



ЭВОЛЮЦИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В КОЛЬЦЕВОМ ПУЗЫРЬКОВОМ СЛОЕ

И. К. Гималтдинов, А. Р. Баязитова

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак

Аннотация. Рассмотрена эволюция детонационной волны в кольцевом пузырьковом слое, расположенном в трубе. Показана возможность существования детонационной волны, распространяющейся с неизменной скоростью и амплитудой.

Ключевые слова: ударная волна, волновой импульс, пузырьковая жидкость, двумерные эффекты, детонационная волна

Пусть в трубе, заполненной жидкостью, находится кольцевой пузырьковый слой, ограниченный цилиндрическими поверхностями, образующие которых параллельны оси z (см. Рис. 1(a)). Причем газ внутри пузырьков взрывчатый (например, смесь $C_2H_5+2,5O_2$). В момент времени $t = 0$ на торец трубы $z = z_0$ начинает воздействовать жесткий ударник ($v_z = v_z(t, r)$ при $z = z_0$). Требуется описать волновое движение при $t \geq 0$.

Для описания этого движения запишем систему макроскопических уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках при условии цилиндрической симметрии [1]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{v_r}{r} + \rho_i \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (i = l, g),$$

$$\frac{dn}{dt} + n \frac{v_r}{r} + n \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\rho \frac{dv_r}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial r} = 0, \quad \rho \frac{dv_z}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial z} = 0,$$

$$w = \frac{da}{dt}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

$$\alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3, \quad \rho = \rho_g + \rho_l,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q,$$

где a — радиус пузырьков; γ — показатель адиабаты для газа; p_i — давления фаз; ρ_i — истинные плотности фаз; α_i — объемные содержания фаз; n — число пузырьков в единице объема; w — радиальная скорость пузырьков; q — интенсивность межфазного теплообмена. Скорости v_z и v_r соответствуют движению по координатам z и r . Нижними индексами $i = l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

Радиальное движение описывается следующими уравнениями

$$w = w_R + w_A, \quad a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где C_l — скорость звука в жидкости; ν_l — кинематическая вязкость жидкости.

Будем полагать, что жидкость является акустически сжимаемой, а газ калорически совершенным

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 R T_g,$$

где R — газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем индексами 0 внизу снабжены параметры, относящиеся к начальному невозмущенному состоянию.

Тепловой поток q задается приближенным конечным соотношением

$$q = \text{Nu} \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \text{Nu} = \sqrt{\text{Pe}}, \quad \text{Pe} \geq 100, \quad \text{Nu} = 10, \quad \text{Pe} < 100,$$

$$\text{Pe} = 12 (\gamma - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a |w|}{k_g}, \quad k_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

где $T_0 = \text{const}$ — температура жидкости; λ_g — теплопроводность; Nu — число Нуссельта; Pe — число Пекле; $\kappa_g = \lambda_g / \rho_g c_l$ — коэффициент температуропроводности.

Под воздействием ударника в трубе с кольцевым расположением пузырьков образуется волна, при распространении которой пузырьки сжимаются, и если температура газа внутри них достигает критического значения T_* , газ взрывается, увеличивается температура в газе, вследствие этого давление в газе и в жидкости повышается. Это повышение давления в жидкости «сжимает» пузырьки, находящиеся перед образовавшейся волной, и тем самым может реализоваться самоподдерживающийся детонационный процесс и образоваться детонационная волна. Если же амплитуда исходной волны достаточно мала, и температура газа в пузырьках не

достигает значения температуры воспламенения, то реализуется обычная для газожидкостных сред волновая картина.

Воспламенение пузырьков учитывается по мгновенной схеме, согласно которой при достижении температуры газа в пузырьках некоторого значения T_* (температуры воспламенения), температура в них мгновенно увеличивается на величину ΔT , соответствующей теплотворной способности горючей газовой смеси в пузырьках. Тогда параметры зоны, где происходят химические реакции, меняются скачком.

Методика численного расчета вышеприведенной системы уравнений показана в [1].

Рассмотрим динамику импульсного давления в трубе с кольцевым расположением взрывчатых пузырьков, образованного ударом жесткого поршня на торец трубы. Начальные и граничные условия при этом имеют вид:

$$\text{при } t = 0: \quad a_0 = 1.5 \text{ мм}, \quad \alpha_{g0} = \begin{cases} 10^{-2}, & r > R_p, \\ 0, & r \leq R_p; \end{cases}$$

$$\text{при } z = 0: \quad v_z(t, r) = \begin{cases} \Delta v \exp\left(-\left(\frac{t - t_*/2}{t_*}\right)^2\right), & t \leq t_*, \\ 0, & t > t_*, \end{cases}$$

где $\Delta v = 10.5$ м/с — амплитуда первоначального сигнала; $t_* = 0.1$ мс — характерная протяженность импульса.

На Рис. 1 (б-г) представлены распределения давления в момент времени 0.85 мс. Фрагменты (б), (в) и (г) отличаются различной толщиной пузырькового кольца, так для фрагмента (б) его величина составляет $\Delta R = 0.07$ м, для фрагмента (в) — $\Delta R = 0.05$ м, для (г) — $\Delta R = 0.03$ м. Жидкость — смесь глицерина с водой, газ — ацетиленокислородная смесь ($C_2H_2 + 2.5O_2$). Расчеты проводились при следующих теплофизических параметрах: $p_0 = 0.1$ МПа, $a_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $T_0 = 293$ К, $T_* = 1000$ К, $\Delta T = 3000$ К, $\rho_{l0}^0 = 1115$ кг/м³, $\nu_l = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho_{g0}^0 = 1.3$ кг/м³, $\gamma = 1.35$, $c_g = 1.14 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda_g = 2.51 \cdot 10^{-2}$ м·кг/(К·с), $C_l = 1700$ м/с. Видно, что под воздействием жесткого поршня по торцу трубы в пузырьковой жидкости возникает детонационная волна, которая распространяется, не меняя своей амплитуды и скорости. Отметим, что амплитуда и скорость детонационной волны определяются только параметрами пузырьковой жидкости и не зависят от характеристик первоначального воздействия жестким поршнем. Из Рис. 1 также видно, что детонационная волна, распространяющаяся в кольцевом объеме с амплитудой около 8–9 МПа, генерирует в области «чистой» жидкости ($0 \leq r \leq R_p$) волны, которые, двигаясь со скоростью 1700 м/с, обгоняют детонационную волну. Необходимо отметить, что для волн, распространяющихся по «чистой» жидкости граница $r = R_p$ из-за «акустической мягкости» пузырьковой среды является аналогом свободной поверхности. Сравнительный анализ фрагментов (б),

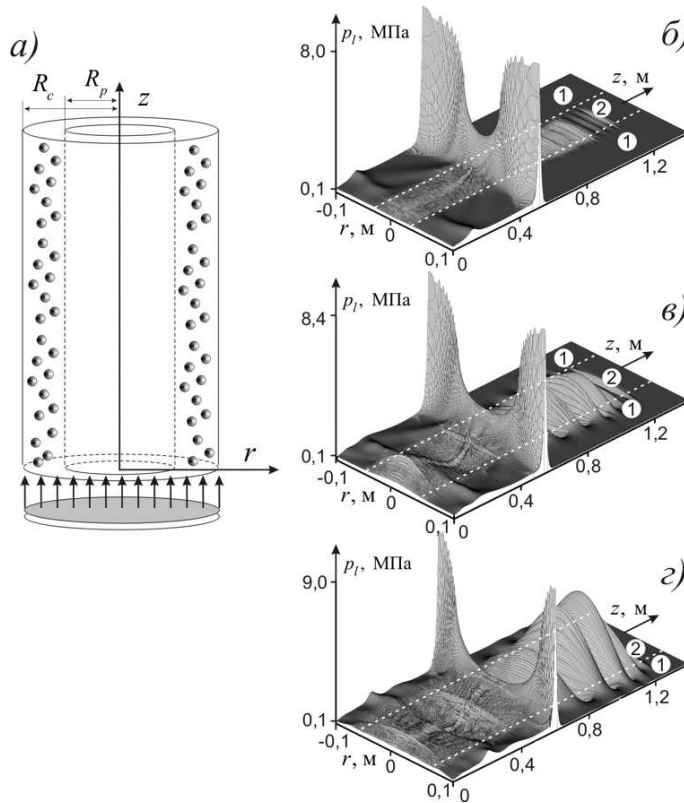


Рис. 1. Динамика детонационной волны в кольцевом пузырьковом объеме, расположенном в трубе радиуса $R_c = 0.1$ м. а) Схема задачи. R_c — радиус трубы, R_p и $\Delta R = R_c - R_p$ — радиус и толщина пузырькового кольцевого слоя. б) Эпюры волн давления. Цифрами 1 и 2 отмечены области пузырьковой и «чистой» жидкости.

(в), и (г) показывает, что чем меньше ширина пузырькового слоя, тем больше амплитуда давления в волновом пакете, распространяющемся по «чистой» жидкости. Так, например, при толщине $\Delta R = 0.07$ м (фрагмент (б)) амплитуда детонационной волны $\Delta p_l \approx 8$ МПа, а при толщине $\Delta R = 0.03$ м (фрагмент (г)) амплитуда детонационной волны $\Delta p_l \approx 9$ МПа, хотя с увеличением толщины кольцевого слоя увеличивается энергоемкость системы и как следствие должна увеличиваться амплитуда детонационной волны.

Увеличение амплитуды детонационной волны с уменьшением толщины пузырькового слоя связано с тем, что волны, которые генерируются в «чистой» жидкости детонационной волной в случае малой толщины пузырькового слоя могут поджечь этот слой и распространяться вдоль твердой стенки ($r = R_c$), а в случае когда толщина такая, что волны, распростра-

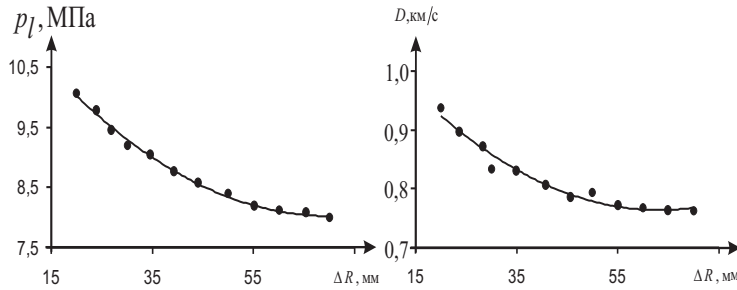


Рис. 2. Зависимость амплитуды давления и скорости детонационной волны от ширины пузырьковой зоны. Параметры системы такие же, как на Рис. 1

няющиеся по «чистой» жидкости, затухают в пузырьковом кольце, тогда эффект поджатия пузырькового слоя практически не проявляется.

На Рис. 2 представлена зависимость амплитуды давления и скорости детонационной волны от ширины пузырьковой зоны ΔR при радиусе трубы $R_c = 0.1$ м. Увеличение ширины кольцевого слоя приводит к уменьшению как амплитуды давления, так и скорости волны детонации. Это связано с тем, что волны, которые генерируются в «чистой» жидкости детонационной волной в случае малой толщины пузырькового слоя могут поджечь этот слой и распространяться вдоль твердой стенки ($r = R_p$), а в случае, когда толщина пузырькового слоя велика, они «съедаются» на границе $r = R_p$, аналогичной свободной поверхности, и эффект поджатия пузырькового слоя практически не проявляется.

На Рис. 2 представлена зависимость амплитуды давления и скорости детонационной волны от ширины пузырьковой зоны ΔR при радиусе трубы $R_c = 0.1$ м. Видно, что увеличение ширины кольцевого слоя приводит к уменьшению как амплитуды давления, так и скорости волны детонации. Например, при толщине пузырьковой зоны $\Delta R = 0.02$ м скорость детонационной волны равна 940 м/с, а амплитуда достигает значения 10 МПа, а при скорости уменьшается до 750 м/с, а амплитуда — до 8 МПа.

На Рис. 3 представлены эпюры волн давления в случае, когда кольцевой пузырьковый слой находится в большом объеме жидкости, то есть в этом случае на границе расчетной области принимаются неотражающие условия [2]. Фрагменты (а) и (б) на Рис. 3 соответствуют моментам 0.5 мс и 1.0 мс. Видно, что и в этом случае формируется детонационная волна, распространяющаяся по кольцевому слою, которая генерирует в области «чистой» жидкости фоновую волну, имеющую скорость, большую скорости детонации. Кроме того, необходимо отметить, что из-за дополнительного сжатия фоновой волной, распространяющейся в «чистой» жидкости

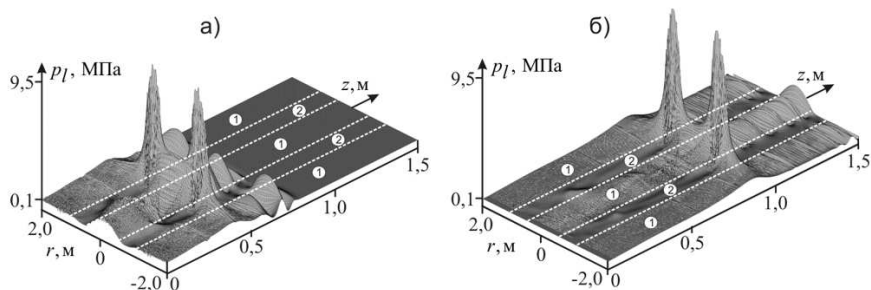


Рис. 3. Динамика детонационных волн в кольцевом пузырьковом слое, расположенном в большом объеме жидкости при толщине пузырькового слоя 0.05 м. Остальные параметры и обозначения такие же, как на Рис. 1

вне кольца амплитуда детонационной волны больше, чем в случае, приведенном на Рис. 1, хотя все остальные параметры системы одинаковы.

Таким образом, установлено, что в кольцевом слое пузырьковой жидкости со взрывчатым газом внутри пузырьков может формироваться и распространяться детонационная волна, амплитуда и скорость которой с уменьшением толщины пузырькового кольца увеличиваются из-за поджатия фоновой волной, распространяющейся по «чистой» жидкости.

Список литературы

- [1] Баязитова А. Р., Гималтдинов И. К., Шагапов В. Ш. Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднородным распределением по сечению // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 3. С. 65–76.
- [2] Нигматулин Р. И., Шагапов В. Ш., Гималтдинов И. К., Баязитова А. Р. Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 4. С. 478–481.