

КУМУЛЯТИВНЫЕ СТРУИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ УДАРОМ ПОЛОСТЕЙ В ТОНКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТЕЙ

В. Е. Боболев, А. В. Дубовик

(Москва)

При помощи высокоскоростной киносъемки исследуется динамика схлопывания при ударе воздушных полостей в тонких слоях различных жидкостей. Обнаружено, что в процессе схлопывания круговая форма поверхности полостей произвольно нарушается и возникают высокоскоростные кумулятивные струи. Измерены параметры струй в зависимости от начальных условий опытов.

Знание закономерностей протекания физических процессов, сопровождающих схлопывание полостей в тонких слоях жидкостей при ударных воздействиях, весьма важно для правильного понимания причин различных явлений, возникающих при этом. Отмечены, например, явления эрозийного разрушения твердых поверхностей, между которыми помещался слой жидкости, когда поверхности последовательно удалялись одна от другой и затем быстро сближались [1]. В схожих условиях эксперимента в момент раздвигания поверхностей в слое ранее однородной жидкости удалось наблюдать путем непосредственного фотографирования возникновение кавитационных полостей, которые резко схлопывались при сближении поверхностей [2]. В настоящее время в качестве одной из причин разрушительного действия кавитации называют взаимодействие с твердой поверхностью высокоскоростных кумулятивных струй жидкости, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков [3,4]. Возникновение кумулятивных струй при ударном схлопывании полостей в тонких слоях жидких взрывчатых веществ недавно продемонстрировал Боуден [5].

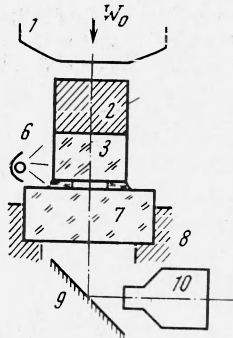
Несмотря на известные успехи в экспериментальном исследовании процесса несимметричного схлопывания пузырьков в жидкостях, в литературе, насколько известно авторам, отсутствуют систематизированные сведения о параметрах взаимодействия кумулятивных струй, образующихся при захлопывании, с твердыми поверхностями, помещенными в жидкость, в зависимости от изменения различных внешних факторов. Располагая подобными сведениями хотя бы для весьма простого случая схлопывания полостей в тонких слоях жидкостей при ударе, можно оценить вклад указанного взаимодействия в динамику протекания различных явлений, следующих за ним.

В данной работе с помощью высокоскоростной киносъемки исследовалось схлопывание наполненных воздухом полостей в тонких (толщиной $h_0 = 0.2 - 1.0$ мм) слоях жидкостей, которые помещались между соударяющимися плоскими поверхностями двух цилиндрических роликов (фиг. 1). Ролики устанавливались на одной оси вертикально один над другим.

Нижний ролик 7 диаметром 30 и толщиной 25 мм изготавливался из оптического стекла К-8, верхний ролик 3 имел диаметр 2R-19 и высоту 20 мм и изготавливался из плексигласа. Их торцы полировались. Ось роликов проходила через центр полости 5, имевшей форму круга $\varnothing = 2r_0$ 5 или 10 мм. Высота полости соответствовала толщине слоя жидкости 4. Давление воздуха в полости равнялось атмосферному. В качестве исследуемых жидкостей брались водный раствор глицерина ВГ 7/93 (вес в процентах) $\rho_0 = 1.24$ г/см³ и $\mu = 3$ пз и нитроглицерин $\rho_0 = 1.6$ г/см³ и $\mu = 0.3$ пз.

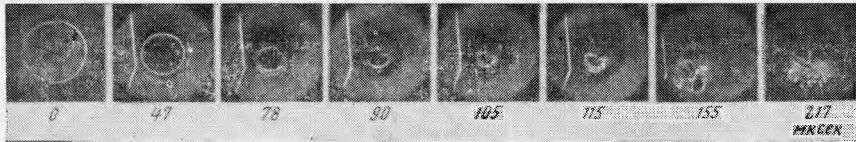
На верхний ролик дополнительно устанавливался стальной ролик 2 тех же размеров, по которому и производился удар падающим грузом 1 весом 5 кг. Высота сбрасывания груза $H = 5 - 80$ см, так что начальные скорости удара W_0 изменялись от 1 до 4 м/сек. Во всех экспериментах характерные времена ударов груза по слою жидкости $\tau = h_0 / w_0$ заметно превышали времена схлопывания полостей соответствующих размеров. Фотографирование процесса схлопывания полостей при ударе осуществлялось высокоскоростной камерой ЖЛВ-2 10. Подсветка процесса производилась импульсной лампой-вспышкой ИФК-120, устанавливаемой сбоку роликов 6.

На фиг. 2 приведена серия кинокадров, демонстрирующая процесс захлопывания воздушной полости $\phi = 10$ мм в слое раствора глицерина в воде ВГ 7/93 толщиной 0.5 мм под действием удара груза, сброшенного с высоты 20 см (начальная скорость удара 2 м/сек). Цифры под кадрами обозначают время в мсек, отсчитываемое с момента начала схлопывания полости. Как видно из приведенной фотографии, в процессе схлопывания полости наступил момент, когда круговая форма поверхности полости произвольно нарушилась и стала неустойчивой, при этом отдельные участки поверхности приобрели скорость движения, более высокую относительно других участков.



Фиг. 1

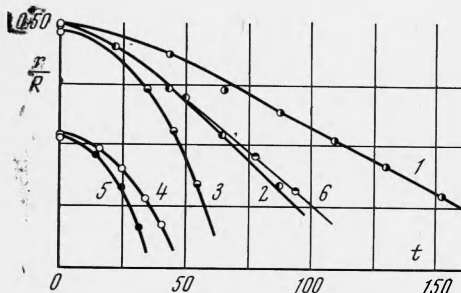
Результатом указанного неустановившегося процесса явилось возникновение кумулятивной струи жидкости, которая спустя некоторое время со скоростью 70 м/сек столкнулась с противоположной стороной поверхности полости. На заключительных кадрах фиг. 2 видно, что после удара струи полость раздробилась на множество мелких пузырьков, которые с течением времени постепенно снеслись потоком растекающейся жидкости к периферии роликов.



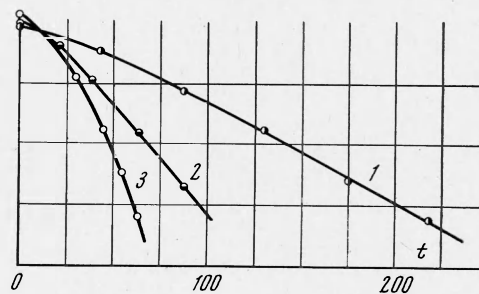
Фиг. 2

Рассмотренная фотография демонстрирует типичную картину схлопывания полости в условиях постановки данных экспериментов. Изложенный выше материал можно дополнить лишь некоторыми фактами. Нередко, особенно при малых скоростях удара, можно наблюдать почти одновременно возникновение не одной, а сразу двух и иногда трех кумулятивных струй.

В процессе движения струи, как правило, взаимодействовали между собой, усиливая или, наоборот, ослабляя эффект своего воздействия на стенки полости. В частности, в результате столкновения двух струй, двигающихся под прямым углом или от противоположных стенок полости навстречу одна другой, происходило разрушение струй с последующим диспергированием на множество мельчайших капелек. Если воздействие кумулятивной струи на стенки схлопывающейся полости оказывалось недостаточно эффективным, чтобы, например, раздробить полость, то сжимавшийся в полости воздух оказывал значительное влияние на дальнейший ход процесса схлопывания. В некоторых экспериментах, особенно с полостями малого диаметра, удалось наблюдать явление пульсирования полости — сжатие последней до весьма малых размеров (радиус полости уменьшался более чем в 10 раз), последующее расширение за счет энергии сжатого в полости воздуха и, наконец, повторное схлопывание полости.



Фиг. 3



Фиг. 4

В результате экспериментов на фиг. 3 и 4 приведена зависимость уменьшения относительного радиуса полости r/R от времени t (мксек), отсчитываемого с момента начала схлопывания полости ($R = 9,5$ мм — радиус верхнего ролика). Данные на фиг. 3 относятся к полостям начального диаметра ~ 10 мм в различных по толщине слоях нитроглицерина: кривые 1, 2, 3 соответствуют слоям толщиной 1,0, 0,5 и 0,25 мм. Скорость падения груза в момент удара составляла 2 м/сек ($H = 20$ см). На этой же фиг. 3 для сравнения приведены также зависимости изменения во времени радиуса полости с начальным диаметром ~ 5 мм и толщиной 0,5 мм (кривая 4) и 0,25 мм (кривая 5) в нитроглицерине и полости диаметром 10 мм и толщиной 0,5 мм в водном растворе глицерина (кривая 6) при той же начальной скорости удара груза. Каждая из представленных кривых получена усреднением результатов 5—10 параллельных опытов. На фиг. 4 приведены зависимости r/R от t (мксек) для полостей диаметром 10 мм в слое нитроглицерина толщиной 0,5 мм; кривые 1, 2, 3 соответствуют трем скоростям удара груза: 1, 2 и 3 м/сек.

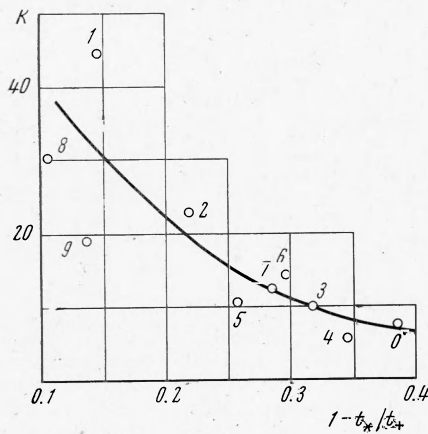
Располагая результатами, представленными на фиг. 3 и 4, можно приблизительно оценить характерные времена схлопывания полостей t_+ путем экстраполяции кривых

r/R до пересечения с осью времени t и средние величины скоростей движения границ полостей $u = dr/dt$ на стадии заключительного этапа их схлопывания, когда появлялись исчезающие со временем деформации поверхностей полостей и возникали кумулятивные струи. Последняя оценка производилась графическим дифференцированием соответствующих зависимостей r/R по t .

Результаты указанного анализа, приведенные в таблице, показывают, что время схлопывания полостей фиксированного диаметра при заданной начальной скорости удара возрастает с увеличением толщины слоя жидкости и убывает с увеличением скорости удара при заданной начальной толщине слоя. С возрастанием величины характерного времени удара по слою жидкости $\tau = h_0/w_0$ время схлопывания полостей также возрастает. Соответственно, обратные соотношения выполняются для величины u . Как видно из таблицы, в условиях данных опытов на времени схлопывания полостей мало сказался выбор жидкостей с заметным (на порядок величины) различием в значениях коэффициентов вязкости.

Опыт	ВГ 7/93 (вес. %)	Нитроглицерин								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
w_0 , м/сек	2	1	2	2	2	3	3	4	2	2
h_0 , мм	0.5	0.5	1.0	0.5	0.25	0.5	1.0	1.0	0.5	0.25
r_0/R	0.485	0.49	0.49	0.49	0.48	0.51	0.49	0.51	0.27	1.27
u , м/сек	40	20	25	45	100	90	40	60	85	120
t_* , мксек	130	265	205	120	70	75	135	95	50	40
h_0/h_*	1.47	1.82	1.47	1.49	1.67	1.50	1.4	1.38	1.21	1.48
r/r_*	2.31	4.92	3.92	2.59	1.85	2.62	3.15	2.98	4.98	3.57
v , м/сек	80	25	40	100	180	150	75	150	150	300
P , кбар	1.75	0.75	1.15	2.65	5.2	4.5	2.0	3.8	4.35	8.3

Чтобы составить представление о размерах полостей в момент схлопывания t_* , когда круговая форма их поверхностей становилась неустойчивой, в таблице приведены значения величин r_0/r_* и h_0/h_* , характеризующих соответственно сокращения начальных радиусов r_0 полостей и их высот. Значения h_0/h_* найдены расчетом из соотношения $h_*/h_0 = 1 - t_*/\tau$, которое



Фиг. 5

получено из условия неизменности скорости груза w_0 во время схлопывания полостей. Последнее может считаться достаточно оправданным ввиду того, что масса ударяющего груза в условиях опытов на несколько порядков величин превышала массы слоев жидкостей. Как видно из таблицы, для всех исследованных полостей величины h_0/h_* изменяются относительно мало (1.47 ± 0.16). Напротив, (r_0/r_*) зависят от начальных условий опытов; в известном смысле величинами (r_0/r_*) можно характеризовать в данном случае меру устойчивости формы поверхности схлопывающихся полостей. На фиг. 5 приведена зависимость предельной степени сжатия полостей $K = (r_0/r_*)^2 h_0/h_*$, начиная с которой нарушалась круговая симметрия схлопывания, от величины $1 - t_*/t_*$. Цифры на фиг. 5 соответствуют нумерации опытов, указанных в таблице.

Были проведены также измерения скоростей движения кумулятивных струй, возникающих при схлопывании полостей. Следует отметить, что скорость движения струи в отдельных опытах не была по величине и направлению строго постоянной, поэтому эти измерения проводились с недостаточной степенью точности.

Подобный факт недавно был отмечен С. П. Козыревым [6] при исследовании схлопывания кавитационных каверн, создаваемых электроразрядом в объеме жидкости. Результаты измерений усредненных по нескольким опытам значений скоростей струй V для соответствующих начальных размеров полостей и скоростей удара груза приведены в таблице.

Важно для различных практических целей располагать данными о параметрах механического воздействия кумулятивных струй на стенки схлопывающихся полостей, а также на окружающие твердые поверхности, ограничивающие объем жидкости. Были проведены приближенные оценки величин динамических давлений, возникающих при взаимодействии струй со стенками полостей, на основании известных величин скоростей струй v , скоростей движения границ полостей u , плотности ρ_0 и ударной адиабаты исследуемой жидкости. Последняя бралась в форме, предложенной в [7], так что в окончательной редакции формула для расчета давлений при ударе струй имела вид

$$p = 0.5 \rho_0 (u + v) [1.2 c_0 + 0.85 (u + v)]$$

где c_0 — скорость звука в жидкости, которая рассчитывалась по правилу Рао для органических жидкостей (см. [7]). Для нитроглицерина $c_0 = 1750$ м/сек и для раствора глицерина в воде ВГ 7/93 $c_0 = 1900$ м/сек. Результаты расчетов величин P представлены в таблице.

Анализ данных, собранных в таблице, показывает, что в условиях проведенных опытов наблюдается закономерность в возрастании скоростей кумулятивных струй при схлопывании полостей и давлений в жидкости при их взаимодействии со стенками полостей по мере уменьшения толщины слоя жидкости и возрастания скорости падения груза на жидкость. Указанные параметры струй также возрастают с уменьшением начального диаметра полостей. Заметим, что оценку величины динамических давлений в твердых поверхностях, соприкасающихся с жидкостью, нетрудно произвести, зная ударную адиабату материала поверхностей.

Проведенные исследования позволяют установить, что ударное схлопывание полостей в тонких слоях жидкостей, осуществляемое сравнительно слабыми механическими воздействиями (скорости удара 1—4 м/сек), сопровождается возникновением кумулятивных струй жидкости, движущихся с относительно высокими скоростями (~100 м/сек).

Взаимодействие струй со стенками схлопывающихся полостей приводит к генерированию сравнительно высоких динамических давлений (порядка нескольких кбар), превышающих пределы прочности многих твердых материалов. Следует отметить, однако, что время существования в жидкости столь высоких давлений относительно невелико, по порядку величины оно составляет $t^{\circ} \sim h / c$, где h — толщина слоя жидкости и c — скорость звука в ударно-сжатой жидкости. Для $h \approx 0.2$ —1.0 мм и $c = 2000$ м/сек $t^{\circ} \sim 0.1$ —0.5 мксек. По прошествии указанного промежутка времени давления при ударе струи быстро затухают до величины порядка нескольких сотен атмосфер, рассчитываемых по известному соотношению для несжимаемой жидкости

$$p_0 = 0.5 \rho_0 (u + v)^2$$

Тем не менее если процессы схлопывания полостей происходят в рабочей системе, которая допускает их многократное повторение, то воздействие струй по твердым поверхностям, по-видимому, сможет в конечном итоге привести к их разрушению.

Заметим, что в ходе экспериментов со взрывчатой жидкостью при некоторых условиях наблюдались взрывные явления, возникающие после соударения струй со стенками полостей.

Поступила 8 X 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. П е р н и к А. Д. Проблемы кавитации. Л., «Судостроение», 1966.
2. Н а у с D. F., F e i t e n J. B. Cavities between moving parallel plates. In: «Cavitation in real liquids». Amsterdam, Elsevier, 1964.
3. К о р н ф е л ь д М. И. Упругость и прочность жидкостей. М.— Л., Гостехиздат, 1951.
4. В e n j a m i n T. B., E l l i s A. T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries. Philos. Trans. Roy Soc., Ser. A, 1966, vol. 260, No. 1110.
5. B o w d e n F. P. The formation of microjets in liquids under the influence of impact or shock. Philos. Trans. Roy. Soc., Ser. A, 1966, vol. 260, No. 1110.
6. К о з ь р е в С. П. О захлопывании кавитационных камерн, образованных электрическим разрядом в жидкости. Докл. АН СССР, 1968, т. 183, № 3.
7. В о с к о б о й н и к о в И. М., А ф а н а с е н к о в А. Н., Б о г о м о л о в В. М. Обобщенная ударная адиабата органических жидкостей Физика горения и взрыва, 1967, № 4.