

УДК 532.528

doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37

УДАРНАЯ КАВИТАЦИЯ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, И.Н. Мустафин

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН,
г. Казань, 420111, Россия*

Аннотация

Рассматривается динамика жидкости в цилиндрической емкости и импульсное воздействие на ее днище при ударе по ее верхнему концу. Изучается случай, когда при ударе в столбе жидкости возле днища возникает кавитация. Исследование проводится в условиях известных экспериментов по разрушению бутылки в результате удара по ее верхнему концу. Применяются одномерные модели гидродинамики, линейной акустики и несжимаемой жидкости. Уравнения гидродинамики рассчитываются классическим методом С.К. Годунова. Изменение ускорения днища описывается кусочно-постоянной функцией, а кавитация моделируется одиночной кавитационной полостью в виде цилиндрического слоя между днищем и столбом жидкости. Кавитация возникает при падении давления жидкости ниже давления насыщенного пара. Показывается, что разрушение бутылки в экспериментах происходит вследствие гидроудара, вызванного коллапсом кавитационной полости, которая схлопывается в результате смещения столба жидкости. Влияние волн в столбе жидкости на его удар по днищу незначительно. При уменьшении давления на внешней поверхности жидкости от атмосферного ударное воздействие на днище убывает. Устанавливается также оптимальная высота столба жидкости для достижения больших давлений на днище.

Ключевые слова: цилиндрическая емкость, удар по днищу, кавитация, кавитационная полость, схлопывание полости, уравнения газовой динамики, метод Годунова

Введение

Теоретическому и экспериментальному изучению воздействия жидкости на твердые стенки в условиях кавитации в окрестности стенки посвящена обширная литература (см., например, [1–11]). Фундаментальные аспекты кавитации излагаются в [1–4]. В [5] рассматривается роль кавитационных явлений в ряде технологических операций (например, измельчения различных сред, смешивания, очистки поверхностей), исследуется их применение в космических технологиях. В [6–8] экспериментально и теоретически изучается кавитационное взаимодействие падающей ударной волны с тонкостенной пластиной, представляющей собой днище вертикальной трубы. В [9] рассматриваются различные аспекты динамики пузырьков у стенки, а вопросы воздействия пузырьков на стенку – в работах [10, 11].

В настоящей работе изучается воздействие на днище частично заполненной жидкостью цилиндрической емкости при сильном ударе по ее верхнему концу. В результате удара в жидкости в окрестности границы ее контакта с днищем емкости резко понижается давление, возникает кавитация (кавитационные полости, пузырьки). В фазе пониженного давления размеры кавитационных полостей вследствие их расширения и слияния могут значительно увеличиться. Это фактически

означает, что столб жидкости отрывается от дна. Последующее смещение жидкости в сторону дна приводит к схлопыванию (коллапсу, сжатию) указанных кавитационных полостей, что может сопровождаться большим и резким повышением давления в малой окрестности дна емкости. А это может приводить, в свою очередь, к механическим повреждениям как дна, так и боковой поверхности емкости в окрестности дна (один из вариантов реализации кавитационного разрушения). Изучение проводится в условиях экспериментов [12–14], посвященных исследованию кавитационного разрушения бутылки, частично заполненной жидкостью, при резком ударе по ее горлышку. Основным результатом авторов [12–14] состоит в том, что разрушение обусловлено не напряжениями, возникающими в стенках бутылки при ударе, как считалось ранее, а кавитацией жидкости.

Различные практические ситуации отрыва столба жидкости от твердой поверхности, разнообразные модели и методы исследований этого явления, полученные результаты и большое число ссылок по данной теме приведены в обзорной работе [15]. Качественное аналитическое моделирование образования и схлопывания кавитационной полости в экспериментах [12–14] проведено в [16, 17]. При этом жидкость считалась идеальной несжимаемой, перемещение дна аппроксимировалось полиномом четвертой степени. С помощью поправочного коэффициента учитывалось изменение плотности жидкости за счет наличия в ней кавитационных пузырьков. Резкое повышение давления происходит в условиях адиабатического сжатия полости. В настоящей работе жидкость полагается сжимаемой, используется более точная аппроксимация экспериментально замеренного в [12–14] ускорения дна бутылки. Предполагается реализация плоского удара нижней поверхности столба жидкости и дна емкости при отсутствии адиабатического сжатия полости. Такая картина заключительной стадии рассматриваемого процесса может иметь место при истечении пара из сжимающейся полости через возможные повреждения стенок или при нарушении одномерности процесса. Действительная картина может состоять одновременно из обоих заключительных сценариев процесса.

1. Постановка задачи

Рассматривается динамика жидкости в цилиндрической емкости при ударе по ее верхнему концу (рис. 1). Изучается случай, когда в результате обусловленного ударом ускоренного движения емкости вниз в окрестности ее дна в столбе жидкости возникает кавитация – образуются кавитационные пузырьки. Сначала пузырьки, увеличиваясь в размерах и сливаясь, формируют относительно однородную область (рис. 1, *b*), что фактически означает отрыв столба жидкости от дна. Затем эта область схлопывается, вызывая ударное нагружение дна.

Для описания динамики жидкости применяется система уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и полной энергии,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e v + p v)}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Здесь t – время, x – осевая координата, ρ – плотность, v – скорость вдоль оси, p – давление, $e = \varepsilon + v^2/2$ – полная энергия единицы массы, ε – внутренняя энергия единицы массы. Система (1) замыкается уравнением состояния «жесткого» газа [18]

$$p = (\Gamma - 1)\rho\varepsilon - \Gamma B, \quad (2)$$

где Γ и B – константы (для воды $\Gamma = 7.15$ и $B = 3.045$ кбар).

Считается, что кавитация возникает при падении давления жидкости до уровня давления ее насыщенного пара $p_s \approx 0.023$ бар в виде тонкого слоя вдоль всего сечения столба жидкости, заполняющего емкость. В волне разрежения, образующейся

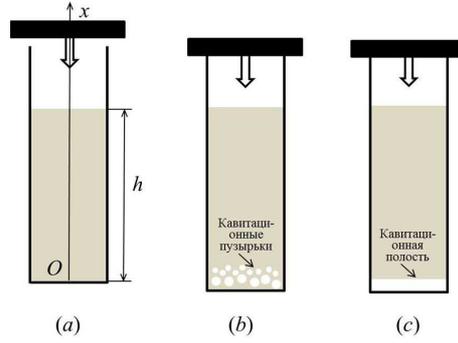


Рис. 1. Динамика жидкости в емкости при ударе по ее верхнему концу (a, b) и схема, используемая при моделировании (c)

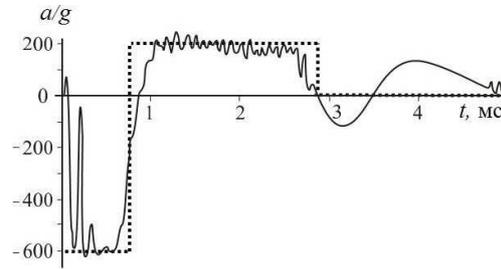


Рис. 2. Изменение осевого ускорения дна бутылки (до начала интенсивного воздействия на дно) при ударе по ее горлышку в экспериментах [12–14] (сплошная линия) и его кусочно-постоянная аппроксимация (пунктирная линия)

в начале удара в столбе жидкости у дна емкости, давление p_s достигается при скорости дна v_s , определяемой как [19]

$$v_s = -\frac{2}{(\Gamma - 1)c} \left[1 - \left(\frac{p_s + B}{p_0 + B} \right)^{(\Gamma-1)/(2\Gamma)} \right].$$

Отметим, что $v_s \approx \Delta p / (\rho_0 c_0)$, где $\Delta p = p_0 - p_s$, p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, ρ_0 , c_0 – плотность и скорость звука в невозмущенной жидкости (в воде $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_0 = 1500 \text{ м/с}$).

Решение уравнений (1),(2) находится численным методом С.К. Годунова [19].

Исследования проводятся в условиях экспериментов [12–14], направленных на выявление механизма разрушения бутылки, реализующегося при ударе по ее горлышку. Экспериментально установленный закон изменения ускорения дна бутылки представлен на рис. 2 сплошной линией. При моделировании применяется удобная для анализа кусочно-постоянная аппроксимация (рис. 2, пунктирная линия): $a = a_{\text{neg}} = -600g$ при $0 \leq t < 0.8$ мс, $a = a_{\text{pos}} = 200g$ при $0.8 \text{ мс} < t < 2.8$ мс и $a = 0$ при $t > 2.8$ мс, где g – ускорение свободного падения.

Возникающие при ударе напряжения в стенках распространяются в сторону дна со скоростью звука в материале бутылки C и достигают его примерно через $\delta t \approx H/C$, где H – высота емкости (бутылки). Для стеклянной бутылки ($C \approx 4800 \text{ м/с}$) с $H \approx 24$ см это время $\delta t \approx 0.05$ мс, что на два порядка меньше наблюдаемого в экспериментах промежутка времени между началом удара

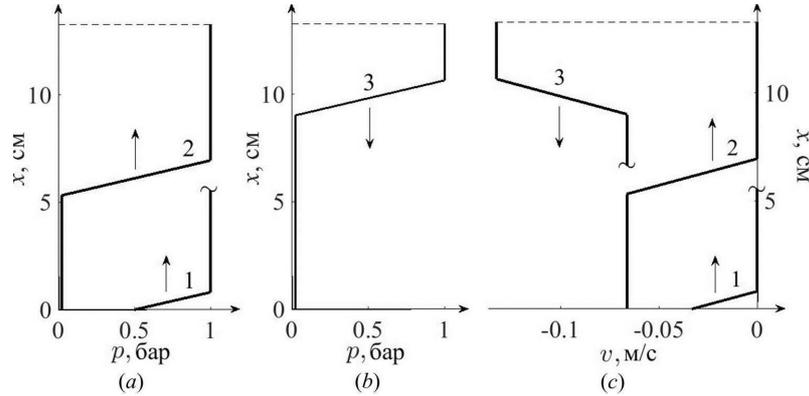


Рис. 3. Распределение давления (*a*, *b*) и скорости (*c*) в столбе жидкости вдоль его оси на три момента времени (кривые 1–3): $t_1 = 0.0055$ мс, $t_2 = 0.047$ мс и $t_3 = 0.029$ мс. Стрелками указано направление распространения волн, горизонтальными штриховыми линиями – верхняя граница столба жидкости x_t

и разрушением бутылки (около 5.6 мс). Следовательно, возникающие при ударе в стенках бутылки напряжения не определяют механизм ее разрушения, что и подтверждается в [12–14] экспериментами с пустой бутылкой.

2. Динамика столба жидкости

Изменение пространственных распределений давления и скорости в столбе жидкости в рассматриваемом процессе от начала удара и до захлопывания кавитационной полости в рамках модели (1) иллюстрирует рис. 3. В относительно кратковременной начальной стадии удара нижняя граница $x = x_b$ столба жидкости остается присоединенной к поверхности $x = x_B$ дна емкости (то есть $x_b = x_B$). В этой стадии давление на границе x_b падает, скорость ее перемещения (вниз) v_b возрастает, в окрестности x_b формируется уходящая вверх волна разрежения (рис. 3, кривые 1). В некоторый момент времени t_s давление на границе x_b становится равным давлению насыщенного пара p_s . В этот момент дно отрывается от нижней границы: между ними возникает кавитационная полость. В рамках принятой кусочно-постоянной аппроксимации ускорения дна (рис. 2) имеем $t_s \approx v_s/a_{\text{neg}} \approx 0.01$ мс (в экспериментах $t_s \approx 0.3$ мс). В дальнейшем давление в полости вплоть до момента ее захлопывания считается неизменным и равным давлению p_s . В момент t_s формирование профиля уходящей вверх волны разрежения завершается. Профиль принимает вид, характеризуемый на рис. 3 кривыми 2.

После образования кавитационной полости сначала от нижней границы столба жидкости x_b в направлении его верхней границы x_t уходит волна разрежения (рис. 3, кривые 2). В результате взаимодействия волны разрежения с верхней границей x_t на этой границе образуется уходящая вниз волна сжатия (рис. 3, кривые 3). Затем эта волна сжатия достигает нижней границы x_b , взаимодействует с ней и трансформируется в уходящую вверх волну разрежения. Данная волна разрежения мало отличается от предшествующей волны разрежения (рис. 3, кривые 2). В последующем отмеченный процесс распространения и трансформации уходящих вверх волн разрежения и распространяющихся вниз волн сжатия многократно повторяется. При этом скорость жидкости в столбе при прохождении каждой из этих волн увеличивается примерно на $\Delta p/(\rho_0 c_0)$. По этой причине через некоторое время нижняя граница столба жидкости достигает дна: кавитационная полость захлопывается.

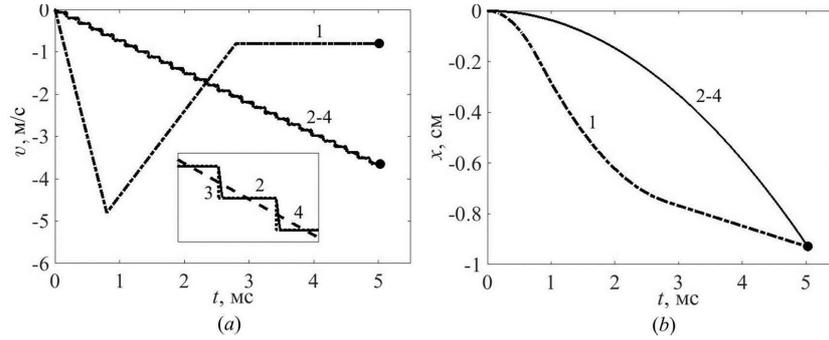


Рис. 4. Изменение скоростей (а) и положений (б) дна и нижней границы столба жидкости от начала удара до момента захлопывания (указан точкой) кавитационной полости между дном и столбом жидкости, $h = 13.3$ см. Штрих-пунктирные линии 1 соответствуют дну, сплошные линии 2, пунктирные линии 3 и штриховые линии 4 – моделям гидродинамики, линейной акустики и несжимаемой жидкости соответственно

Рис. 4 характеризует изменение скоростей и положений дна и нижней границы столба жидкости в промежутке от начала удара до момента захлопывания кавитационной полости между дном и столбом жидкости. На этом рисунке наряду с результатами, рассчитанными по модели сжимаемой жидкости (1), представлены также и результаты, полученные по моделям несжимаемой жидкости и линейной акустики (слабосжимаемой жидкости). При этом в случаях несжимаемой жидкости и линейной акустики для упрощения предполагается, что кавитационная полость между дном и столбом жидкости возникает в самом начале удара (при $t = 0$). Видно, что в более подробном масштабе (вставка на рис. 4, а) профили скорости, рассчитанные с учетом и без учета сжимаемости жидкости, различаются довольно существенно. Так, при учете сжимаемости жидкости они имеют ступенчатый характер (с разрывным переходом от одной ступеньки к другой в модели линейной акустики и непрерывным переходом в модели сжимаемой жидкости (1)), тогда как без учета сжимаемости профиль скорости представляет собой прямую. Вместе с тем в более крупном масштабе все три профиля скорости оказываются весьма близкими. В результате траектории нижней границы столба жидкости, рассчитанные по трем моделям (рис. 4, б), являются практически неразличимыми.

На рис. 4 видно также, что модели сжимаемой жидкости (1) и линейной акустики дают близкие результаты, за исключением того, что в профилях модели (1) фронты волн разрежения и сжатия являются наклонными и непрерывными, а не скачкообразными, как в акустическом приближении. Такая разница обусловлена наличием в модели (1) безотрывного смещения нижней границы столба жидкости в начальной стадии удара, тогда как при использовании модели линейной акустики применяется дополнительное упрощающее предположение о том, что столб жидкости отрывается от дна в самом начале удара. Близость решений в рамках моделей линейной акустики и сжимаемой жидкости (1) свидетельствует о малости проявления нелинейных эффектов. Это объясняется малой амплитудой волн.

Из рис. 4 следует, что размер кавитационной полости вдоль оси x (разность $x_b - x_B$) возрастает до момента $t \approx 2.6$ мс, а ее последующее захлопывание завершается при $t_{wh} \approx 5$ мс. В экспериментах пузырьки увеличиваются до момента $t \approx 3.2$ мс, а их коллапс завершается при $t \approx 5.6$ мс. В момент захлопывания полости t_{wh} скорость дна $v_B = -0.8$ м/с, а скорость нижней границы столба жидкости $v_b = -3.64$ м/с. В результате контакта дна и столба жидкости возникает гидроудар с давлением $p_{wh} \approx \rho_0 c_0 (v_B - v_b) \approx 42$ бар, вполне достаточным для

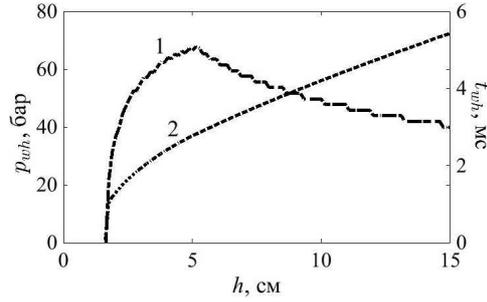


Рис. 5. Влияние высоты столба жидкости на давление гидроудара p_{wh} по днцу в результате захлопывания кавитационной полости (кривая 1) и на момент гидроудара t_{wh} (кривая 2), результаты расчетов по модели линейной акустики

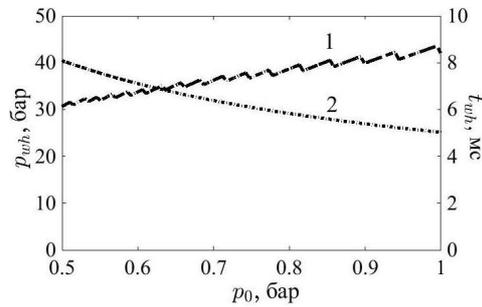


Рис. 6. Влияние давления жидкости p_0 на давление гидроудара по днцу p_{wh} (кривая 1) и на момент гидроудара t_{wh} (кривая 2), результаты расчетов по модели линейной акустики

реализации наблюдаемого в экспериментах разрушения бутылки. Представляется, что с учетом довольно сильного упрощения рассматриваемого явления при моделировании (одномерность процесса, одна кавитационная полость вместо множества пузырьков и т. д.) полученное согласование результатов расчетов с экспериментальными данными можно считать удовлетворительным.

3. Влияние высоты столба жидкости на его удар по днцу емкости

Влияние высоты столба жидкости на параметры его удара по днцу емкости характеризует рис. 5.

Видно, что давление гидроудара по днцу емкости $p_{wh} \approx \rho_0 c_0 (v_B - v_b)$, возникающие вследствие захлопывания кавитационной полости, по мере уменьшения высоты столба жидкости h сначала возрастает, а затем уменьшается. Оптимальная для разрушения бутылки высота столба жидкости есть $h \approx 5$ см. Такое изменение величины давления гидроудара обусловлено, главным образом, особенностью траектории днща, а именно довольно быстрым уменьшением его скорости в промежутке $1 < t < 3$ мс. В отличие от этого, момент гидроудара t_{wh} с уменьшением h монотонно уменьшается.

4. Зависимость удара столба жидкости по днцу емкости от давления жидкости

Влияние давления жидкости на параметры удара столба жидкости по днцу емкости характеризует рис. 6.

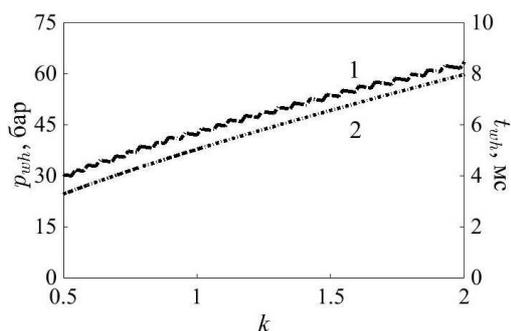


Рис. 7. Влияние ускорения дна, характеризуемого параметром k , на давление гидродара по дну p_{wh} (кривая 1) и на момент гидродара t_{wh} (кривая 2), результаты расчетов по модели линейной акустики

Видно, что с уменьшением давления жидкости сила удара столба жидкости по дну емкости в момент захлопывания кавитационной полости убывает квазимоноotonно, а момент гидродара монотонно возрастает.

5. Влияние ускорения дна емкости на удар столба жидкости

Влияние ускорения дна емкости на параметры удара столба жидкости по дну характеризует рис. 7. Для оценки данного влияния отрицательное a_{neg} и положительное a_{pos} значения ускорения дна заменяются соответственно на ka_{neg} и ka_{pos} , где k — некоторая константа.

Видно, что с уменьшением k сила удара столба жидкости по дну емкости в момент захлопывания кавитационной полости убывает квазимоноotonно, а момент гидродара убывает.

Заключение

Проведено численное моделирование воздействия жидкости на дну цилиндрической емкости при сильном ударе по ее открытому концу. Использовалась кусочно-постоянная аппроксимация изменения ускорения дна. Показано, что разрушение бутылки в экспериментах [12–14] происходит в результате гидродара, обусловленного захлопыванием кавитационной полости из-за смещения всего столба жидкости. Влияние волн в столбе жидкости на его крупномасштабную динамику и его удар по дну емкости незначительно. С уменьшением высоты столба жидкости до некоторого значения ударное воздействие столба жидкости на дну емкости возрастает, а затем падает. Таким образом, имеется оптимальная высота столба жидкости для достижения больших давлений. С уменьшением давления на верхней поверхности столба жидкости от атмосферного ударное воздействие столба жидкости на дну емкости убывает. С уменьшением диапазона между отрицательным и положительным значениями ускорения дна ударное воздействие столба жидкости на дну емкости убывает.

Литература

1. Коул Р.Х. Подводные взрывы. — М.: Изд-во иностр. лит., 1950. — 488 с.
2. Перник А.Д. Проблемы кавитации. — Л.: Судостроение, 1966. — 439 с.

3. *Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С.* Динамические нагрузки при подводном взрыве. – Л.: Судостроение, 1967. – 388 с.
4. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 435 с.
5. *Ганиев Р.Ф., Лапчинский Г.Ф.* Проблемы механики в космической технологии. – М.: Машиностроение, 1979. – 250 с.
6. *Павлов А.А., Ильгамов М.А.* Исследование ударной волны в жидкости // Труды семинара по теории оболочек. – Казань: Казан. физ.-техн. ин-т АН СССР, 1974. – Вып. IV. – С. 181–195.
7. *Павлов А.А., Галиев Ш.У.* Экспериментальное исследование кавитационного взаимодействия волны давления в жидкости с пластиной // Проблемы прочности. – 1977. – № 8. – С. 84–88.
8. *Галиев Ш.У.* Динамика гидроупругопластических систем. – Киев: Наукова думка, 1981. – 276 с.
9. *Аганин А.А., Ильгамов М.А., Косолапова Л.А., Малахов В.Г.* Динамика кавитационного пузырька вблизи твердой стенки // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 219–228.
10. *Aganin A.A., Guseva T.S., Kosolapova L.A., Khismatullina N.A.* The calculation of weakly nonspherical cavitation bubble impact on a solid // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – V. 158. – Art. 012003, P. 1–6. – doi: 10.1088/1757-899X/158/1/012003.
11. *Аганин А.А., Гусева Т.С., Косолапова Л.А.* Воздействие кавитационного пузырька на стенку // Изв. вузов. Авиац. техн. – 2017. – № 3. – С. 67–72.
12. *Daily D.J., Langley K.R., Thomson S.L., Truscott T.T.* Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation. – 2013. – arXiv:1210.3764v2.
13. *Daily D.J.* Fluid-structure interactions with flexible and rigid bodies: Ph.D Thesis. – Provo, Utah, USA: Brigham Young Univ., 2013. – 155 p. – URL: <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4790&context=etd>.
14. *Daily J., Pendlebury J., Langley K., Hurd R., Thomson S., Truscott T.* Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation // Phys. Fluids. – 2014. – V. 26, No 9. – Art. 091107, P. 1–2. – doi: 10.1063/1.4894073.
15. *Bergant A., Simpson A.R., Tijsseling A.S.* Water hammer with column separation: A historical review // J. Fluids Struct. – 2006. – V. 22, No 2. – P. 135–171. – doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.008.
16. *Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А.* Кавитация столба жидкости при движении ее нижней границы // Докл. РАН. – 2018. – Т. 482, № 1. – С. 28–32. – doi: 10.31857/S086956520003129-4.
17. *Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А.* Динамика кавитационной полости и кавитационное разрушение // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – Т. 48, № 1. – С. 3–14. – doi: 10.1134/S0235711919010085.
18. *Harlow F.H., Amsden A.A.* Fluid dynamics. Monograph LA-4700. – Los Alamos, N. M.: Los Alamos National Laboratory, 1971. – 122 p.
19. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Аганин Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: aganin@kfti.knc.ru

Ильгамов Марат Аксанович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: ilgamov@anrb.ru

Мустафин Ильдар Наилевич, аспирант, младший инженер-исследователь

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: Ildarmn@mail.ru

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2020, vol. 162, no. 1, pp. 27–37

doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37

Impact-Induced Cavitation in a Cylindrical Container with Liquid

*A.A. Aganin**, *M.A. Ilgamov***, *I.N. Mustafin****

*Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, 420111 Russia*

E-mail: **aganin@kfti.knc.ru*, ***ilgamov@anrb.ru*, ****Ildarmn@mail.ru*

Received July 3, 2019

Abstract

The dynamics of liquid in a cylindrical container and the pulse action on its bottom under impact on its upper end was considered. The case with cavitation in the liquid column near the bottom was investigated. The study was performed in the conditions of the known experiments on the bottle breaking resulting from impacting on its upper end. One-dimensional models of hydrodynamics, linear acoustics, and incompressible liquid were applied. The hydrodynamic equations were solved by the Godunov method. Variation of the bottom acceleration was described by a piecewise-constant function, the cavitation was simulated by a single cavity in the form of a cylindrical layer near the bottom. It was shown that in the experiments the bottle breaks because of the water hammer pressure resulting from the cavity collapse. The influence of the waves in the liquid column on the bottom load is insignificant. With decreasing the pressure on the external liquid surface from the atmospheric value, the action on the bottom decreases. There is an optimal height to attain large pressures on the bottom.

Keywords: cylindrical container, impact on bottom, cavitation, cavity, cavity collapse, gas dynamics equations, Godunov method

Figure Captions

Fig. 1. Dynamics of a liquid in a container at an impact on its upper end (*a*, *b*) and the schematic used in the simulation (*c*).

Fig. 2. The change in the axial acceleration of the bottle bottom (before the beginning of intensive action on the bottom) at an impact on its neck in experiments [12–14] (solid line) and its piecewise-constant approximation (dotted line).

Fig. 3. Pressure (*a*, *b*) and velocity (*c*) distributions in the liquid column along its axis at three moments (curves 1–3): $t_1 = 0.0055$ ms, $t_2 = 0.047$ ms and $t_3 = 0.029$ ms. The arrows indicate the direction of wave propagation, horizontal dashed lines show the upper boundary of the liquid column x_t .

Fig. 4. Change of velocity (*a*) and positions (*b*) of the bottom and the lower boundary of the liquid column from the beginning of the impact to the moment of collapse (indicated by a dot) of the cavity between the bottom and the liquid column, $h = 13.3$ cm. Dash-dotted lines 1 correspond to the bottom, solid lines 2, dotted lines 3, and dashed lines 4 correspond to the models of hydrodynamics, linear acoustics, and incompressible liquid, respectively.

Fig. 5. Influence of the liquid column height on the water hammer pressure on the bottom p_{wh} resulted from the cavity collapse (curve 1) and on the moment of attaining the water hammer pressure t_{wh} (curve 2); these are the results by the linear acoustics model.

Fig. 6. The influence of the liquid pressure p_0 on the water hammer pressure on the bottom p_{wh} (curve 1) and on the moment of attaining the water hammer pressure t_{wh} (curve 2); these are the results by the linear acoustics model.

Fig. 7. The influence of the bottom acceleration, characterized by the parameter k , on the water hammer pressure on the bottom p_{wh} (curve 1) and on the moment of attaining the water hammer pressure t_{wh} (curve 2); these are the results by the linear acoustics model.

References

1. Cole R.H. *Underwater Explosions*. Princeton Univ. Press, 1948. 468 p.
2. Pernik A.D. *Problemy kavitasii* [Cavitation Problems]. Leningrad, Sudostroenie, 1966. 439 p. (In Russian)
3. Zamyslyayev B.V., Yakovlev Y.S. *Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve* [Dynamic Loads in Underwater Explosion]. Leningrad, Sudostroenie, 1967. 388 p. (In Russian)
4. Kedrinskiy V.K. *Gidrodinamika vzryva: eksperiment i modeli* [Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models]. Novosibirsk, Izd. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2000. 435 p. (In Russian)
5. Ganiev R.F., Lapchinsky G.F. *Problemy mekhaniki v kosmicheskoi tekhnologii* [Problems of Mechanics in Space Technology]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 250 p. (In Russian)
6. Pavlov A.A., Ilgamov M.A. Investigation of a shock wave in liquid. *Tr. Semin. Teor. Obolochek*, 1974, no. IV, pp. 181–195. (In Russian)
7. Pavlov A.A., Galiev Sh.U. Experimental investigation of the cavitation interaction of a compression wave with a plate in liquid. *Strength Mater.*, 1977, vol. 9, no. 8, pp. 988–993. doi: 10.1007/BF01528505.
8. Galiev Sh.U. *Dinamika gidrouprugoplasticheskikh system* [Dynamics of Hydro-Elastic Plastic Systems]. Kiev, Naukova Dumka, 1981. 276 p. (In Russian)
9. Aganin A.A., Ilgamov M.A., Kosolapova L.A., Malakhov V.G. Dynamics of a cavitation bubble near a solid wall. *Thermophys. Aeromech.*, 2016, vol. 23, no. 2. pp. 211–220. doi: 10.1134/S0869864316020074.
10. Aganin A.A., Guseva T.S., Kosolapova L.A., Khismatullina N.A. The calculation of weakly non-spherical cavitation bubble impact on a solid. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 158, art. 012003, pp. 1–6. doi: 10.1088 / 1757-899X/158/1/012003.

11. Aganin A.A., Guseva T.S., Kosolapova L.A. Impact of a cavitation bubble on a wall. *Russ. Aeronaut.*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 391–397. doi: 10.3103/S1068799817030102.
12. Daily D.J., Langley K.R., Thomson S.L., Truscott T.T. Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation. arXiv:1210.3764v2, 2013.
13. Daily D.J. Fluid-structure interactions with flexible and rigid bodies. *PhD Thesis*. Provo, Utah, USA, Brigham Young Univ., 2013. 155 p.
14. Daily J., Pendlebury J., Langley K., Hurd R., Thomson S., Truscott T. Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation. *Phys. Fluids*, 2014, vol. 26, no. 9, art. 091107, pp. 1–2. doi: 10.1063/1.4894073.
15. Bergant A., Simpson A.R., Tijsseling A.S. Water hammer A separation: A historical review. *J. Fluids Struct.*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 135–171. doi: 10.1016/j.jfluidstruct.2005.08.008.
16. Ganiev R.F., Il'gamov M.A. Liquid-column cavitation under motion of its lower boundary. *Dokl. Phys.*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 362–365. doi: 10.1134/S102833581809001X.
17. Ganiev R.F., Il'gamov M.A. The dynamics of a cavitation pocket and cavitation damage. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2019, vol. 48, no. 1, pp. 1–10. doi: 10.3103/S1052618819010084.
18. Harlow F.H., Amsden A.A. Fluid dynamics. *Monograph LA-4700*. Los Alamos, N. M., Los Alamos Natl. Lab. 1971. 122 p.
19. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki* [Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics]. Moscow, Nauka, 1976. 400 p. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Аганин А.А., Ильгамов М.А., Мустафин И.Н. Ударная кавитация жидкости в цилиндрической емкости // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 1. – С. 27–37. – doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37. ⟩

⟨ **For citation:** Aganin A.A., Il'gamov M.A., Mustafin I.N. Impact-induced cavitation in a cylindrical container with liquid. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2020, vol. 162, no. 1, pp. 27–37. doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37. (In Russian) ⟩