

УДК 533.6.011

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ОТВЕРСТИЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕЙ С ВОЗДУШНЫМ ЯДРОМ

© 2022 г. М. Prabhu^{a,*}, R. A. Kumar^{a,**}, R. Warriar^{a,***},
B. S. N. V. Mouli^{a,****}, S. Kiran^{a,*****}

^a Department of Mechanical Engineering, Amrita Vishwa Vidyapeetham, Amritapuri, India

*E-mail: prabhumahadev1729@gmail.com

**E-mail: amritanjali.ajith@gmail.com

***E-mail: rajwar31497@gmail.com

****E-mail: vinaymouli1997@gmail.com

*****E-mail: kiransanthosh11@gmail.com

Поступила в редакцию 11.07.2020 г.

После доработки 20.12.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

Явление возникновения закрученных вихрей с воздушным ядром (воронок) в жидкости, протекающей через цилиндрические баки, может иметь серьезные побочные эффекты во многих инженерных системах. Следовательно, подавление таких вихрей является насущной необходимостью для этих приложений. В настоящей работе исследуется влияние начального вращения на формирования вихрей с различными конфигурациями расположений сливных отверстий, имеющих одинаковый диаметр ($d = 10$ мм), в случае использования многочисленных отверстий. Во всех рассмотренных конфигурациях имеется соосное (центровое) отверстие с круглым поперечным сечением, в общем случае окруженное другими отверстиями (с круглыми сечениями), которые располагаются на одном и том же расстоянии от центра. В настоящей работе явление формирования вихревых воронок изучается при изменении числа окружающих отверстий и эксцентricности их расположения. Истечение может происходить одновременно через одно и большее число окружающих отверстий. Перед началом истечения с помощью закручивания жидкости (40–240 об./мин) столбу жидкости сообщается циркуляционное движение, создаваемое механической мешалкой с электродвигателем, число оборотов которой можно было регулировать. Результаты проведенного исследования показали, что для всех конфигураций расположения сливных отверстий вихрь подавляется при увеличении степени эксцентricности (нецентральности) расположения отверстий и, таким образом, время истечения уменьшается. Результаты исследования также показывают, что центральное отверстие является ключевым фактором для процесса вихреобразования и при меньших значениях эксцентricности расположения отверстий вихрь последовательно подавляется по мере увеличения числа отверстий, окружающих центральное. Все ранее проведенные исследования формирования вихревых воронок, результаты которых доступны в литературе, были выполнены либо с одним или с двумя сливными отверстиями. Исследования истечения жидкости из нескольких отверстий (число сливных отверстий больше двух) до сих пор отсутствовали. Таким образом, текущее исследование, результаты которого представлены в данной работе, является первым исследованием истечения жидкости из нескольких сливных отверстий.

Ключевые слова: вихреобразование, многочисленные отверстия, критическая высота, потеря напора

DOI: 10.31857/S056852812105011X

Истечение вращающегося столба жидкости из сосуда через сливное отверстие, расположенное на дне сосуда, может привести к образованию поверхностной впадины или “кинка” (точки излома) на свободной поверхности. Так, сформированная поверхностная впадина вскоре проникает вертикально вниз сквозь столб жидкости и трансформируется в конусообразный стебель, подобный структуре, достигающей сливного отверстия, которая называется “вихрем с воздушным ядром” (“воздушной вихревой воронкой”) и изображена на рис. 1. Высота столба жидкости, при которой вихревая воздушная сердцевина только-только соприкасается со сливным отвер-

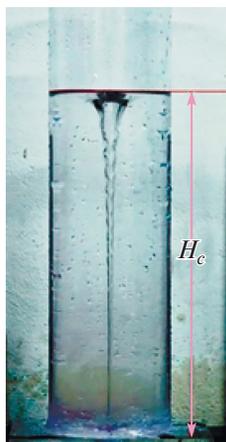


Рис. 1. Фотография типичного вихревого воздушного ядра (воронки).

ствием, называется критической высотой или критическим погружением (H_c). Образование такого вихря с воздушным ядром в жидкости, протекающей через цилиндрический резервуар, имеет широкие и первостепенные приложения в аэрокосмической области, литье металлов и при проектировании гидротехнических сооружений. Воздушное ядро, образовавшееся в баках жидкого топлива ракет, загорает отверстие и уменьшает расчетный расход топлива, что может отрицательно сказываться на эксплуатационных характеристиках ракетных двигателей. Это воздушное ядро также способно инициировать кавитацию в насосах питания, используемых для перекачки топлива к ракетным двигателям. Подобное развитие кавитации может также происходить в гидравлических приложениях. Образование воздушного ядра во время истечения расплавленного металла может приводить к дефектам в металлических отливках. Из-за столь неприятных последствий подавление воздушного ядра в вихре привлекло значительное внимание к исследованию рассматриваемого явления в вышеупомянутых областях инженерных разработок.

Ранее явление образования воздушного ядра в вихре во время истечения жидкости было изучено и изложено в литературе. Экспериментальное исследование [1] было выполнено для жидкости, истекающей из цилиндрического бака, и было найдено, что критическая высота может быть эмпирически связана с отношением плотностей жидкостей и расходом жидкости для истечения двух или большего числа несмешивающихся жидкостей. Для подавления вихревых явлений в [2] было предложено использовать выходное отверстие специальной формы. Было найдено, что ступенчатые сливные отверстия очень эффективны в подавлении образования вихрей по сравнению с колоколообразным раструбом или общепринятым круговым отверстием. В [3] было проведено численное исследование откачки слоистой жидкости из открытого резервуара через отверстие в центре дна бака без закрутки жидкости, полученные результаты согласуются с экспериментом [1]. В [4] была предпринята попытка вывести выражение для скорости вихрей с воздушным ядром в гидравлических водозаборниках. В этой работе были выведены уравнения для касательной, радиальной и осевой скоростей в водозаборниках. В [5] было изучено влияние наклона основания бака на критическое погружение во время образования вихря и было обнаружено, что вихрь полностью подавляется, когда наклон основания превышает некоторое предельное значение, которое зависит от размера сливного отверстия. В [6] было проанализировано образование вихря Рэнкина во время истечения жидкостей из баков квадратного и прямоугольного сечений. Было найдено, что вихреобразование можно подавить за счет использования квадратных и прямоугольных баков вместо общепринятых круглых баков. Было также установлено, что присутствие острых углов на прямоугольных и квадратных сечениях приводит к подавлению вихрей. В [7] было предложено использовать эксцентричное сливное отверстие, чтобы предотвратить явление вихреобразования, когда жидкость истекает из цилиндрических баков. Было найдено, что для полного подавления отношения эксцентricитности расположения отверстия к радиусу бака должно быть не менее 0.4. Образование вихря с воздушным ядром было экспериментально исследовано в [8]. Было найдено, что отношение диаметра отверстия к диаметру бака меньше 0.3, поэтому вихреобразование может быть полностью подавлено для концентрических отверстий. В [9] было предложено использовать эксцентричное сливное отвер-

стие, чтобы предотвратить явление вихреобразования, когда жидкость истекает из цилиндрических баков. Было найдено, что отношение диаметров отверстия и бака, необходимое для подавления вихреобразования, является сильно нелинейной функцией эксцентricности расположения отверстия. Влияние многоугольных отверстий на формирование вихря с воздушным ядром было исследовано в [10] и было найдено, что восьмиугольная геометрия является наилучшей для эффективного подавления вихря по сравнению с другими многоугольными отверстиями. Недавно было проведено исследование явления вихреобразования, происходящего, когда жидкость истекает через два отверстия, расположенные на одном и том же расстоянии от центра бака [11]. Было найдено, что процессом вихреобразования можно эффективно управлять и полностью подавить, если взять оба сливных отверстия с равными диаметрами.

Во всех предыдущих исследованиях вихреобразования, за исключением [11], для слива жидкости использовалось только одно отверстие. В экспериментальном исследовании [11] было обнаружено, что два сливных отверстия, расположенные на одинаковых расстояниях от центра бака, могут эффективно управлять процессом образования вихрей. Был сделан вывод, что лучшее подавление вихря может быть достигнуто при использовании двух сливных отверстий по сравнению с эквивалентным одиночным отверстием при одинаковых условиях. В вышеупомянутом исследовании [11] был проигнорирован интересный вопрос: как изменится процесс образования вихрей, если допустить истечение жидкости более чем через два отверстия? Собираясь рассмотреть этот вопрос в настоящем исследовании, были введены многочисленные сливные отверстия (более двух) для исследования истечения вращающегося столба жидкости со следующими целями: 1) изобрести альтернативные конфигурации расположения сливных отверстий, пригодные для эффективного подавления вихрей; 2) оценить, может ли только критическая высота правильно описать и дать количественные характеристики явления вихреобразования. В этой связи в экспериментальной установке были добавлены сливные отверстия вокруг основного соосного (центрального) сливного отверстия.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка и принятая методика эксперимента такие же, как в [9]. Установка состоит из цилиндрического сосуда с внутренним диаметром $D = 96$ мм и высотой 410 мм, изображенного на рис. 2а. Диаметр как центрального соосного, так и окружающих сливных отверстий был выбран равным 10 мм и все эти отверстия были просверлены в акриловом основании, как показано на рис. 3. Акриловое основание было соединено с цилиндрическим стеклянным сосудом с помощью силикагеля. Цилиндрический сосуд был заполнен водой до начальной высоты $H_i = 300$ мм. Мешалка с электродвигателем с переменной скоростью использовалась для сообщения вращения столбу жидкости. В настоящей работе, во все рассмотренных случаях начальная скорость вращения N изменялась от 40 до 240 об./мин. Чтобы обеспечить равномерную угловую скорость у всех жидких частиц, вращение поддерживалось в течение двух минут. После двух минут вращение мешалки останавливалось и мешалка осторожно извлекалась из столба жидкости. Затычки отверстий слива вытаскивались вниз из сосуда одновременно из всех отверстий, чтобы сделать возможным истечение. На рис. 2,б изображен механизм, использованный для одновременного открытия двух отверстий из нескольких возможных при заданной величине эксцентricности ($e/D = 0.438$). Две резиновые пробки присоединялись поводками к металлической рамке, как показано на рис. 2б. Они были вставлены в отверстия слива перед сообщением начального вращения жидкости в сосуде. Для других значений эксцентricности были сделаны подобные открыватели сливных отверстий. После двух минут вращения жидкости нужно приложить некоторую вертикальную силу к рукоятке, чтобы открыть сливное отверстие. Для каждого значения эксцентricности, чтобы открыть одновременно больше отверстий (больше двух), были изготовлены подобные открыватели отверстий с большим числом поводков.

В начальные мгновения истечения впадина, образовавшаяся на поверхности жидкости, проникала внутрь столба жидкости и формировала целиком растущий вихрь с воздушным ядром (воронку с воздушным сердечником) и в тот момент, когда воздушное ядро только-только соприкасалось с отверстием слива, отмечалась *критическая высота* (H_c), как высота свободной поверхности жидкости. Критическая высота измерялась с помощью вертикальной градуированной шкалы, наложенной на внешнюю поверхность цилиндра. Как упоминалось выше, на рис. 1 приведена фотография типичного вихря с воздушным ядром, который образуется в цилиндрическом сосуде во время истечения жидкости, где H_c отмечено как критическая высота. Предыдущие исследователи [8, 9, 11] упоминали, что сильная закрутка (вихреобразование) соответствует

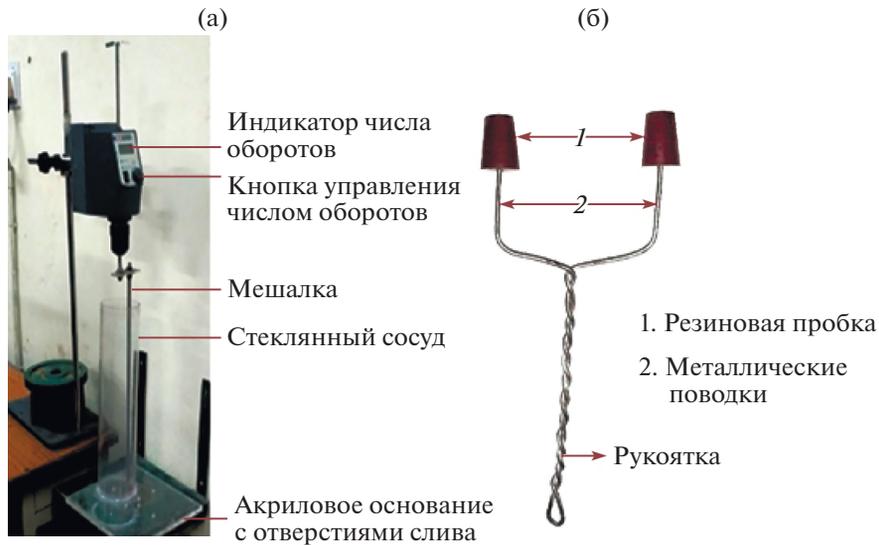


Рис. 2. Экспериментальная установка с механизмом открытия отверстий.

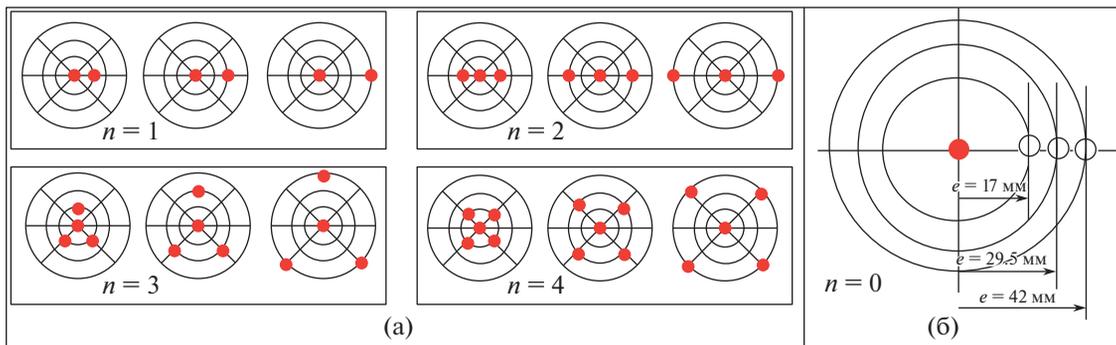
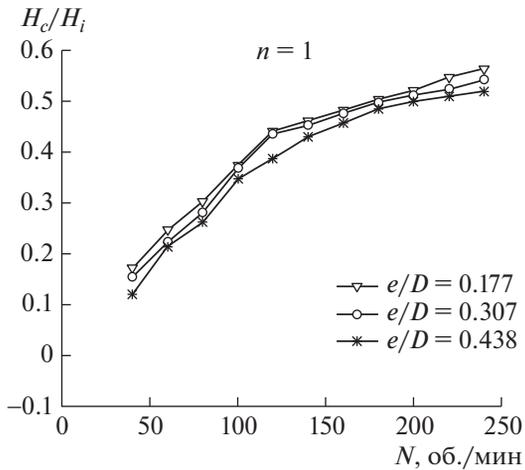
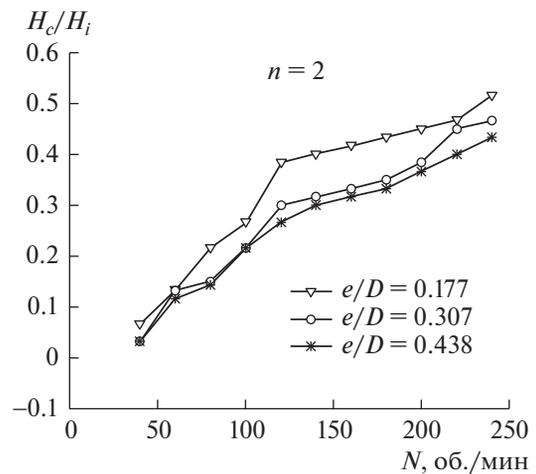
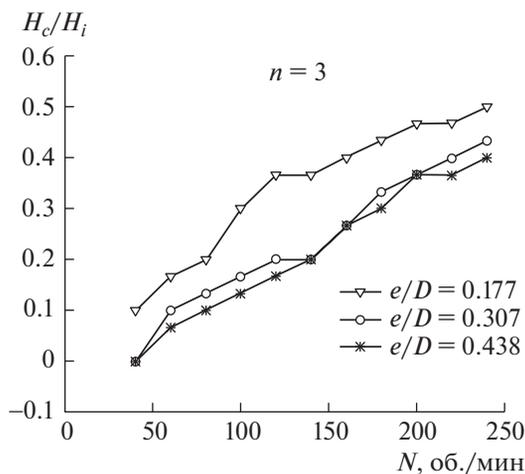
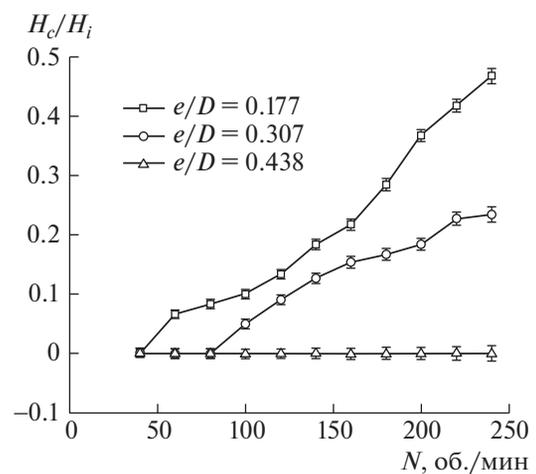


Рис. 3. Изученные конфигурации многочисленных сливных отверстий; красные точки изображают сливные отверстия.

большим значениям критической высоты. В предыдущих исследованиях критическая высота рассматривалась в качестве основного параметра для исследования явления вихреобразования. Время опустошения бака было также измерено с помощью секундомера.

Каждый из экспериментов был повторен 10 раз для обеспечения повторяемости измерений. Для каждой серии экспериментов выполнялись оценки величины стандартного отклонения критической высоты и времени опорожнения сосуда. Согласно проведенным оценкам, разброс измерений этих параметров, а именно, критической высоты и времени опорожнения, составлял 11 и 7% соответственно. Все рассмотренные конфигурации многих отверстий состояли из центрального отверстия слива, окруженного одним или большим числом отверстий. Число окружающих отверстий слива 'n' вокруг центрального отверстия изменяется от 0 до 4 и эти отверстия располагаются на специальных геометрических позициях в основании цилиндрического сосуда (диаметр $D = 96$ мм), как показано на рис. 3. Красные пятна на рис. 3 показывают положения отверстий слива. На рис. 3б изображено эксцентрическое положение окружающих отверстий слива. Расположение окружающих отверстий слива задается величиной эксцентricности, а именно, $e = 17$, 29.5 и 42 мм соответствуют безразмерным значениям эксцентricности $e/D = 0.177$, 0.307 , 0.438 соответственно. Случаи группировались по пяти конфигурациям расположения отверстий слива (n), а именно, $n = 0$, $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ и $n = 4$, как показано на рис. 3. Конфигурация $n = 0$ соответствует случаю единственного центрального отверстия слива. Эксперименты были проведены с водой при комнатной температуре (28°C).

Рис. 4. H_c/H_i как функция N при $n = 1$.Рис. 5. H_c/H_i как функция N при $n = 2$.Рис. 6. H_c/H_i как функция N при $n = 3$.Рис. 7. H_c/H_i как функция N при $n = 4$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование процесса вихреобразования во время истечения жидкости через многочисленные отверстия при одной и той же эксцентricности ($e/D = 0.177, 0.307$ и 0.438 соответственно) и одинаковом диаметре отверстий ($d = 10$ мм) было проведено на конфигурациях расположения отверстий, изображенных на рис. 3. Полученные результаты приведены на рис. 4–14. Как отмечено выше, предыдущие исследователи рассматривали критическую высоту в качестве основного параметра, чтобы охарактеризовать процесс вихреобразования.

На рис. 4–7 показано изменение безразмерной критической высоты H_c/H_i в зависимости от начальной скорости вращения жидкости в баке (N об./мин). Как можно видеть, в общем случае H_c/H_i возрастает при увеличении начальной скорости вращения; в то же время H_c/H_i становится меньше при росте эксцентricности. На рис. 8–11 построены зависимости безразмерного времени истечения жидкости T_d/T_o от скорости вращения мешалки; здесь T_d – время опорожнения бака при наличии начального вращения жидкости и T_o – время опорожнения бака без такого вращения. Можно видеть, что чем выше скорость вращения, сообщенного жидкости, тем выше значение H_c , что означает более длительное время опорожнения бака (большее значение T_d/T_o). При больших значениях T_d/T_o средняя скорость истечения уменьшается из-за образования вихря. Более того, при заданном значении N , H_c/H_i уменьшается при увеличении e/D , что особенно очевидно для $n = 4$ при больших значениях N (рис. 7). Этот эффект эксцентricности расположения

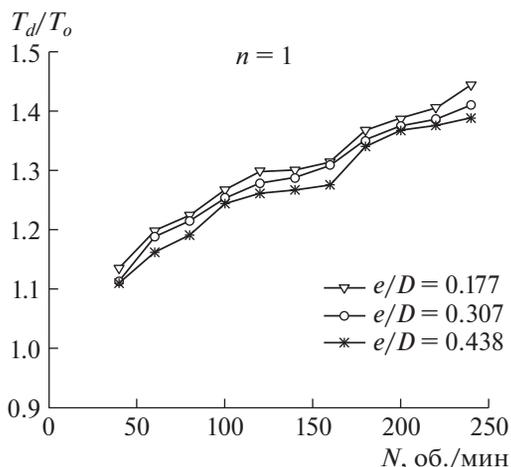


Рис. 8. T_d/T_o как функция N при $n = 1$.

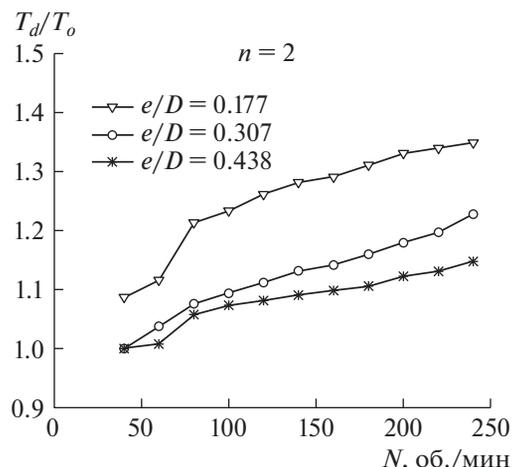


Рис. 9. T_d/T_o как функция N при $n = 2$.

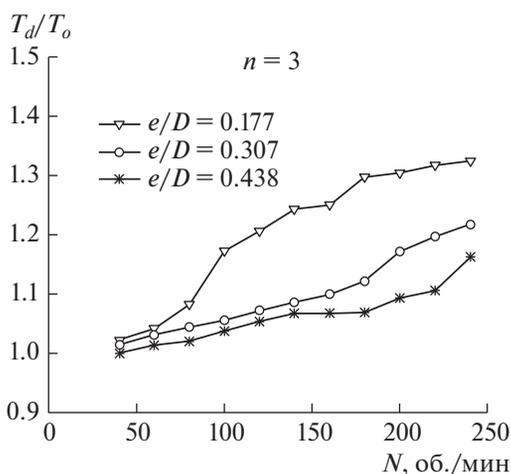


Рис. 10. T_d/T_o как функция N при $n = 3$.

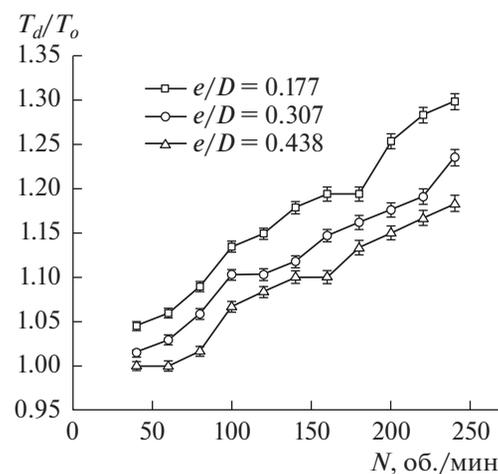


Рис. 11. T_d/T_o как функция N при $n = 4$.

отверстий стока качественно согласуется с результатами предыдущих исследователей [7, 9]. Соответственно, как можно видеть на рис. 8–11, T_d/T_o также уменьшается. Влияние e/D наиболее отчетливо видно на рис. 7 для конфигурации с $n = 4$ при $e/D = 0.438$. Для этой частной конфигурации можно видеть, что критическая высота равна нулю для всех значений начального вращения. Стандартные отклонения измеренных величин, а именно, критической высоты и времени опорожнения, показаны как интервалы ошибок на рис. 7 и 11 соответственно.

Среди всех рассмотренных конфигураций, случай $n = 4$ обеспечил наивысший процент уменьшения (100%) безразмерной критической высоты (рис. 7), за которым следует $n = 3$ (20%, см. рис. 6), $n = 2$ (16.13%, см. рис. 5) и $n = 1$ (7.6%, см. рис. 4), когда e/D изменяется от 0.177 до 0.438 при 240 об./мин. Из этих результатов можно сделать вывод, что более низкие значения критической высоты могут быть достигнуты не только путем увеличения эксцентricности расположения отверстий, но также за счет увеличения числа окружающих сливных отверстий, что очевидно из рис. 12. Рисунок 12 изображает изменение H_c/H_i как функции n для разных значений e/D при $H_i = 300$ мм и $N = 240$ об./мин. При $e/D = 0.177$, когда число сливных отверстий увеличивается от $n = 0$ до $n = 4$, можно получить приблизительно 30% уменьшения критической высоты. Когда нецентральность расположения отверстий возрастает до 0.307 и 0.438, процент уменьшения критической высоты возрастает до 61 и 100% соответственно. На рис. 13а и 13б приведены фотографии вихрей с воздушным ядром как раз в то мгновение, когда они достигли критической

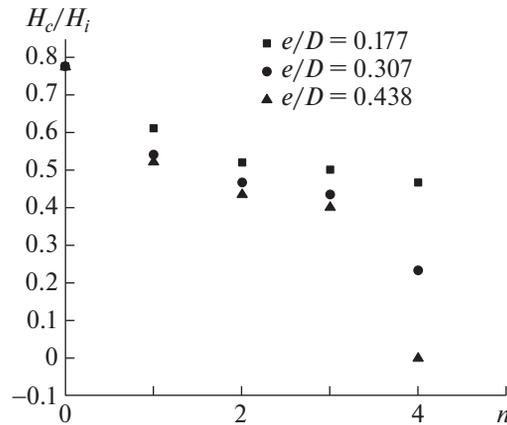


Рис. 12. Изменение H_c/H_i в зависимости от числа сливных отверстий (n).

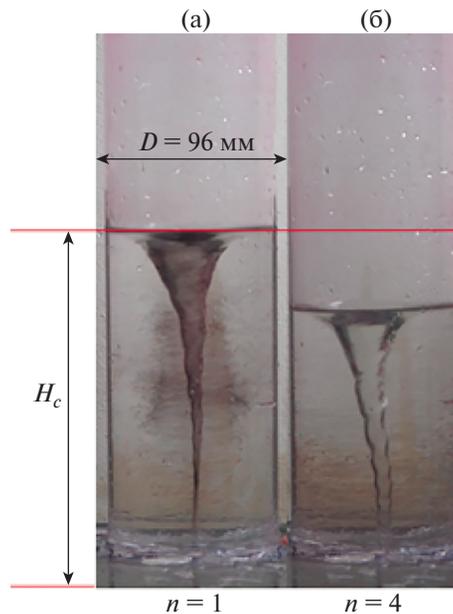


Рис. 13. Формирование критической высоты для конфигураций с $n = 1$ и $n = 4$.

высоты при $n = 1$ и $n = 4$ соответственно при $N = 200$ об./мин и $e/D = 0.177$. Из рис. 13 очевидно, что критическая высота убывает при увеличении числа окружающих отверстий.

Кроме того, из рис. 12 можно видеть, что при $n = 0$ (есть только центральное отверстие) H_c/H_i имеет наибольшее значение и далее, при росте значения n , критическая высота убывает для всех значений e/D . К этому можно добавить, что, согласно экстраполяции, тенденции изменения критической высоты, изображенного на рис. 12, указывают на то, что есть минимальное число окружающих отверстий (n), которые необходимы для уменьшения значения безразмерной критической высоты при заданном отношении e/D . Чтобы прояснить это утверждение, можно указать, что отношение H_c/H_i остается более или менее постоянным (~ 0.55) при $e/D = 0.177$ для $n > 2$, что свидетельствует, о том, что значение критической высоты не может быть доведено до нуля за счет конечного увеличения числа окружающих отверстий. Другими словами, в этом случае для возможного уменьшения критической высоты, ' n ' стремится к бесконечности, что может также означать, что результирующая геометрия отверстий слива асимптотически приближается к некоторому "кольцевому зазору." В то же время при $e/D = 0.307$ графический тренд указывает на то, что критическая высота могла бы быть доведена до нуля, возможно, при $n = 5$. При $e/D = 0.438$,

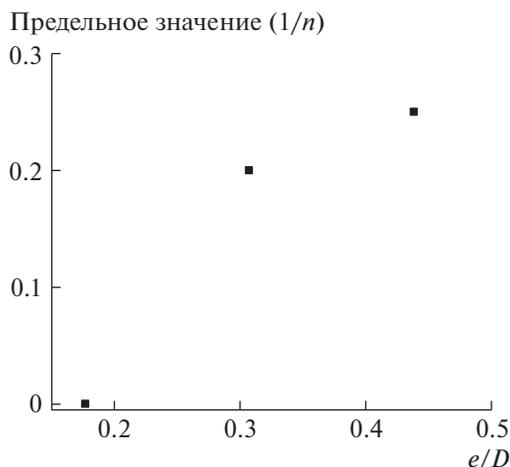


Рис. 14. Изменение предельного значения $(1/n)$ в зависимости от e/D .

как ясно демонстрирует рис. 12 в случае $n = 4$, нет никаких признаков образования вихря с воздушным ядром. На рис. 14 представлены предельные значения величины $1/n$, необходимые, чтобы достичь нулевой критической высоты для каждого отношения e/D . Как показывает данный рисунок, предельное значение $1/n$ возрастает при росте e/D .

Для обсуждения физических аспектов течения в рассматриваемой задаче был проведен анализ потерь гидравлического напора, произошедших во время истечения жидкости, для всех значений начального вращения, эксцентricности расположения и числа отверстий. Скорость жидкости на выходе из сливного отверстия (скорость истечения) в самом начале истечения может быть выражена следующими соотношениями:

$$V_o = \sqrt{2g(H_i - h_o)} = \epsilon_o \sqrt{2gH_i}, \quad (2.1)$$

$$V_d = \sqrt{2g(H_i - h_d)} = \epsilon_d \sqrt{2gH_i}, \quad (2.2)$$

в которых h_i обозначает потерю напора и ϵ – коэффициент потерь, определенный в настоящей работе с нижними индексами o и d , указывающими на отсутствие и наличие вращения жидкости соответственно. Потеря напора, происходящая во время процесса истечения, изменяется при изменении высоты жидкости и включает в себя: *a*) потери напора на входе и выходе из сливного отверстия; *б*) потери напора из-за трения в сливном отверстии; *в*) другие гидравлические потери, которые могут происходить в закрученном потоке (при вращении жидкости). Коэффициенты ϵ_o и ϵ_d отвечают за потери напора, упомянутых выше в пунктах *a*), *б*) и *в*). Говоря более конкретно, в самом начале истечения потери ограничиваются только пунктами *a*) и *б*). По мере развития течения, другие гидравлические потери включаются в картину течения, которая, возможно, видоизменяется во время истечения. Следовательно, коэффициенты ϵ_o и ϵ_d изменяются со временем (в процессе истечения). Таким образом, значения, предписанные для этих коэффициентов потерь, представляют собой усредненные по времени значения в соотношениях (2.3) и (2.4):

$$T_o = \frac{1}{\epsilon_o} \left(\sqrt{\frac{2H_i}{g}} \right) \left(\frac{D^2}{d^2} \right), \quad (2.3)$$

$$T_d = \frac{1}{\epsilon_d} \left(\sqrt{\frac{2H_i}{g}} \right) \left(\frac{D^2}{d^2} \right). \quad (2.4)$$

Эти наборы уравнений были использованы, чтобы найти коэффициенты потерь. Используемые здесь уравнения могут быть выведены из уравнения неразрывности и уравнения Бернулли, которые совпадают с теми, что были использованы в [11].

Когда общее время T_o , которое требуется, чтобы жидкость полностью вытекла из бака в отсутствие начального вращения, и T_d (при наличии начального вращения), измеряется в экспериментах, соответствующие коэффициенты потерь (ϵ_o и ϵ_d) могут быть найдены из соотношений (2.3) и (2.4). Как было указано выше, скорость истечения жидкости из сливного отверстия

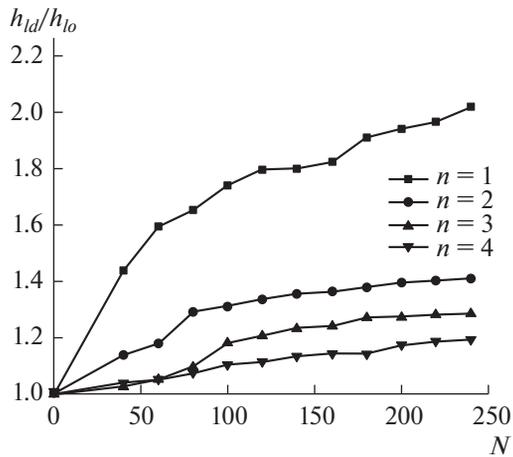


Рис. 15. Изменение h_{id}/h_{lo} в зависимости от N для различных значений n .

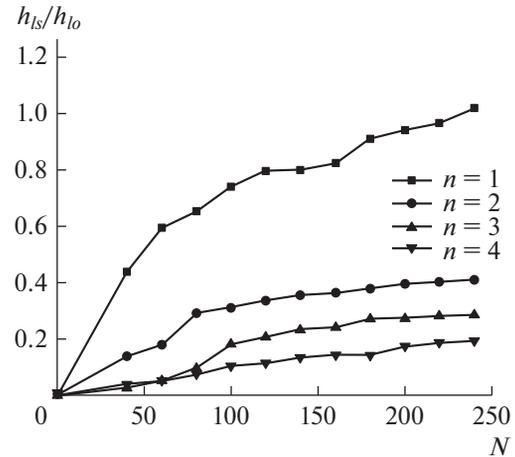


Рис. 16. Изменение h_{ls}/h_{lo} в зависимости от N для различных значений n .

при отсутствии и наличии вращения задается выражениями (2.1) и (2.2) соответственно. Используя соотношения (2.1) и (2.2), из значений коэффициентов потерь можно определить потери напора (h_{lo} и h_{ld}).

Следующее соотношение

$$h_{ld} = h_{lo} + h_{ls} \quad (2.5)$$

определяет связь между h_{lo} и h_{ld} и, следовательно, из (2.5) могут быть найдены потери напора из-за закрутки потока h_{ls} . Все потери безразмерены делением на h_{lo} . На рис. 15 и 16 приведены графики безразмерных параметров, а именно, h_{ld} и h_{ls} соответственно, как функций N , и на рис. 17 изображена зависимость безразмерной скорости истечения V_d/V_o от N при различных значениях n . Все эти графики построены при $e/D = 0.177$. Для всех других значений эксцентricности расположения отверстий слива подобные тренды не наблюдаются. Для больших значений эксцентricности время опорожнения возрастает с увеличением числа окружающих отверстий, хотя критическая высота уменьшается. Это происходит потому, что при больших значениях e/D ($e/D = 0.307$ и $e/D = 0.438$) гидродинамические потери становятся больше, когда число окружающих отверстий увеличивается.

Из рис. 15 видно, что h_{ld}/h_{lo} возрастает при увеличении N и становится меньше при росте числа отверстий; при $N = 240$ об./мин, для единственного окружающего отверстия ($n = 1$), имеем $h_{ld}/h_{lo} \sim 2.0$. Это показывает, что потери из-за закрутки h_{ls} почти равны h_{lo} . Вследствие соотношения (2.5), это указывает на то, что потери на закрутку возрастают при увеличении N и становятся меньше при росте числа отверстий, как изображено на рис. 16. Чтобы подчеркнуть важный факт для дальнейшего, отметим, что коль скоро жидкость вращается, общие потери (h_{ld}) по большей части определяются потерями на закрутку жидкости. Рисунок 17 изображает изменение безразмерной скорости истечения V_d/V_o в зависимости от N , которое обнаруживает, что уменьшение потерь будет усиливать скорость вытекания. Для некоторого специфического значения n скорость вытекания будет максимальной при самом маленьком начальном вращении. При усилении начального вращения интенсивность вихреобразования увеличивается, что приводит к закупорке сливного отверстия. В свете настоящих результатов можно было бы сделать предположение, что потери на закрутку жидкости, которые проявляются только при наличии начального вращения, являются мерой закупорки сливного отверстия завихренным воздушным ядром.

Рисунок 18 представляет собой график безразмерного времени опорожнения в зависимости от числа окружающих отверстий для различных отношений e/D преимущественно при $N = 240$ об./мин. За исключением случая $e/D = 0.177$, для всех остальных значений e/D время опорожнения увеличивается после $n = 2$. Как указывалось выше, когда число окружающих отверстий возрастает, вихреобразование подавляется при $e/D = 0.177$, на что указывают уменьшение критической высоты (см. рис. 12) и уменьшение времени опорожнения (см. рис. 18). Причина подавления может быть объяснена следующим образом. Следует также отметить, что для этого зна-

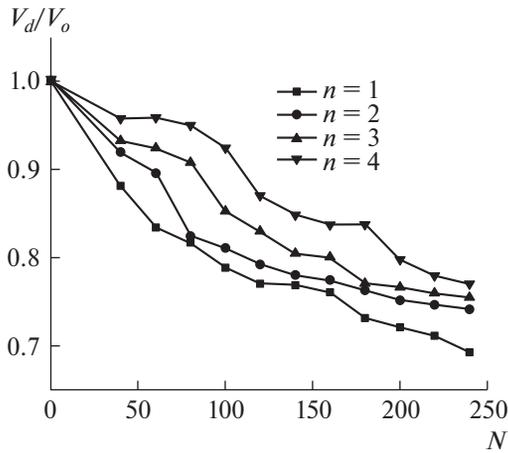


Рис. 17. Изменение V_d/V_o в зависимости от N для различных значений n .

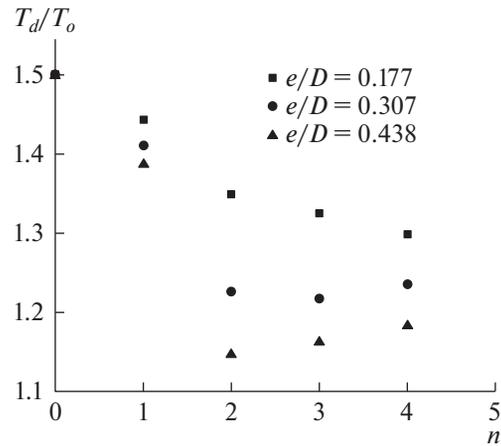


Рис. 18. Изменение T_d/T_o в зависимости от числа сливных отверстий (n) при $N = 240$ об./мин.

чения отношения e/D (равного 0.177) скорость вытекания становится больше при увеличении числа окружающих отверстий (см. рис. 17). Численное исследование, проведенное в [12], позволяет утверждать, что в связи с образованием и подавлением воздушного вихря есть два вида движения жидкости. Первый вид движения связан с приложенным начальным вращением, которое пытается передвинуть жидкость на периферию от оси цилиндра посредством центробежной силы. Это движение будет пытаться усилить образование вихря. Второй вид движения связан с движением жидкости к центру цилиндра, которое пытается подавить образование вихря. Скорость вытекания, заданная соотношением (2.2), непосредственно зависит от радиальной компоненты скорости в силу двумерного уравнения неразрывности (2.6):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial (u_z)}{\partial z} = 0. \tag{2.6}$$

Здесь ρ – плотность жидкости, t представляет собой временной масштаб течения, \mathbf{u} есть вектор скорости, а нижние индексы r и z обозначают радиальное и осевое направления соответственно.

Из уравнения (2.6) можно заключить, что когда осевая компонента скорости (скорость вытекания) возрастает, радиальная компонента скорости к центру также возрастает. Увеличение радиальной компоненты скорости к центру цилиндра результируется в подавлении воздушного ядра, что отражено на рис. 12 и 18. Для других значений e/D , т.е. $e/D = 0.307$ и 0.438 , время опорожнения увеличивается для значений $n > 2$, как видно на рис. 18 преимущественно при $N = 240$ об./мин, что означает, что средний расход уменьшается, поскольку вихреобразование не подавлено. Большее время опорожнения указывает на более интенсивное образование вихря, что должно обычно соответствовать большей критической высоте. В противоречии с этими ожиданиями критическая высота уменьшается (указывая на подавление вихря) для случая большей эксцентricности при $n > 2$ (рис. 12). Таким образом, тенденции поведения критической высоты и времени опорожнения указывают на противоположные особенности вихреобразования в упомянутых случаях ($n > 2$).

На рис. 19–21 представлено изменение h_{id} , h_b и V_d/V_o в зависимости от N для различных значений e/D . Преимущественно графики построены для $n = 1$. Для других значений n наблюдалась похожая тенденция, и по этой причине в данной работе графики не строились.

В [13] было найдено, что при наличии единственного сливного отверстия, если степень нецентральности расположения отверстий возрастает, критическая высота убывает и достигает минимума при максимальном значении нецентральности отверстий. Причина этого факта может быть следующая. В самом начале истечения ось вращения жидкости совпадает с осью цилиндра, но позже ось вращения жидкости перемещается до тех пор, пока она не совпадет с осью отверстия. В этот момент завихренность резко усиливается градиентом продольного течения, и свободная поверхность жидкости опускается вниз. В настоящем исследовании также отмечается уменьшение критической высоты при увеличении нецентральности расположения отверстий.

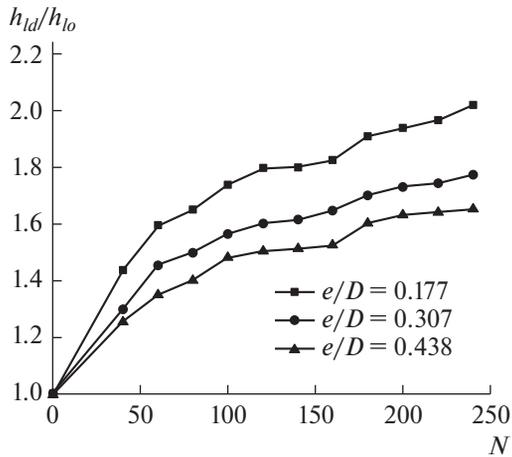


Рис. 19. Изменение h_{id}/h_{lo} в зависимости от N для различных значений e/D .

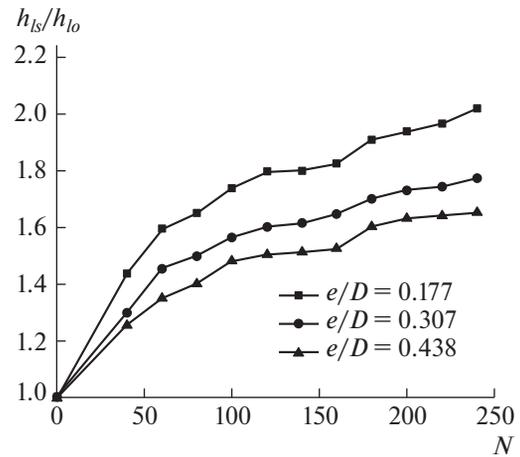


Рис. 20. Изменение h_{ls}/h_{lo} в зависимости от N для различных значений e/D .

На рис. 22а–22в представлены фотографии изменения во времени вихревого воздушного ядра (воронки), которые соответствуют временам истечения 3, 5 и 9 с соответственно во время истечения сквозь многочисленные отверстия с $n = 2$ при $N = 220$ об./мин. В начале истечения чайная труба была добавлена к столбу жидкости, чтобы проследить движение жидких частиц и такое движение можно ясно видеть на рис. 22а. Вихревое воздушное ядро, видимое на рис. 22, показывает, что концентрация завихренности происходит только вдоль центральной оси и оно никогда не смещается в какую-либо сторону (к эксцентричным отверстиям) в течение всего процесса истечения. Было найдено, что это свойство справедливо во всех исследованных случаях присутствия нескольких отверстий. Как продемонстрировано результатами настоящего исследования, без некоторого сдвига оси воздушного ядра критическая высота и время опорожнения уменьшаются с ростом эксцентricности расположения отверстий. Другими словами, настоящие результаты ясно показывают, что при наличии эксцентричных отверстий причиной подавления вихря не является смещение оси вихря, а какая-то более фундаментальная причина, например, меньшие гидравлические потери, связанные с наличием эксцентричных отверстий во время истечения жидкости. При заданном начальном вращении (значении числа оборотов N), как показывают рис. 19 и 20, безразмерные величины h_{id} и h_{ls} убывают с ростом эксцентricности, что результируется в резком подъеме безразмерной скорости вытекания (рис. 21). Следуя аргументам, изложенным выше на основе уравнения (2.6), можно заключить, что увеличение скорости вытекания, вызванное ростом эксцентricности расположения отверстий, инициирует второй вид

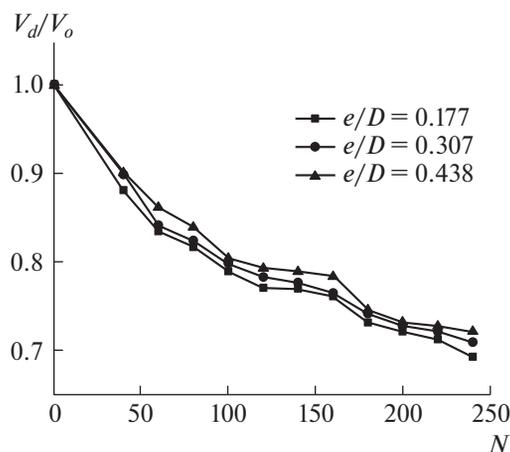


Рис. 21. Изменение V_d/V_o в зависимости от N для различных значений e/D .

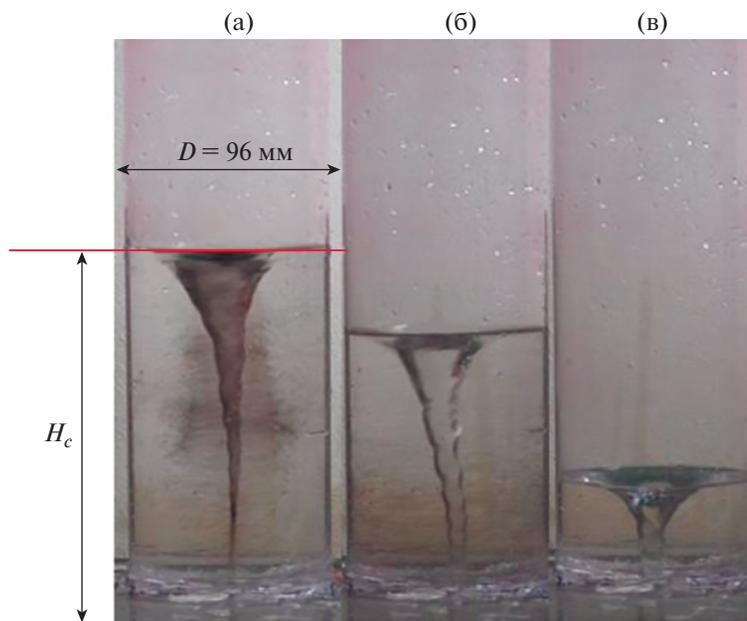


Рис. 22. Временное изменение вихря с воздушным ядром (воронки) при $n = 2$ и $N = 220$ об./мин.

движения жидкости, а именно, рост радиальной скорости к центру, который приводит к подавлению вихря.

2.1. Может ли критическая высота правильно характеризовать явление вихреобразования?

Как уже упоминалось, авторы и предыдущие исследователи использовали критическую высоту в качестве главного параметра, чтобы охарактеризовать явление вихреобразования. Это обусловлено тем, что, как было найдено, для жидкости, вытекающей из одиночных отверстий, в случае задания более интенсивного начального вращения жидкости (циркуляции), критическая высота возрастает и, следовательно, время, необходимое для вытекания жидкости из бака (время опорожнения) также возрастает, поскольку образующееся вихревое воздушное ядро закупоривает зону истечения. Подчеркнем для дальнейшего, что большая критическая высота (интенсивное вихреобразование) всегда приводит к большему времени опорожнения в случаях, когда жидкость вытекает через одиночное отверстие, как указывалось в предыдущих исследованиях. Результаты настоящего исследования, представленные на рис. 4–11, показывают, что как критическая высота, так и время опорожнения возрастают с ростом N для конфигураций с многими отверстиями, и эти результаты не противоречат этому аргументу. Более того, рис. 12 обнаруживает тот факт, что критическая высота уменьшается при увеличении числа сливных отверстий n при всех значениях эксцентricности. Соответственно, как и в случае одиночных сливных отверстий, можно ожидать, что время опорожнения жидкости также будет убывать. Однако прямо противоположно этим ожиданиям, при $n > 2$ время опорожнения возрастает, как можно видеть из рис. 18. В общем случае, теперь можно сделать вывод, что при всех больших значениях эксцентricности ($e/D > 0.177$) число окружающих отверстий слива, требуемых для подавления вихреобразования, должно быть ограничено двумя.

В практических приложениях, таких как аэрокосмическая область, литье металлов и строительство гидротехнических сооружений требуется поддерживать адекватное условие расхода во время истечения жидкости из резервуаров или баков. Другими словами, жидкость должна вытекать без ненужной задержки. Однако образование воздушного ядра закупоривает зону истечения, последовательно затягивая процесс вытекания жидкости и таким образом увеличивая время опорожнения. В качестве соответствующего примера упомянем временное запаздывание при истечении жидкого топлива, используемого в ракетных двигателях, которое негативно сказывается на характеристиках двигателя [14]. По этой причине не только критическая высота, но также время опорожнения жидкости являются очень важными параметрами, которые определяют явление вихреобразования. В свете текущего исследования предлагается, чтобы при оценке размеров влияния явления вихреобразования обязательно рассматривались оба эти параметра, а

именно, критическая высота и, как более важное, время опорожнения жидкости. Одной критической высоты недостаточно, чтобы охарактеризовать образование вихря.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование вихреобразования во время истечения из цилиндрического бака через многочисленные отверстия было предпринято для пяти конфигураций с числом отверстий $n = 0, n = 1, n = 2, n = 3$ и $n = 4$ при $H_i = 300$ мм для широкого диапазона начальной скорости вращения жидкости от 40 до 240 оборотов в минуту и были сделаны следующие выводы.

Для всех значений n явление вихреобразования интенсифицируется (возрастают критическая высота и время опорожнения) при увеличении начального вращения и ослабляется при росте нецентральности расположения отверстий. То есть воздушное ядро может быть подавлено путем увеличения эксцентricности расположения отверстий. Как критическая высота, так и время стекания обнаруживают нелинейные изменения по отношению к скорости вращения жидкости во всех изученных случаях. При увеличении числа отверстий, окружающих центральное отверстие, вихрь подавляется все сильнее и сильнее при меньших значениях эксцентricности расположения отверстий ($e/D = 0.177$). Также найдено, что при больших значениях эксцентricности расположения отверстий время опорожнения увеличивается при превышении числа окружающих отверстий значения $n = 2$. Поэтому для всех больших значений эксцентricности (случаи с $e/D > 0.177$) число окружающих отверстий должно быть ограничено величиной $n = 2$. Данное исследование также обнаружило, что время опорожнения, вместе с критической высотой, являются главными параметрами для описания явления вихреобразования, в частности с практической точки зрения. Найдено, что гидравлические потери, связанные с многочисленными отверстиями, меньше по сравнению с одиночными концентрическими отверстиями, что результируется в подавлении вихря. Более того, сдвиг оси вихря не является единственной возможной причиной подавления вихря при больших значениях нецентральности расположения отверстий, но ослабление вихря может также происходить из-за уменьшенных потерь при закрутке потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lubin B.T., Springer G.S.* The formation of a dip on the surface of a liquid draining from a tank // *Journal of Fluid Mechanics*. 1967. V. 29. № 2. P. 385–390.
2. *Ramamurthi K., Tharakan T.J.* Shaped discharge ports for draining liquids // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1992. I. 30. № 6. P. 786–788.
3. *Zhoq Q.N., Graebel W.P.* Axisymmetric draining of cylindrical tank with a free surface // *Journal of Fluid Mechanics*. 1990. V. 221. № 6. P. 511–532.
4. *Hite J.E., Mih W.C.* Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1994. V. 120. № 3. P. 284–297.
5. *Gowda B.H.L., Akhuli S., Anudeep B.R., Ipe K.R., Kishore K.* Influence of base inclination on vortex formation during draining from cylindrical tanks // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2013. V. 20. № 5. P. 361–366.
6. *Gowda B.H.L.* Draining of liquids from tanks of square or rectangular cross sections // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1996. V. 33. № 2. P. 311–312.
7. *Sohn C.H., Gowda B.H.L., Ju M.G.* Eccentric drain port to prevent vortexing during draining from cylindrical tanks // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2008. V. 45. № 3. P. 638–340.
8. *Kumar R.A., Josy J., Shaji R.K., Srikrishnan A.R.* Vortex suppression through drain port sizing // *Journal of Aerospace Engineering*. 2016. V. 29. № 4. P. 06016002.
9. *Kumar R.A., Nair R.R., Prabhu M., Srikrishnan A.R.* Vortex formation during draining from cylindrical tanks: Effect of drain port eccentricity // *Journal of Aerospace Engineering*. 2017. V. 30. № 5. P. 06017001.
10. *Prabhu M., Kumar R.A., Nair R.R., Anith T.A.* Liquid draining through polygonal ports: An investigation on gas entraining vortices // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2019. V. 56. № 5. P. 1651–1657.
11. *Prabhu M., Kumar R.A., Gopikrishnan T.H., Deshpande P.J., Anandhakrishnan U., Kiran A.S., Govindu R.P.* Rankine vortex formation during draining: A new twin port suppression strategy // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020. V. 13. № 1. P. 147–160.
12. *Nazir K., Sohn C.H.* Study of air core phenomenon and influence of water height during liquid draining // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. V. 31. № 8. P. 3831–3837.
13. *Piva M., Iglesias M., Bissio P., Calvo A.* Experiments on vortex funnel formation during drainage // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2003. V. 329. № 1. P. 1–6.
14. *Son J.H., Park S.* Prevention of air entrainment during liquid draining using disc-type vortex suppressor // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. V. 32. № 10. P. 4675–4682.

Перевод с английского Е.А. Пушкаря