

О ДИНАМИКЕ РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В. М. Бойко, А. Н. Папырин, С. В. Поплавский

(Новосибирск)

Динамика взаимодействия ударной волны (УВ) с пленкой жидкости, нанесенной на жесткую стенку, во многом определяет механизм образования двухфазной смеси при гетерогенной (газ — пленка) детонации [1—5]. Необходимо отметить, что к настоящему времени взаимодействие проходящей УВ с пленкой жидкости изучено мало и, в частности, экспериментальному исследованию этого вопроса посвящены лишь отдельные работы [1—4]. В [1—3] методом высокоскоростной съемки с длительностью экспозиции кадров ~ 3 мкс исследована только начальная стадия процесса при $t < 100$ мкс (диапазон чисел Маха $M = 1,5 \div 4,4$). В [4] представлены некоторые результаты исследования смесеобразования и в более поздней стадии ($t \leq 600$ мкс, $M = 1,4 \div 2,0$), однако использование методики покадровой съемки с временем экспозиции ≥ 1 мкс ограничивало возможность данных экспериментов с точки зрения детального изучения динамики взаимодействия.

В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментального исследования разрушения пленок различных жидкостей за проходящей УВ в диапазоне $M = 2,0 \div 3,0$ и начальном давлении газа $p = 0,1$ МПа, полученные методом многокадровой лазерной визуализации, обеспечивающим наблюдение за динамикой развития всего процесса с разрешением во времени ~ 30 нс.

1. Опыты проводили в ударной трубе прямоугольного сечения 38×56 мм с длиной камеры низкого давления 4,5 м [6]. Длительность постоянных параметров газового потока за фронтом УВ ~ 700 мкс. Слой жидкости (вода, спирт, масло ВМ-4, глицерин) помещали на поверхности полированной пластины либо в кювете сечением 20×200 мм и глубиной $h = 2$ мм. За динамикой пленки жидкости наблюдали с помощью быстродействующей схемы многокадровой лазерной визуализации. При этом длительность экспозиции (~ 30 нс), число кадров и интервалы времени между ними Δt задавались лазерным стробоскопическим источником света [7], а пространственное разделение кадров проводилось высокоскоростной камерой ЖФР-3. Размер кадров 24×10 мм, пространственное разрешение ~ 50 мкм. В каждом опыте получали серию из 15—20 кадров, отражающих изменения, происходящие с пленкой жидкости за время $t \approx 600 \div 800$ мкс от начала взаимодействия с УВ.

На рис. 1 показана выборка из серии теневых фотографий, иллюстрирующих динамику поведения пленки масла ВМ-4 с $h \approx 1,5$ мм за УВ с $M = 2,7$ (кадры 1, 2, 6, 7, 11, 12, $\Delta t = 40$ мкс). Исходный уровень границы раздела фаз отмечен светлой линией. Увеличение оптической системы (1:3) и интервалы времени между кадрами подбирались таким образом, чтобы расстояние, проходимое ударной волной за время между двумя последовательными экспозициями, не превышало размер кадра (см. рис. 1, 1, 2). Это позволяло непрерывно наблюдать за динамикой слоя жидкости.

В начальной стадии взаимодействия при $M > 2,1$ наблюдалась «полосатая» структура возмущений [1], формирующаяся в потоке газа за фронтом волны и характерная для сверхзвукового обтекания шероховатых поверхностей. Во всех опытах, где жидкость заливалась в кювету, возмущения в газе возникали сразу же за фронтом, а в опытах со слоем жидкости, нанесенной непосредственно на поверхность стенки (без кюветы), — на некотором расстоянии l . Например, для масла ВМ-4 при $M = 2,7$ $l = 15$ мм, что хорошо согласуется с данными [1].

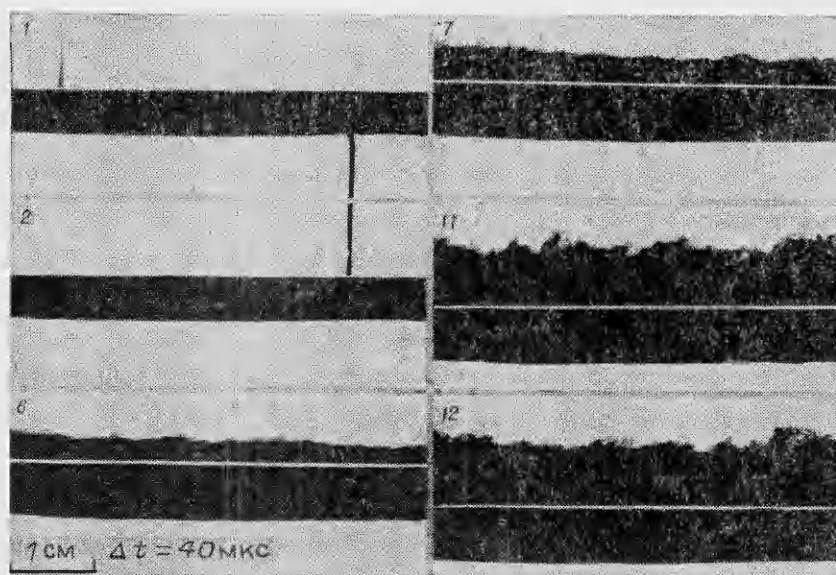


Рис. 1.

Появление «полосатых» структур связано, по-видимому, с генерацией волнообразных возмущений на границе раздела фаз. Последние хорошо видны на рис. 2, полученном в опыте со слоем глицерина, находящимся на поверхности стенки ($M = 2,1$). Как следует из этой фотографии, уже в начальной стадии взаимодействия происходит трансформация волновых возмущений на поверхности жидкости, приводящая к увеличению их амплитуды, а также длины волны λ . По мере роста возмущения приобретают характерный вид «шквальных» (опрокидывающихся) волн с ясно выраженной асимметрией профиля.

Под воздействием скользящего потока газа происходит непрерывное увеличение видимой толщины слоя жидкости (см. рис. 1). При этом в течение всего процесса на поверхности жидкости отчетливо видны «шквальные» волны, с гребней которых срываются микрочастицы. По перемещению отдельных характерных гребней можно оценить их скорость в разные моменты времени. Так, из рис. 1, 11, 12 следует, что при $t > 400$ мкс скорость перемещения возмущений на поверхности жидкости ~ 600 м/с, что практически соответствует расчетной скорости газового потока за фронтом волны: $u = 660$ м/с.

Сорванные микрочастицы сносятся потоком газа и заполняют ложбины между гребнями. При этом высота их подъема над начальным уровнем жидкости практически равна амплитуде возмущений. Начало срыва микрочастиц можно определить по моменту, когда теряются четкие очертания границы раздела фаз. В серии опытов, когда наблюдение велось в области, отстоящей на 120–150 мм вниз по потоку от наветренной границы слоя жидкости, выступающего над поверхностью стенки (уступа), возмущения, вносимые им, достигали этой области через $t \approx 150$ мкс при числе Маха $M = 2,7$ и не оказывали влияния на начальную стадию процесса. При этом времена индукции срыва микрочастиц для воды, спирта, глицерина и масла ВМ-4 составили $t_i \approx 50 \div 60$ мкс при $M = 2,7$ и $\sim 100\text{--}120$ мкс при $M = 2,1$.

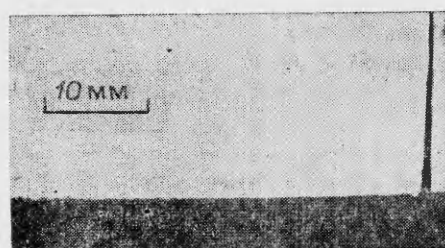


Рис. 2.



Рис. 3.

Многочисленные опыты, проведенные с различными жидкостями, показали, что вдали от уступа картина возмущения не зависит от ее физических свойств, способа размещения на поверхности стенки и интенсивности УВ.

Характер взаимодействия с уступом существенно зависит от свойств жидкости и во многом похож на характер взаимодействия УВ с каплей. Для воды (рис. 3) наблюдается быстрый рост его высоты до $\sim 7h$. При этом он приобретает крутую форму и его лобовая поверхность покрывается волнами неустойчивости Тейлора. Крутая часть уступа перемещается в направлении потока по плавно нарастающему слою жидкости и одновременно разрушается за счет срыва с его вершины микрочастиц и крупных капель. В конечном счете крутая часть уступа разрушается. Вблизи уступа в случае водяной пленки $t_i \approx 16$ и 24 мкс при $M = 2,7$ и $2,1$ соответственно, что сравнимо со значениями t_i для капли и существенно меньше, чем вдали от уступа. У глицерина в процессе взаимодействия высота уступа растет до $1,5-2h$, а толщина слоя на границе нарастает плавно. Срыв микрочастиц начинается с поверхности уступа через $t_i \approx 100$ мкс при $M = 2,4$.

Рассмотрим более подробно изменение толщины слоя двухфазной смеси во времени $y(t)$ в области, отстоящей от уступа на $120-150$ мм. На рис. 4 приведены зависимости $y(t)$, полученные в опытах по взаимодействию УВ с различными жидкостями, залитыми в кювету (1 — глицерин, 2 — вода, 3 — масло ВМ-4, 4 — спирт, кривая а — $M = 2,7$, кривая б — $M = 2,1$). Из этих данных следует, что в поведении зависимости $y(t)$ можно выделить две характерные стадии: сравнительно медленного (при $0 < t < t_i$) и линейного роста y при $t < t_i$. Приведенные данные свидетельствуют о том, что при $t > t_i$ скорость роста толщины двухфазного слоя практически не зависит от физических свойств жидкости. Сравнение результатов, полученных при разных M , показывает, что с ростом

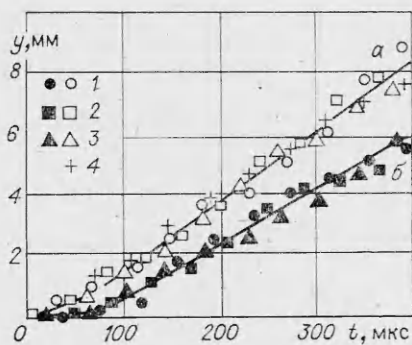


Рис. 4.

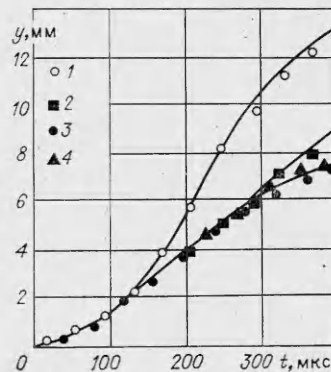


Рис. 5.

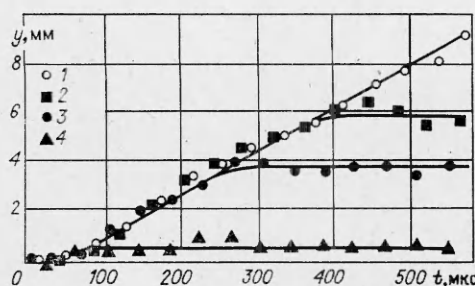


Рис. 6.

различных способах нанесения жидкости на нижнюю стенку ударной трубы (2, 4 — в кювете; 1, 3 — на поверхности). Видно, что для масла разница в способах нанесения слоя практически не сказывается на характере $y(t)$, в то время как для воды на поверхности стенки, начиная с момента $t \geq 150$ мкс, соответствующего времени прихода в область наблюдения возмущенного на уступе потока газа, скорость нарастания толщины слоя увеличивается примерно в 2 раза.

На рис. 6 отображены зависимости $y(t)$ для масла ВМ-4 при начальной толщине пленки жидкости $h = 2$ (1), 1 (2), 0,5 (3) и 0,2 мм (4). Видно, что влияние h сказывается лишь на максимальном значении высоты подъема жидкости. Следует отметить, что насыщению соответствует момент, когда скорость перемещения характерных возмущений в жидкости достигает максимального значения $\approx u$.

2. На основании проведенных исследований можно предположить наличие следующей схематичной картины взаимодействия УВ с пленкой жидкости. Ударная волна создает поток газа, скользящий над поверхностью жидкости. Из-за неустойчивости стратифицированного сдвигового течения (неустойчивости Кельвина — Гельмгольца) на границе раздела фаз образуются капиллярные волны [1—4]. С увеличением времени взаимодействия происходит трансформация волновых возмущений на поверхности жидкости, приводящая к росту их амплитуды и длины волн, наблюдающемуся до тех пор, пока скорость перемещения возмущений не сравняется со скоростью газового потока.

С гребней возмущений срываются микрочастицы, которые сносятся потоком газа. В результате образуется двухфазный слой, состоящий из газа, микрочастиц и пленок жидкости, толщина которого нарастает во времени линейно. При $t > t_i$ скорость роста толщины двухфазного слоя можно удовлетворительно описать выражением

$$dy/dt = 0,6u (\rho/\rho_{\text{ж}})^{0,5},$$

а время индукции срыва микрочастиц — соотношением [3]

$$t_i = Au^{-1} (\rho_{\text{ж}}/\rho)^{0,5}$$

($A = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_{\text{ж}}$, ρ — плотность жидкости и газа).

Известно [8], что в механизме неустойчивости Кельвина — Гельмгольца относительная касательная скорость на границе раздела фаз играет дестабилизирующую роль, а поверхностное натяжение и ускорение силы тяжести — стабилизирующую. Влияние вязкости приводит к затуханию поверхностных волн, амплитуда которых убывает $\sim \exp(-t/\tau)$, где $\tau = \lambda^2 \rho_{\text{ж}} (8\pi \mu_{\text{ж}})^{-1}$. Наличие поверхностного натяжения и вязкости выделяет «наиболее неустойчивую» длину волны [9]

$$\lambda_* = 8\pi \sqrt[3]{4\mu_{\text{ж}}^{0,66} (\sigma/\rho_{\text{ж}})^{0,33} (\beta \rho u^2)^{-0,66}}$$

и сказывается на развитии лишь тех возмущений, которые существенно не отличаются от λ_* . (Здесь $\mu_{\text{ж}}$, σ — вязкость и поверхностное натяжение жидкости; $\beta = 0,05$ [10] — параметр «парусности»). Поскольку к моменту начала срыва микрочастиц и интенсивного роста толщины двух-

М сокращается время начальной стадии t_i и увеличивается значение dy/dt . Так, при $M = 2,1$ $t_i \approx 100$ мкс, $dy/dt \approx 17$ м/с, а при $M = 2,7$ $t_i \approx 50$ мкс, $dy/dt \approx 25$ м/с. Полученные данные по скорости нарастания при $M = 2,1$ хорошо согласуются с результатами [4].

На рис. 5 показаны зависимости $y(t)$ для воды (1, 2) и масла ВМ-4 (3, 4), полученные при

фазного слоя $\lambda \gg \lambda_+$, то влияние σ и $\mu_{ж}$ становится несущественным, что, по-видимому, и определяет сходство в поведении различных жидкостей.

Таким образом, проведенные исследования показали, что основным фактором, ответственным за увеличение толщины слоя двухфазной смеси в процессе взаимодействия УВ со слоем жидкости, является интенсивный рост амплитуды волновых возмущений на поверхности жидкости, сопровождающийся срывом микрочастиц с гребней этих возмущений и, как следствие, формированием газожидкостной смеси. При этом максимальное значение толщины двухфазного слоя растет с увеличением начальной толщины пленки жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лесняк, М. А. Назаров, Я. К. Трошин и др. Докл. АН СССР, 1968, 183, 3, 628.
2. М. В. Воробьев, С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1976, 227, 4, 900.
3. М. В. Воробьев, С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1976, 300, 2, 344.
4. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. М. Шепарнев и др. ФГВ, 1981, 17, 5, 86.
5. В. М. Гендугов. ФГВ, 1978, 14, 1, 101.
6. В. М. Бойко, А. Н. Папырин, С. В. Поплавский и др.— В кн.: Тр. III Междунар. школы промышленных взрывов пыли. Турава, Польша, 1982.
7. В. М. Бойко, А. А. Карнаухов, В. Ф. Косарев и др. ПМТФ, 1982, 3, 64.
8. Гидродинамическая неустойчивость. М.: Мир, 1964.
9. E. Mayer. ARS J., 1961, 31, 12, 1783.
10. П. Ле Блон, Л. Майсек. Волны в океане. Ч. 2. М.: Мир, 1981.

Поступила в редакцию 16/X 1985