

УДК 532.593+532.528

ФОКУСИРОВКА ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОНКОМ КАВИТИРУЮЩЕМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

Е. С. Журавлева, В. К. Кедринский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: skwore@yandex.ru, kedr@hydro.nsc.ru

Предложен новый метод фокусировки волны разрежения в одномерной осесимметричной постановке. Метод основан на генерации ударной волны, инициированной движением поршня, соосного оси симметрии, с заданным профилем импульса при значениях максимальных скоростей $20 \div 100$ м/с и постоянной спада экспоненты до 10 мкс. Установлено, что при отражении ударной волны от свободной границы генерируется волна разрежения, распространяющаяся к оси симметрии с увеличивающейся амплитудой, при этом за фронтом волны зарождается и развивается зона кавитации.

Ключевые слова: ударная волна, волна разрежения, фокусировка, кавитационный процесс.

DOI: 10.15372/PMTF20180605

Введение. Исследование кавитации в волнах разгрузки имеет длительную историю. В частности, изучалось отражение ударной волны (УВ) от свободной поверхности при мощных подводных взрывах [1] с выбросом на поверхность белой пены [2]. Вопрос о структуре выбросов на протяжении длительного времени оставался нерешенным: не было ясно, являются они отколами, аналогичными отколам в твердых телах при отражении УВ или облаку капель; не был понятен механизм разрушения большого объема жидкости однократным коротким импульсом волны разрежения (ВР). Результаты экспериментальных и численных исследований показывают, что это кавитирующие отколы, распадающиеся на систему капель.

Теоретические исследования проводились с использованием математической модели двухфазной гидродинамики, независимо предложенной С. В. Йорданским, С. М. Когарко и Л. ван Вингаарденом в 1960–1964 гг. для изучения ударно-волновых нагрузок в многофазных средах и кавитационной эрозии. Модель двухфазной однородной гидродинамики для средних давления, плотности и массовой скорости впервые применена в работе [1] для исследования формирования и структуры ВР, процесса развития кавитации за ее фронтом при подводных взрывах, при этом учитывались экспериментальные данные о малых значениях плотности и размерах ядер кавитации. Впервые получены данные о динамике структуры зон кавитации, а также о параметрах ВР в процессе развития кавитации и проведено их сравнение с аналогичными параметрами для чистой жидкости.

В настоящей работе исследуется структура течения в условиях кумуляции ВР с учетом влияния кавитации на ее параметры.

Постановка задачи и результаты. Задача о формировании УВ, ВР, развитии кавитации при импульсном нагружении слоя жидкости со свободной границей рассматривается в осесимметричной постановке. УВ инициируется движением поршня, соосного оси симметрии и задающего импульс массовой скорости в виде экспоненты при значениях максимальной скорости $20 \div 100$ м/с и с постоянной спада до 10 мкс. Радиус слоя жидкости достигает 9 см. Численный анализ формирования УВ выполнялся для однофазной и двухфазной (дистиллированной воды с микропузырьками свободного газа) жидкостей с использованием модели Иорданского — Когарко — ван Вингаардена.

Согласно экспериментальным данным о замыкании образующейся полости (квазипустого разрыва), покрытой тонкой пленкой микропузырьков свободного газа [3], схлопывание сферического сегмента (рис. 1) приводит к формированию квазицилиндрической симметрии (см. рис. 1, *з, д*). О появлении квазицилиндрического слоя свидетельствуют результаты экспериментальных исследований схлопывания полости. Установлено, что нижняя поверхность полости-разрыва отрывается от мембраны, формируя кольцевой поток жидкости, скользящий вдоль мембраны к оси симметрии с большей скоростью.

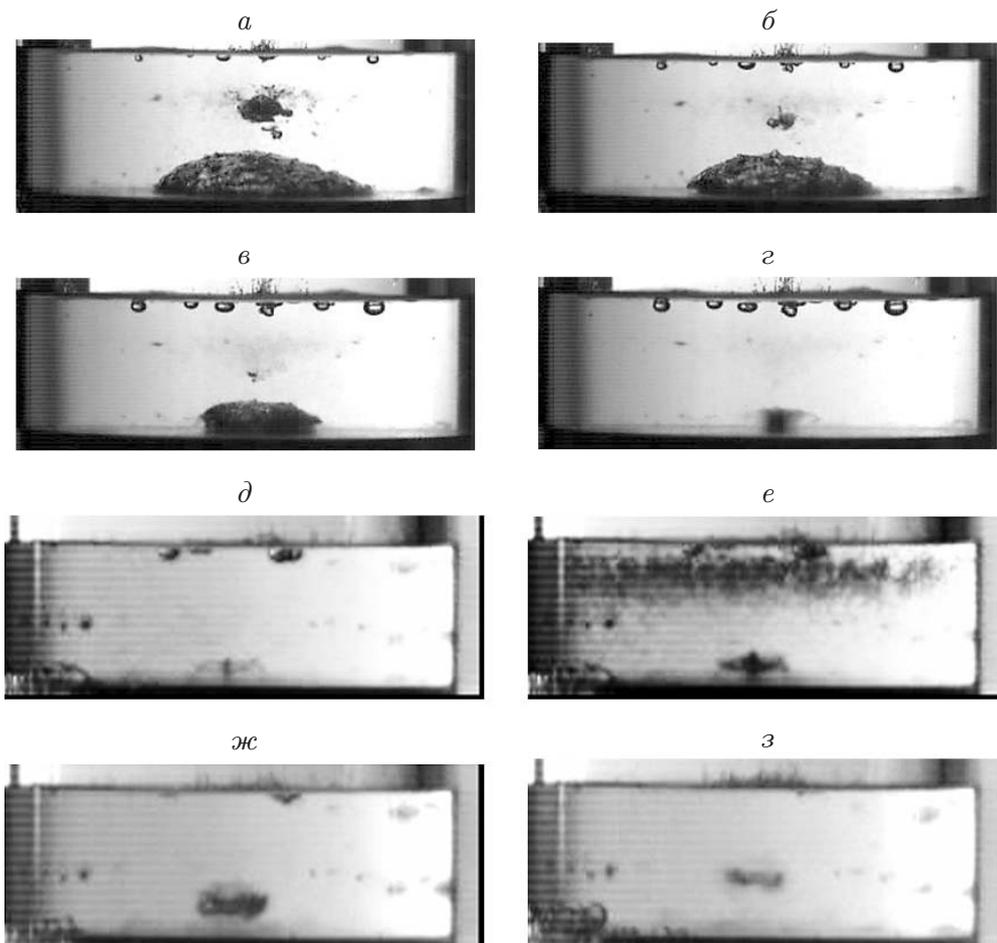


Рис. 1. Развитие зоны кавитации вблизи свободной поверхности при диаметре мембраны $d = 12,5$ см, высоте слоя $H = 3$ см и накопленной в батарее конденсаторов энергии $E = 0,8$ кДж в различные моменты времени:
a — $t = 0,60$ мс, *б* — $t = 0,76$ мс, *в* — $t = 0,96$ мс, *г* — $t = 1,06$ мс, *д* — $t = 1,08$ мс, *е* — $t = 1,10$ мс, *ж* — $t = 1,30$ мс, *з* — $t = 1,70$ мс

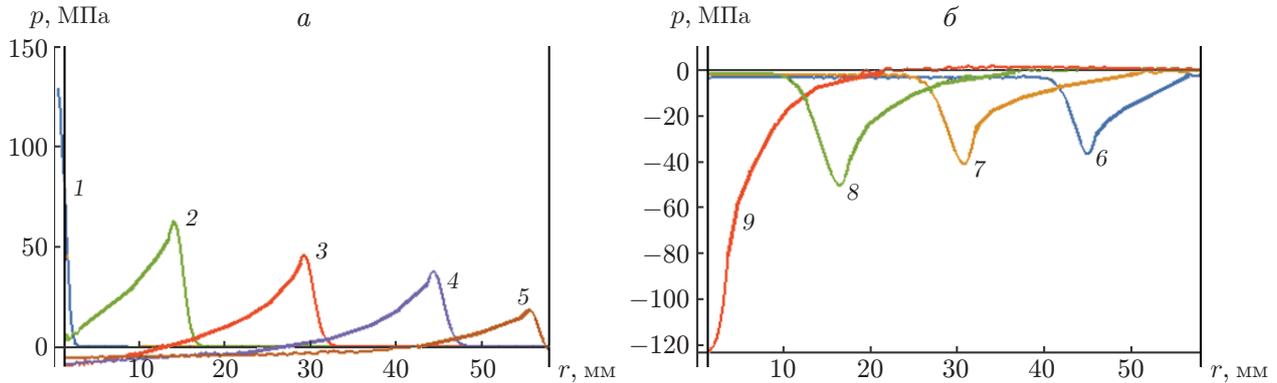


Рис. 2. Динамика УВ (а) и ВР (б) в чистой жидкости в различные моменты времени:

1 — $t = 1$ мкс, 2 — $t = 10$ мкс, 3 — $t = 20$ мкс, 4 — $t = 30$ мкс, 5 — $t = 40$ мкс, 6 — $t = 50$ мкс, 7 — $t = 60$ мкс, 8 — $t = 70$ мкс, 9 — $t = 80$ мкс

При схлопывании квазицилиндрического разрыва генерируется квазиодномерная цилиндрическая УВ и формируется цилиндрическое полое вихревое кольцо из кластера микропузырьков, окружающих полость в момент схлопывания. На рис. 1, е показан момент, когда регистрировалась темная кавитационная зона, вытянутая вдоль свободной поверхности вследствие отражения УВ, возникшей в процессе схлопывания разрыва. На рис. 1, ж, з показано формирование и всплытие кольца.

Закон затухания УВ в чистой жидкости дает оценку $r^{-0,72}$, соответствующую известным асимптотикам Л. Д. Ландау и С. А. Христиановича. Закон увеличения максимальной амплитуды ВР при ее кумуляции в чистой жидкости является практически зеркальным отражением закона затухания УВ (рис. 2).

Развитие кавитации. Развитие кавитации и структура ВР исследовались с использованием модели Иорданского — Когарко — ван Вингаардена двухфазной среды. Модель включает уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса, уравнение состояния пузырьковой среды, уравнение состояния жидкого компонента и динамики относительной объемной концентрации газовой фазы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} U = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p = 0,$$

$$\rho = \rho_l(1 - k k_0), \quad \frac{p + B}{p_0 + B} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_0}\right)^n, \quad \frac{d^2 k}{dt^2} = 3k^{1/3} \frac{p_0 k^{-\gamma} - p}{\rho_0 R_0^2} + \frac{1}{6k} \left(\frac{dk}{dt}\right)^2.$$

Расчет кавитационного процесса проводился с момента отражения падающей УВ от свободной границы цилиндрического слоя. На рис. 3 показано развитие зоны кавитации для ядер кавитации с начальными радиусом $R_0 = 1,5$ мкм, объемной концентрацией $k_0 = 10^{-5}$, плотностью 10^6 см $^{-3}$, радиусом слоя (координатой свободной границы) 6 см, максимальной скоростью поршня 100 м/с и постоянной экспоненты 10 мкс. Следует отметить, что в хвостовой части генерируемой поршнем УВ возникает зона растягивающих напряжений — отрицательных давлений. Этим объясняется некоторый скачок кавитации (см. рис. 3, 4) во всей зоне от поверхности поршня до свободной поверхности в момент времени, соответствующий началу расчета. Динамика структуры ВР и развитие кавитации за ее фронтом исследовались с момента начала отражения УВ от свободной поверхности ($t = 40$ мкс) до момента касания фронтом ВР поверхности поршня ($t = 80$ мкс).

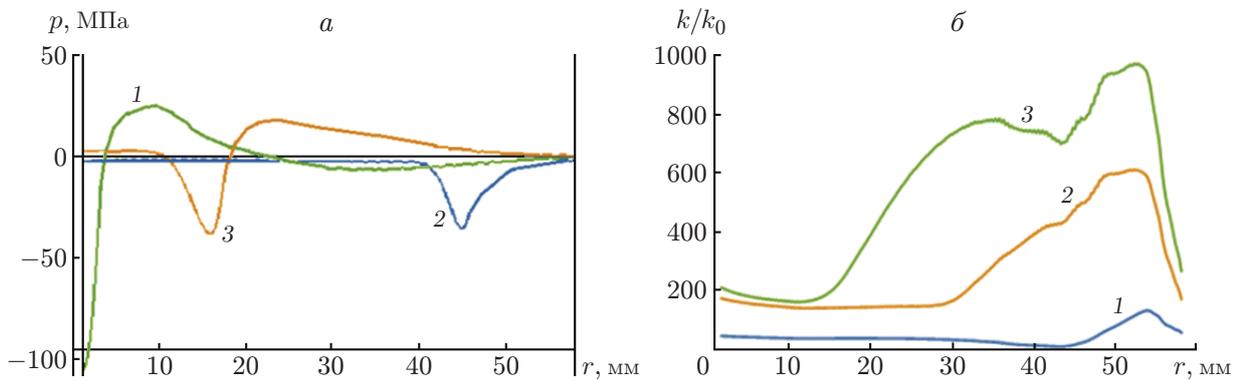


Рис. 3. Распределения давления (а) и относительной объемной концентрации за фронтом волны разрежения (б) при $R_0 = 1,5$ мкм, $k_0 = 10^{-5}$ и различных значениях времени:
 1 — $t = 50$ мкс, 2 — $t = 70$ мкс, 3 — $t = 80$ мкс

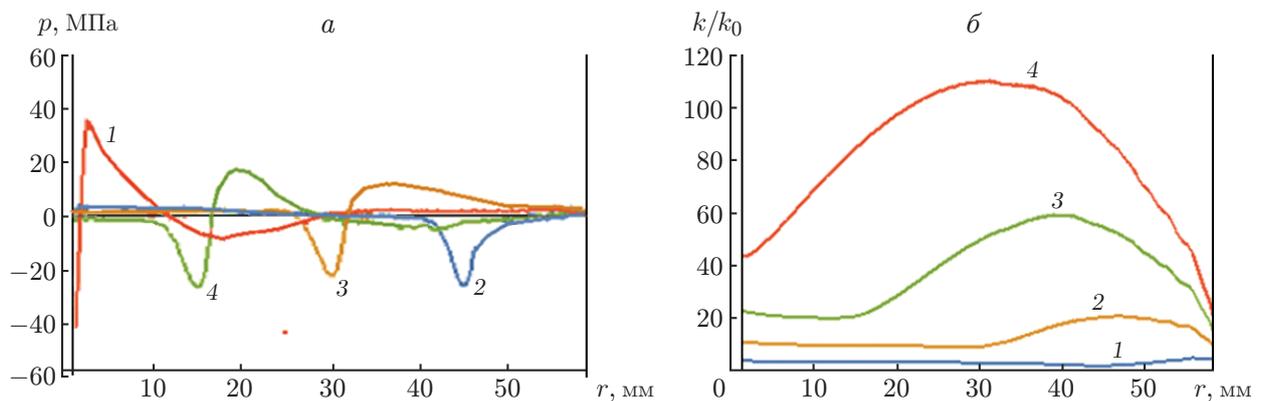


Рис. 4. Распределения давления (а) и относительной объемной концентрации за фронтом волны разрежения (б) при $R_0 = 4,64$ мкм, $k_0 = 10^{-3}$ и различных значениях времени:
 1 — $t = 50$ мкс, 2 — $t = 60$ мкс, 3 — $t = 70$ мкс, 4 — $t = 80$ мкс

На рис. 4 показано развитие зоны кавитации для случая, когда начальный радиус ядер кавитации и начальная объемная концентрация увеличены до значений $R_0 = 4,64$ мкм, $k_0 = 10^{-3}$ соответственно (значения остальных параметров остались прежними).

В случае $R_0 = 1,5$ мкм на заключительном этапе ($t = 80$ мкс) значение максимальной объемной концентрации достигает 1 %. Увеличение начального радиуса ядра приблизительно в три раза ($R_0 = 4,64$ мкм) приводит к увеличению начального значения k_0 на два порядка ($k_0 = 10^{-3}$) при сохранении плотности ядер кавитации, при этом значение максимальной концентрации в момент $t = 80$ мкс увеличилось на порядок и достигло 10 %.

Результаты расчетов показывают, что начальная объемная концентрация газа (см. рис. 3, 4) оказывает значительное влияние на параметры ВР в окрестности поршня. ВР, вызывающая интенсивное развитие кавитации, трансформируется, при этом в обоих рассмотренных случаях возникает положительная фаза давления и наблюдается значительное уменьшение максимальной амплитуды ВР в момент времени $t = 80$ мкс: при $k_0 = 10^{-5}$ амплитуда ВР приблизительно равна 100 МПа, при $k_0 = 10^{-3}$ — 40 МПа. Длительность отрицательной фазы давления также уменьшается.

Заключение. В работе предложен и реализован новый метод кумуляции ВР в осесимметричной постановке, исследовано формирование этой волны в однофазной жидкости и микропузырьковой среде, развитие за ее фронтом интенсивного кавитационного процесса. Расчет развития зоны кавитации проводился с использованием модели Иорданского — Когарко — ван Вингаардена. Установлено, что при развитии кавитации в структуре ВР формируется фаза положительного давления и объемная концентрация газовой фазы оказывает существенное влияние на максимальную амплитуду и длительность ВР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кедринский В. К.** Динамика зоны кавитации при подводном взрыве вблизи свободной поверхности // ПМТФ. 1975. № 5. С. 68–78.
2. **Коул Р.** Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
3. **Большакова Е. С., Кедринский В. К.** Динамика разрыва в кавитирующем слое жидкости при ударно-волновом нагружении // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 5. С. 93–101.

Поступила в редакцию 12/XI 2018 г.
