

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЫВА В КАВИТИРУЮЩЕМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. С. Большакова^{1,2}, В. К. Кедринский¹

*Институт гидродинамики¹ имени Лаврентьева СО РАН
Новосибирский Государственный Университет²
630090, Новосибирск, Россия.*

Известно, что взрывные извержения ряда открытых вулканических систем характеризуются дискретным характером выбросов (вулкан Эребус). Согласно геофизическим данным начальное состояние магмы в канале вулкана – это расплав, насыщенный газом под высоким давлением. Падение давления приводит к нарушению термодинамического равновесия, развитию кавитационных процессов, которые могут сопровождаться появлением разрывов в потоке кавитирующей магмы. В работе Х. М. Гонерман и М. Манги (2003) [1] было высказано предположение, что образование таких разрывов не обязательно приводит к взрывному извержению. Естественно, эта проблема привлекает большое внимание, требует специальных постановок и исследований. Важную роль в этих исследованиях играет экспериментальное моделирование динамики состояния кавитирующего потока в лабораторном масштабе на гидродинамических ударных трубах.

Существует ряд методик моделирования в лабораторных условиях мощных ударно-волновых нагрузок. К ним относятся гидродинамические ударные трубы (ГУТ), отличающиеся методами генерации [2-4], в том числе и электромагнитные ударные трубы, которые были применены в данной работе для исследования динамики состояния слоя жидкости при ударно-волновом нагружении. Эксперименты показали, что ударная волна, генерируемая в слое жидкости мембраной под действием импульсного магнитного поля, возбуждает в слое развитие интенсивных кавитационных процессов. В этой постановке импульсное движение мембраны приводит к образованию разрыва, динамика и структура которого может рассматриваться как качественная модель упомянутого выше процесса.

Цель данной работы - экспериментальный анализ формирования и динамики разрыва в слое кавитирующей жидкости при его ударно-волновом нагружении, исследование структуры поверхностного слоя разрыва и его роли в структуре потока при замыкании разрыва, построение физико-математической модели динамики его основных параметров.

В работе использовались электромагнитные гидродинамические ударные трубки (ЭМ ГУТ) с максимальными энергиями накопителя до 100 Дж и до 5 кДж, что дало возможность сравнивать различные масштабные факторы процесса. Сравнение структуры разрывов и их динамики позволило установить практическое подобие развивающихся течений для масштабов нагружения в диапазоне $50 \div 1250$ Дж.

При экспериментальном исследовании динамики разрыва обнаружен новый гидродинамический эффект – замыкание разрыва в кавитирующей жидкости сопровождается образованием пузырькового кластера (рис.1, 5.4 мс). При этом, и в процессе развития разрыва, и при его замыкании в кавитирующем слое граница раздела «разрыв – окружающая жидкость» представляет собой пузырьковый слой (рис. 2). Состояние его в момент замыкания разрыва характеризуется как состояние пузырькового кластера с высокой внутренней энергией, на что указывает генерация кластером УВ в начальной стадии его расширения и формирование вторичной кавитационной зоны (рис. 1, 5.5 мс) при отражении УВ от свободной поверхности слоя.

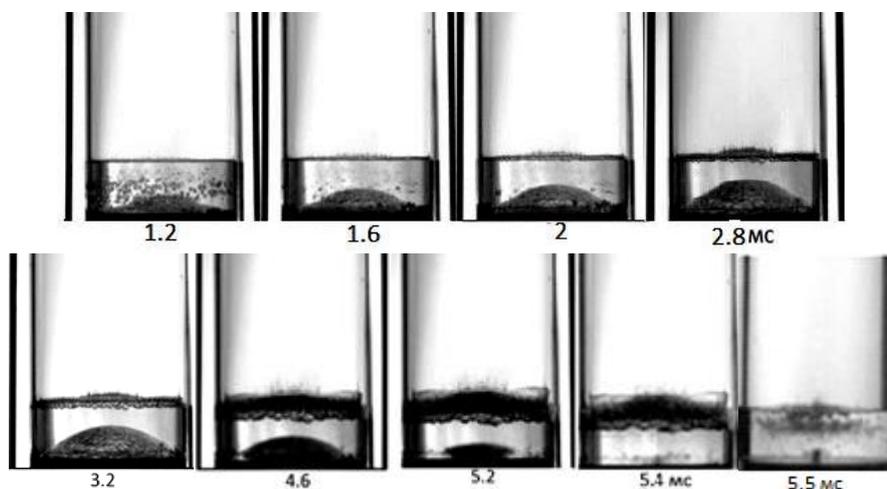


Рис. 1. Формирование и замыкание разрыва, образование кластера кавитационных пузырьков (точка в центре мембраны) - кадр 5.4 мс. Диаметр кюветы 12.5 см, высота водяного слоя 4 см, энергия нагружения 800 Дж.



Рис. 2. Промежуточный кадр состояния разрыва на стадии его сжатия, $t = 770$ мкс, диаметр кюветы 4 см, высота водяного столба 1.5 см, время экспозиции 1 мкс, энергия нагружения 50 Дж.

Анализ экспериментальных данных показывает, что разрыв с его сложной структурой сохраняет форму сегмента сферы в течении практически всего периода формирования и схлопывания (рис. 1, 1.2 – 5.2 мс). Этот вывод позволяет оценить объем разрыва и, следовательно, его потенциальную энергию Q . На основании этого результата получена оценка доли α энергии E в накопительной батарее ($Q = \alpha E$), затрачиваемая на формирование разрыва. В рамках теории размерности на основе комбинации определяющих параметров получена формула характерного периода T существования разрыва

$$T = \alpha^{1/3} E^{1/3} \rho^{1/2} / p_0^{5/6}, \quad (1)$$

где ρ – плотность окружающей жидкости, p_0 – гидростатическое давление. На основании анализа экспериментальных данных основных характеристик формы разрыва - диаметра d и высоты h (рис. 3 а, б, точки) построены аппроксимации их динамики в следующем виде (рис.3, а, б, сплошные линии):

$$d(t) = 3.45 + 6.71t - 1.3t^2, \quad h(t) = 1.98t - 0.36t^2, \quad (2)$$

Введение безразмерной переменной $\tau = t/T$, используя формулу (1), приводят уравнения (2) к виду:

$$d(\tau) = 3.45 + 36.2\tau - 37.9\tau^2, \quad h(\tau) = 10.7\tau - 10.5\tau^2,$$

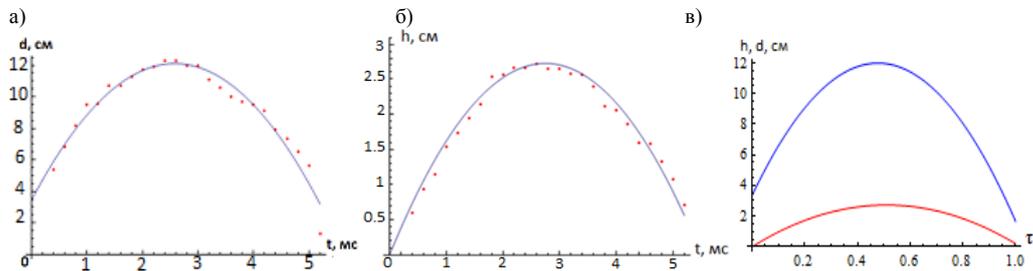


Рис. 3. (а) – ширина $d(t)$ и (б) – высота $h(t)$ разрыва при $E=0.8$ кДж. (в) $d(t)$ – синий, $h(t)$ – красный

где $d(t)$ и $h(t)$ в см. В заключение отметим, что экспериментальный анализ динамики квази-пустой полости (разрыва) в кавитирующем слое обнаруживает эффекты, отличные от классических: замыкание на твердой стенке происходит без образования кумулятивной струи, на поверхности с динамически развивающимся слоем кавитационных пузырьков не наблюдается развития неустойчивости Релея-Тейлора, поток замыкается на их кластер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gonnermann H. M., Manga M.** Explosive volcanism may not be an inevitable consequence of magma fragmentation // *Nature*. – 2003. – V. 426. P. 432–435
2. **Glass I. I., Heuckroth L. E.** Hydrodynamic shock tube // *Phys. Fluids*. – 1963. – V. 6, N 4. P. 543–549.
3. **Воротникова М. И., Кедринский В. К., Солоухин Р. И.** Ударная трубка для исследования одномерных волн в жидкости // *Физика горения и взрыва*. – 1965. – № 1. С. 5–15.
4. **Бесов А. С., Кедринский В. К., Пальчиков Е. И.** Изучение начальной стадии кавитации с помощью дифракционной оптической методики // *Письма в ЖТФ*. – 1984. – Т. 10, № 4. С. 67–71
5. **Kedrinskiy V.K., Bol'shakova E.S.** Empty cavity in a cavitating liquid: feature of flow structure // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2015.-Vol. 138, No. 3, Pt.2 of 2, September 2015. P.1829