 1959. V. 85. № 12. P. 1–8.
3. Альтшуль А.Д., Марголин М.Ш. Влияние вихревых воронок на коэффициент расхода при истечении жидкости из отверстий // Гидротехническое строительство. 1968. № 6. С. 32–34.
4. Camishel C., Escande L. Similitude Hydrodynamique et Technique des Modeles Reduits. Paris: E. Blondel La Rougery, 1938. 356 p.
5. Shingubara Shosou, Kawakubo Tatsuyuki. Formation of vortices around a sinkhole // J. Phys. Soc. Japan. 1984. V. 53. № 3. P. 1026–1030.
6. Павельев А.А., Штарева А.А. Эксперимент по формированию вихря при вытекании жидкости из бака // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 5. С. 203–207.

Москва

Поступила в редакцию
26.V.2004