

УДК 621.7.044

В.К. Борисевич, П.И. Коваленко, А.В. Шкалова

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕНИЯ ДНА В ГИДРОВЗРЫВНЫХ УСТАНОВКАХ

В работе рассмотрено влияние свободной поверхности на поля давлений. Рассмотрена сила образования кавитационных разрывов и волны разгрузки, определенное давление на дно установки, созданный волной разжижения. Представлены графики давления в приповерхностном слое, в последнем кавитационном слое, графики давления и силы, действующих на дно оборудования.

давление, кавитация, ударная волна, амплитуда, отражение, нагрузка, разгрузка, установка

При подводном взрыве на относительно небольших глубинах погружения заряда существенное влияние на параметры гидродинамического поля оказывает свободная поверхность жидкости. Практически при взрыве технологических зарядов решение задачи возможно в акустическом (линейном) приближении.

В акустическом приближении, при котором волновое уравнение линейно, результирующее давление в любой точке жидкости, где проходят две волны давления от различных источников, является просто суммой давлений, создающихся каждым из возмущений [1]. Отклонения от линейности возрастают с увеличением амплитуды ударных волн и величины угла между фронтами волн, измеряемого половиной угла α между любым из фронтов и плоскостью симметрии. Для давлений меньших $700 \cdot 10^5$ Па и $\alpha < 45^\circ$ отклонения незначительны.

В технологических гидровзрывных установках типа бассейна это условие практически всегда выполняется, и условия линейности при сложении двух волн могут быть приняты без существенной погрешности.

ние, равное величине P_k : $P_{рез} = -(P_k + P_0)$, где $P_{рез}$ – результирующее избыточное давление, вызывающее кавитацию жидкости; P_0 – гидростатическое давление на заданной глубине h : $P_0 = P_{атм} + g \cdot \rho_0 \cdot h$.

Поскольку величина заглубления заряда в рассматриваемых установках незначительна, составляющей $g \cdot \rho_0 \cdot h$, представляющей собой вес столба воды над расчетной точкой, можно пренебречь, т.к. она более, чем на порядок меньше атмосферного давления и кавитационной прочности воды.

Рассматриваемая схема возникновения и развития кавитации при отражении ударной волны от свободной поверхности описывает явление лишь в самых общих чертах. В действительности кавитационный разрыв происходит не мгновенно и не по всей плоскости, а постепенно, в виде отдельных пузырьков.

Концентрация пузырьков максимальна в области расчетных глубин образования кавитационных разрывов. Эксперименты свидетельствуют, что кавитационные явления отсутствуют при давлениях на фронте волны $P_m < 2,5 \cdot 10^5$ Н/м². При $P_m > 5 \cdot 10^5$ Н/м² в воде возникает сплошной слой кавитационных пузырьков.

Такой модели мы будем придерживаться в своих рассуждениях. Первый кавитационный слой воды толщиной K_1 , двигаясь с определенной скоростью вверх, отделяется от основной массы жидкости, образуя область, в которой величина давления будет порядка давления насыщенного пара, т.е. будет близка к нулю. Таким образом, условие кавитации может быть изменено при расчете последующих кавитационных слоев, а новые свободные поверхности в расчетах будем принимать параллельными начальной поверхности отражения.

На рис. 2 изображена схема взаимодействия прямой и отраженной волн, а также образования волны разгрузки, действующей на дно.

Алгоритм этих взаимодействий следующий: от источника A волна давления приходит в точку O , расположенную на поверхности и имеющую координаты x_0 и y_0 , под углом γ_0 , при этом расстояние от заряда до точки O составляет r_{00} . Результирующее давление в точке O ($P_{рез}$), равное разнице прямой P_{00} и отраженной P_{Pm} волн равно нулю, так как эти давления равны.

$$r_{01} = \frac{h_1'}{\sin \gamma_1}, \quad \gamma_1 = \arctg \frac{h_1'}{x_1}; \quad h_1' = h_0' - \Delta y_1; \quad r_1 = r_{00} + \Delta r; \quad P_{рез1} = P_{01} - P_{m1};$$

$$P_{01} = P_{m01} \begin{cases} e^{-\frac{t_1 - \frac{r_{01}}{C_0}}{\theta_{01}}}, & t_1 - \frac{r_{01}}{C_0} < \theta_{01}; \\ \frac{0,368 \cdot \theta_{01}}{t_1 - \frac{r_{01}}{C_0}}, & t_1 - \frac{r_{01}}{C_0} > \theta_{01}; \end{cases} \quad P_{m01} = A \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{r_{01}} \right)^\alpha; \quad t_1 = \frac{r_1}{C_0};$$

$$\theta_{01} = \text{const} \cdot r_{01}^\beta; \quad \text{const} = B_1 \cdot 0,62^{1-\beta} \cdot G^{\frac{1-\beta}{3}} \cdot \rho_3^{\frac{1-\beta}{3}} C_0^{-1};$$

$$P_{m1} = P_{m00} \cdot \left(\frac{r_{00}}{r_1} \right)^\alpha; \quad P_{m00} = A \cdot \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{r_{00}} \right)^\alpha;$$

$P_{рез} \leq - (P_\kappa + P_0)$ – условие кавитации; P_0 – атмосферное давление; ρ_3 – удельный вес заряда; G – масса заряда; B_1, A, α, β – константы заряда; C_0 – скорость звука в жидкости.

Если условие возникновения кавитации в точке 1 не выполняется, расчет продолжаем далее до выполнения условия кавитации в точке n .

Для точки n :

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x_i; \quad \Delta x_i = \Delta r \cdot \cos \gamma_i; \quad y_n = y_{n-1} - \Delta y_i, \quad \Delta y_i = \Delta r \cdot \sin \gamma_i;$$

$$r_{0n} = \frac{h_n'}{\sin \gamma_n}; \quad \gamma_n = \arctg \frac{h_n'}{x_n}; \quad h_n' = h_{n-1}' - \Delta y_i; \quad r_n = r_{n-1} + \Delta r;$$

$$P_{резn} = P_{0n} - P_{m_n};$$

$$P_{0n} = P_{m_{0n}} \begin{cases} e^{-\frac{t_n - \frac{r_{0n}}{C_0}}{\theta_{0n}}}, & t_n - \frac{r_{0n}}{C_0} < \theta_{0n}; \\ \frac{0,368 \cdot \theta_{0n}}{t_n - \frac{r_{0n}}{C_0}}, & t_n - \frac{r_{0n}}{C_0} > \theta_{0n}; \end{cases} \quad P_{m_{0n}} = A \left(\frac{G^{\frac{1}{3}}}{r_{0n}} \right)^\alpha; \quad t_n = \frac{r_n}{C_0};$$

$$\theta_{0_n} = \text{const} r_{0_n}^\beta; P_{m_n} = P_{m_{n-1}} \cdot \left(\frac{r_{n-1}}{r_n} \right)^\alpha; P_{рез} \leq -(P_\kappa + P_0) - \text{условие кавитации.}$$

При выполнении условия кавитации, например в точке 1, образуется первый кавитационный слой толщиной $K_1 = \sum_{i=1}^n \Delta y_i$; при этом свободная

поверхность (плоскость отражения) опустится на величину $\sum_{i=1}^n \Delta y_i$, мни-

мый заряд переместится в точку A_1 , угол отражения станет равным γ_1 , максимальное давление в отраженной волне уменьшится на величину $P_{рез} = (P_\kappa + P_0)$ и будет равным $P_{m1,2} = P_{m1} - (P_\kappa + P_0)$. В следующем слое отраженная волна будет распространяться под углом γ_1 к точке 2, затухая. После образования первого слоя атмосферное давление P_0 упадет практически до нуля (до давления насыщенных паров) и условие возникновения кавитации в точке 2 будет выглядеть следующим образом $P_{рез} \leq -P_\kappa$.

Для точки 2:

$$x_2 = x_1 + \Delta x_2; \Delta x_2 = \Delta r \cdot \cos \gamma_1; y_2 = y_1 - \Delta y_2; \Delta y_2 = \Delta r \cdot \sin \gamma_1;$$

$$r_{02} = \frac{h_2'}{\sin \gamma_2}; \gamma_1 = \arctg \frac{h_1'}{x_1}; h_2' = h_1' - \Delta y_2; \gamma_2 = \arctg \frac{h_2'}{x_2}; r_2 = r_1 + \Delta r;$$

$$P_{рез} = P_{02} - P_{m2};$$

$$P_{02} = P_{m02} \begin{cases} e^{-\frac{r_{02}}{\theta_{02}}}, t_2 - \frac{r_{02}}{C_0} < \theta_{02}; \\ 0,368 \cdot \theta_{02} \frac{r_{02}}{t_2 - \frac{r_{02}}{C_0}}, t_2 - \frac{r_{02}}{C_0} > \theta_{02}; \end{cases} P_{m02} = A \left(\frac{1}{r_{02}} \frac{G^3}{G^3} \right)^\alpha; t_2 = \frac{r_2}{C_0};$$

$$\theta_{02} = \text{Const} \cdot r_{02}^\beta; P_{m2} = P_{m01} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^\alpha;$$

$P_{рез} \leq -P_\kappa$ - условие кавитации; $K_2 = K_1 + n \Delta y_2$ - толщина кавитационных слоев в точке 2.

В дальнейшем при распространении отраженной волны расчет в каж-

дом слое циклично повторяется.

После образования последнего n -го слоя условие кавитации уже не будет выполняться, и отраженная волна с остаточным давлением $P_{m_{n-1,n}}$ будет распространяться со скоростью звука в направлении дна под углом, создавая на дне давление P_{m_D} .

Для точки D :

$$X_D = X_n + \frac{y_n}{tg \gamma_n}; y_D = 0; r_D = r_{0n} + \frac{y_n}{\sin \gamma_n}; P_{m_D} = P_{m_{n-1,n}} \left(\frac{r_{0n}}{r_D} \right)^\alpha.$$

Результаты расчетов, выполненных по приведенному алгоритму, представлены на рис. 3. Вычисления были проведены для безграничной емкости для заряда из ТЭ-

На массой 1 г, помещенного на глубину 0,4 м и отстоящего от дна на расстояние 0,2 м для уровней кавитационной прочности воды 2,5; 5,0 и $10 \cdot 10^5$ Па. На рисунке графически изображен только последний слой кавитации для каждого уровня кавитации. Практически вся энергия отраженной волны давления тратится на развитие кавитации, то есть переходит в кинетическую энергию жидкости. После образования последнего слоя отраженная волна давления с амплитудой, равной остаточному давлению, движется в направлении дна под углом γ_n , значительно меньшим γ_0 , так как после образования каждого слоя траектория движения волны изменялась.

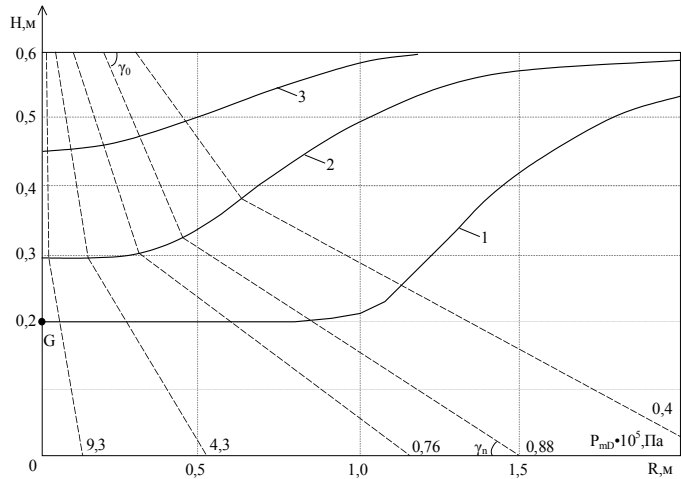


Рис. 3. Графики кавитационных разрывов и схема образования волны разгрузки при значениях кавитационной прочности жидкости P_K :

1 – $2,5 \cdot 10^5$ Па; 2 – $5 \cdot 10^5$ Па; 3 – $10 \cdot 10^5$ Па

Следовательно, совокупность рассмотренных факторов приводит к тому, что дна достигает значительно ослабленная волна разгрузки.

На рис. 3 над осью абсцисс обозначены значения нормальных давлений, достигающих дна при $P_k = 5 \cdot 10^5$. Видно также, как изменяется угол падения волны на дно по сравнению с начальным углом γ_0 отражения от свободной поверхности. Чем меньше кавитационная прочность, тем глубже зона кавитации и тем меньше амплитуда волны на дне и угол ее падения на дно.

Например, для $2,5 \cdot 10^5$ Па глубина кавитационной зоны почти достигает заряда. При этом волны будут распространяться практически параллельно поверхности дна. Максимальное давление в последнем кавитационном слое составляет величину порядка $2 \cdot 10^5$ Па, а на дне $1,5 \cdot 10^5$ Па при угле падения $\gamma_n \approx 0,1^0$. Поэтому сила разгрузки при таких параметрах кавитационной прочности практически отсутствует.

При увеличении кавитационной прочности сила разгрузки увеличивается и ее при определенных значениях P_k необходимо учитывать.

Для примера на рис. 4 – 6 приведены расчетные графики изменения по радиусу отрицательных давлений на поверхности, в последнем кавитационном слое, на дне, а также график силы в зависимости от времени для отраженной волны при кавитационной прочности $5 \cdot 10^5$ Па.

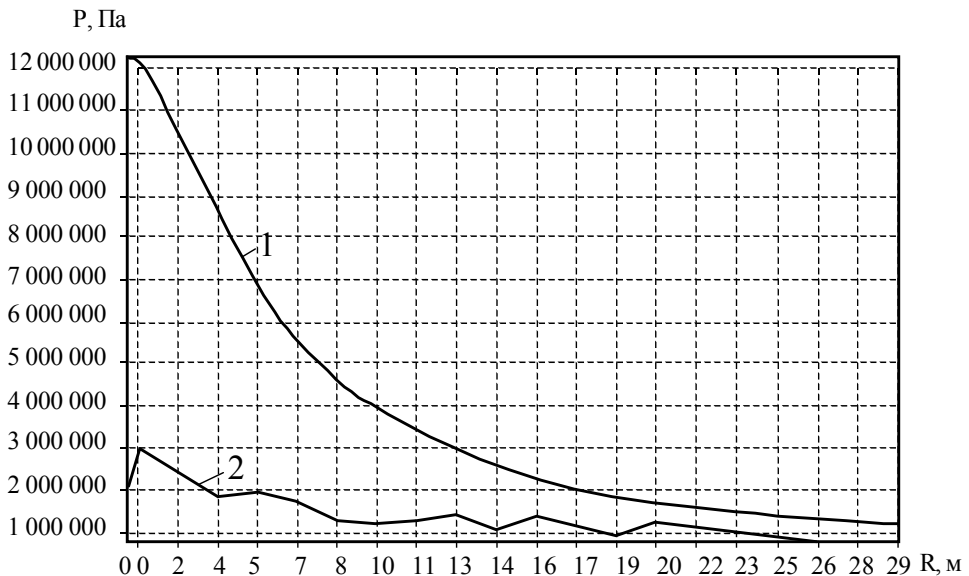


Рис. 4. Графики давления в приповерхностном слое (1)
и в последнем кавитационном слое (2)

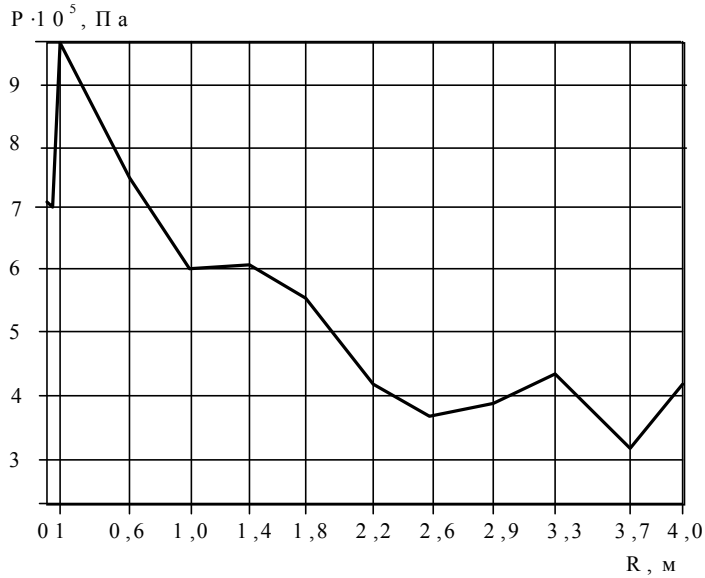


Рис. 5. График давления на дне

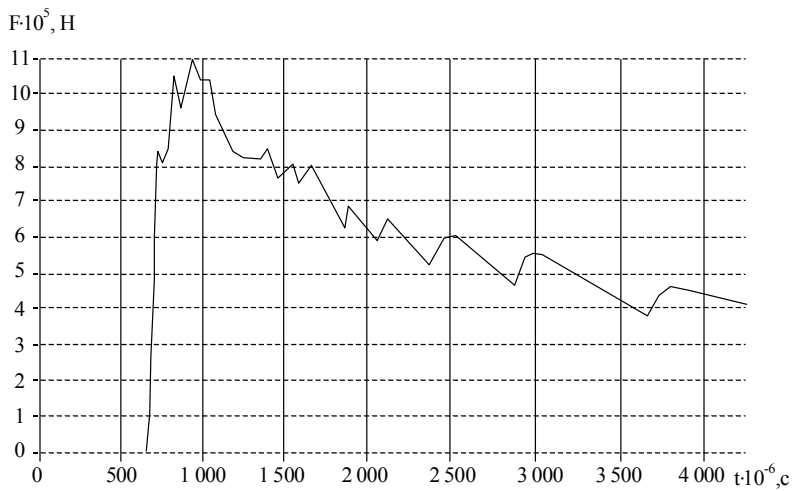


Рис. 6. График силы, вызванной волной разрежения на дне

Из рис. 7 видно, что кавитация распространяется на большую глубину. При общепринятых уровнях кавитации ($P_k = (2 \div 5) \cdot 10^5$ Па) и даже при минимальных зарядах она охватывает почти весь объем над зарядом на достаточно удаленном расстоянии.

С учетом отражений волны давления от подвижного дна и нежестких стенок область кавитации на определенное время может развиваться по всему

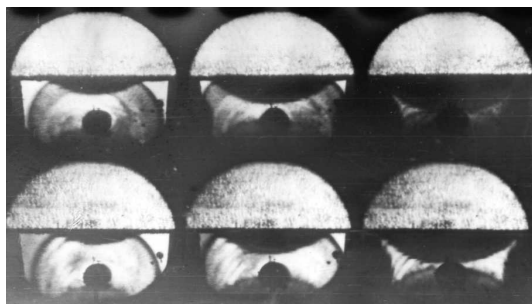


Рис. 7. Развитие кавитации в бассейне

объему емкости, образуя вместо сплошной жидкости двухфазную среду. Как показали исследования [3], скорость распространения возмущений в такой среде значительно снижается и может достигать несколько десятков метров в секунду. Например, при содержании в воде 4 % воздуха

скорость звука составляет 50 м/с при нормальном давлении. При пониженном давлении скорость звука смеси слабо зависит от ее газонасыщенности. Можно сделать вывод, что в условиях сплошной кавитации, когда существует отрицательное давление и газонасыщенность практически нулевая, скорость звука будет находиться на минимальном уровне и зависеть от размера и количества кавитационных пузырьков.

По предположению на основании графических зависимостей [4] скорость распространения звука в кавитирующей жидкости может быть принята близкой к 100 м/с. Тогда волна разгрузки, образованная движением кавитационных слоев в сторону свободной поверхности, достигнет дна, ввиду малой скорости распространения со значительной задержкой. Эта волна будет иметь амплитуду, определяемую разрывной прочностью жидкости, и длительность, зависящую от скорости движения кавитирующей жидкости. Экспериментально доказано, что длительность отрицательного импульса давления значительна и измеряется десятками миллисекунд. Действие такого импульса вызывает перемещение установки в сторону свободной поверхности и создает проблемы ее фиксации.

В сравнительно кратковременных технологических процессах, осуществляемых ударной волной, учитывая большую задержку во времени и малую амплитуду рассматриваемого импульса разгрузки, его участие в нагружении заготовки может быть мало.

Таким образом, влияние свободной поверхности сказывается в образовании волн разгрузки, созданных отраженной ударной волной и движени-

ем кавитирующей жидкости в сторону свободной поверхности. Первая волна достигает дна ослабленной из-за действия кавитации. Вторая волна достигает дна со значительной задержкой и может не оказывать практического влияния на технологический процесс. Ее амплитуда определяется разрывной прочностью жидкости. Импульс силы, созданный этой волной, может вызвать существенное перемещение незакрепленной установки в сторону свободной поверхности.

Заключение

Таким образом, в статье впервые рассмотрен вопрос влияния свободной поверхности при взрыве заряда БВВ в воде и возникающих при этом кавитационных явлений на поле давления на дне емкости в установке для объемной штамповки. Это дало возможность получить зависимости в значительной мере уточняющие не только величины нагрузки на дно, но и силовые параметры, действующие на деформируемую заготовку. Полученные зависимости, в последующем вводимые в программу расчета, позволяют определить распределение давления по площади дна в любой момент времени.

Но все же, необходимо в последующем скорректировать эти зависимости, так как в связи со сложностью процессов, которые происходят в воде при взрыве, еще достаточно трудно определить необходимые для упрощенного расчета силу и импульс, действующие на дно установки, где требуется операция интегрирования.

Литература

1. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Изд-во иностр. лит., 1950. – 495 с.
2. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. – Л.: Судостроение, 1969. – 322 с.
3. Подводные и подземные взрывы / Под ред. В.В. Николаевского. – М.: Мир, 1974. – 413 с.
4. Галиев Ш.У. Динамика гидроупругопластичных систем. – К.: Наук. думка, 1981. – 275 с.

Поступила в редакцию 4.04.2005