

М. В. ВОРОБЬЕВ, С. А. ЛЕСНЯК, М. А. НАЗАРОВ,
Я. К. ТРОШИН

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ГАЗ — ЖИДКОСТЬ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, СКОЛЬЗЯЩЕЙ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 4 XII 1975)

Динамика взаимодействия высокоэнтальпийного потока ударно-сжатого газа с пленкой жидкости, нанесенной на стенки ударной трубы, определяет механизм массоподачи при гетерогенной (газ — пленка) детонации⁽¹⁻³⁾. Такое течение до некоторой степени моделирует течение около оплавляющейся поверхности материалов, используемых для тепловой защиты аппаратов, входящих в плотные слои атмосферы, или при истечении продуктов сгорания из сопел^(4, 5).

В работе⁽³⁾ экспериментально исследовано течение в пограничном слое за фронтом ударной волны, скользящей над пленкой жидкости. Показано, что на близких расстояниях (через 10—50 мксек.) от ударного фронта над поверхностью жидкости возникает структура слабых волн сжатия и разрежения, так называемая М-структура, присущая обтеканию сверхзвуковым потоком шероховатой поверхности. Появление М-структуры объяснялось развитием возмущенной на гладкой поверхности пленки жидкости из-за неустойчивости границы раздела. Установлено, что развитие возмущений ускоряет переход от ламинарного течения к турбулентному⁽³⁾ и существенно интенсифицирует процесс теплообмена между газовым потоком и жидкостью по сравнению с теплообменом с гладкой поверхностью⁽⁶⁾. Следует отметить, что исследования течения на близких расстояниях от фронта ограничивались наблюдением течения газа над возмущенной поверхностью жидкости. Непосредственная регистрация волн на поверхности самой жидкости⁽⁷⁾ выполнена только на очень больших расстояниях от ударного фронта, порядка 500—1000 мксек.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования структуры волн, возникающих на расстояниях 1—10 см, что соответствует временному интервалу 10—100 мксек., от фронта ударной волны, скользящей вдоль границы раздела.

Опыты проводились в трубе квадратного сечения 1×1 см². Верхняя и нижняя стенки наблюдательной секции трубы были снабжены оптическими стеклами. На нижнее стекло устанавливалась прозрачная кювета глубиной 3 мм, заполняемая исследуемой жидкостью. Источник света (лампа вспышки ИФК-50) располагался под дном кюветы. Фотографирование осуществлялось в проходящем свете при помощи ждущей высокоскоростной камеры ЖЛВ-2, которая позволяла при частоте съемки 325 000 кадров/сек получать кадры размером 15×15 мм². Объектив фотокамеры наводился непосредственно на поверхность жидкости. Коэффициент увеличения изображения составлял 0,8—0,9 и на пленке получалось почти натуральное изображение поверхности. Разрешающая способность установки составляла около 50 мкм, что позволяло наблюдать мелкие детали структуры волн, возникающих на поверхности слоя жидкости, заполняющей кювету. Визуализировать ударный фронт оказалось невозможным и это обстоятельство до некоторой степени затрудняло определение рас-

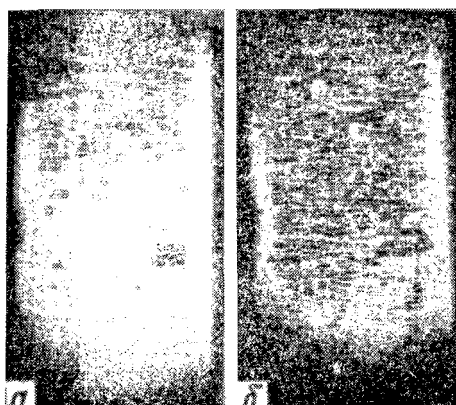


Рис. 1

Рис. 1. Развитие возмущений на поверхности масла ВМ-1 при дозвуковом обтекании ударно-сжатым газом. Время между кадрами составляет 18 мксек

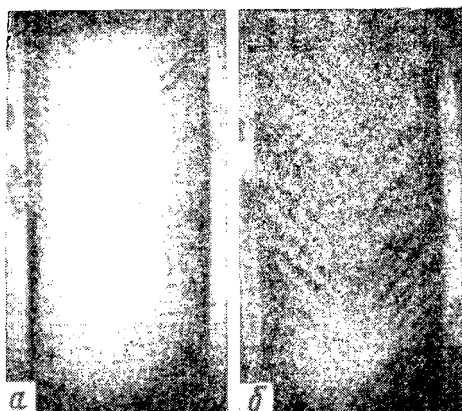


Рис. 2

Рис. 2. Развитие возмущений на поверхности масла ВМ-1 при сверхзвуковом обтекании ударно-сжатым газом. Время между кадрами составляет 12 мксек

стояний от фронта ударной волны до границы начала развития возмущений. Точность регистрации момента прихода ударного фронта в данное сечение трубы составляло ± 10 мксек. Скорости распространения ударных волн лежали в диапазоне 500–1500 м/сек, ошибка в измерении скорости составляла не более 3%; время постоянного течения за фронтом ударной волны, когда параметры ударно-сжатого газа изменялись не более чем на 10%, составляло не менее 100 мксек. Начальное давление газа в трубе равнялось 1 атм. Вязкости жидкостей изменялись в диапазоне от 10^{-6} м²/сек (вода) до $1,2 \cdot 10^{-3}$ м²/сек (глицерин); наибольшее число опытов проведено с вакуумным маслом ВМ-1 ($\nu = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м²/сек, $\rho = 900$ кг/м³, $\sigma = 33 \cdot 10^{-3}$ н/м), которое в силу крайне низкого давления паров при комнатной температуре является идеальным объектом при исследовании гетерогенной детонации ⁽²⁾.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии поверхности слоя вакуумного масла за фронтом ударной волны, скользящей вдоль границы раздела газ — жидкость. Ударная волна распространяется сверху вниз.

На photographиях рис. 1 скорость распространения ударной волны составляла $D = 550$ м/сек. Число Маха M_2 потока ударно-сжатого газа, равное отношению скорости потока относительно стенок трубы W к скорости звука в нем C_2 , составляло $M_2 = 0,7$, так что течение за фронтом было дозвуковым.

Визуализация поверхностных волн начинается на расстоянии 3 см от фронта ударной волны. Первые группы волн появляются у краев кюветы, но сравнительно быстро развиваются и захватывают (через 10 мксек.) все сечение кюветы. Таким образом поверхность пленки жидкости полностью покрывается возмущениями на расстояниях примерно 3,6 см. Характерной

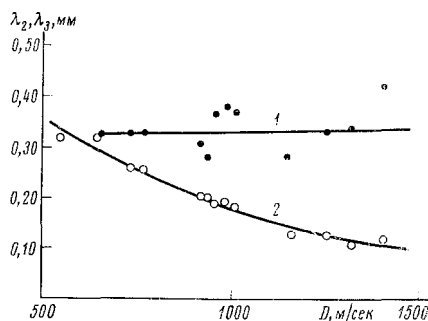


Рис. 3. Зависимость длин волн λ_2 (1) и λ_3 (2) возмущений на поверхности слоя масла от скорости распространения ударной волны D

особенностью этих волн является то, что гребни возмущения располагаются перпендикулярно направлению газового потока. В соответствии с терминологией теории гидродинамической неустойчивости ⁽⁸⁾ эти возмущения поверхности раздела называются двумерными волнами, поскольку для описания их развития необходимы два параметра: длина волны λ_2 и амплитуда A .

Иной характер носит структура поверхностных волн, представленная на рис. 2. В данном опыте скорость ударной волны составляла $D=1000$ м/сек, а течение за фронтом было сверхзвуковым $M_2=1,4$. Здесь отчетливо видно два типа поверхностных волн. На расстоянии 1,3 см от фронта ударной волны от краев кюветы начинают отходить возмущения

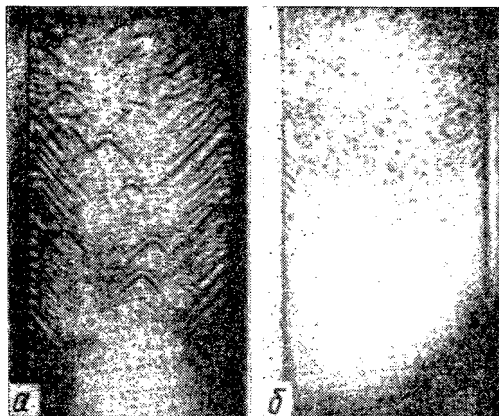


Рис. 4. Структура волн на поверхности различных жидкостей: а — 100% глицерин; б — 68% глицерин+32% вода

поверхности жидкости, гребни которых составляют с направлением потока угол $\theta=50^\circ$. Эти волны быстро внедряются в среднюю часть поверхности жидкости, а на расстоянии 20 мксек. смыкаются между собой. Поверхность слоя жидкости покрывается плоскостями, наклоненными к направлению газового потока.

Для описания развития такого рода поверхностных волн необходимо задавать уже три параметра: длину возмущения λ_3 , амплитуду A и угол гребней возмущений с направлением газового потока θ . Такие волны принято называть трехмерными.

Второй тип волн, возникающих на поверхности масла, — коротковолновые поверхностные волны, гребни которых располагаются нормально направлению потока газа и которые следует отнести к разряду двумерных. Гребни этих волн появляются на фотографиях рис. 2 на большем удалении от ударного фронта, чем трехмерные, и сразу же перекрывают все сечение поверхности жидкости, а не концентрируются у краев кюветы.

На рис. 3 дана зависимость длин волн λ_3 и λ_2 возмущений на поверхности слоя масла ВМ-1 от скорости распространения ударной волны D . Отметим, что для скоростей $D>660$ м/сек течение за фронтом ударной волны — сверхзвуковое, для $D<660$ м/сек — дозвуковое. Как видно из рис. 3, длина трехмерных возмущений λ_3 практически не зависит от скорости ударной волны D и составляет примерно $\lambda_3=0,3$ мм. Что касается углов наклона гребней возмущений к направлению потока, то его величина в пределах ошибки измерения углов и скоростей совпадала с величиной угла Маха для сверхзвукового потока газа

$$\beta = \arcsin (1/M_2).$$

С ростом скорости D от 550 до 1400 м/сек λ_2 уменьшается от 0,3 до 0,1 мм.

Для исследования влияния вязкости на структуру поверхностных волн были проведены опыты с водными растворами глицерина различной концентрации. Диапазон значений вязкости лежал в пределах от 1,5 кг/м·сек для «чистого» глицерина до 10^{-3} кг/м·сек для воды. Значения коэффициентов поверхностного натяжения σ изменялись в значительно меньшем диапазоне от $59 \cdot 10^{-3}$ (глицерин) до $73 \cdot 10^{-3}$ н/м (вода).

На рис. 4 приведены фотографии структур поверхностных волн за фронтом ударной волны, распространяющейся со скоростью $D=1000$ м/сек,

над «чистым» глицерином (рис. 4а) и водным раствором глицерина с вязкостью $3 \cdot 10^{-2}$ кг/м·сек (рис. 4б). Течение потока во всех опытах было сверхзвуковым. Как видно из рис. 4, различие в вязкости качественно меняет структуру поверхностных волн. За фронтом ударной волны, движущейся над пленкой вязкого глицерина (рис. 4а), отчетливо видна структура трехмерных и двумерных возмущений. Трехмерные возмущения визуализируются на более близких расстояниях от фронта, чем двумерные. Если трехмерные возмущения возникают у краев кюветы и над отдельными неровностями поверхности жидкости в средней части d (мельчайшие пылинки, пузырьки), то двумерные возмущения появляются в средней области поверхности жидкости. При движении волны над маловязким раствором глицерина (рис. 4б) трехмерные возмущения визуализируются крайне слабо и концентрируются главным образом у боковых стенок кюветы. Двумерные возмущения появляются раньше трехмерных и видны более отчетливо.

Как видно из сравнения длин волн двумерных возмущений, уменьшение вязкости существенно изменяет длину волны λ_2 : если для глицерина величина $\lambda_2 = 0,18$ мм, то для 68% глицеринового раствора она уменьшается до $\lambda_2 = 0,05$ мм. При столь малой длине возмущений уже практически невозможно выделить такие регулярные полосы, какие отчетливо видны на рис. 4а и рис. 1, 2. Что касается 56% раствора, то здесь поверхность жидкости покрыта крайне мелкой «рябью» с длиной волны, не превышающей $\lambda_2 < 0,02$ мм.

Результаты экспериментов показывают, что при скоростях распространения ударных волн свыше 660 м/сек, когда поток за фронтом волны сверхзвуковой, на поверхности вязких пленок жидкости возникают и двумерные, и трехмерные поверхностные волны. Уменьшение вязкости до десятков сантипуаз приводит к тому, что на поверхности образуются только коротковолновые двумерные возмущения с длиной волны $\lambda_2 < 0,01$ мм при любых скоростях ударных волн (500–1500 м/сек). Следует отметить, что при сверхзвуковом обтекании очень вязких жидкостей, типа расплавленного тефлона, наблюдались в (⁴) только трехмерные возмущения. При скоростях распространения ударных волн $D < 660$ м/сек, когда течение за фронтом дозвуковое, на поверхности всех жидкостей возникают только двумерные возмущения.

Возникновение λ_2 обусловлено неустойчивостью течения жидкости, движение которой возникает под действием касательного напряжения со стороны потока газа (динамическая неустойчивость). Энергия для нарастания этих возмущений поступает от течения самой жидкости (⁹), в то время как энергия для нарастания λ_3 — от газового потока (¹⁰) (статическая неустойчивость).

При сверхзвуковом обтекании гребни этих возмущений располагаются под углом Маха к направлению газового потока, поскольку скорость движения поверхности жидкости под действием касательного напряжения со стороны газового потока сравнительно мала.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
25 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Ф. Комов, Я. К. Трошин, ДАН, т. 162, № 1 (1965). ² С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др., ДАН, т. 182, № 5 (1968). ³ С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др., ДАН, т. 183, № 3 (1968). ⁴ P. R. Nachtsheim, H. K. Larson, AIAA J., v. 9, № 8, 1608 (1971). ⁵ R. J. Swigart, AIAA J., v. 12, № 10, 1301 (1974). ⁶ С. Я. Лесняк, Я. К. Трошин, Физика горения и взрыва, № 4 (1970). ⁷ А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов, там же, № 4 (1965). ⁸ Линь Цзя-цзяо, Теория гидродинамической устойчивости, М., ИЛ, 1958. ⁹ J. W. Miles, J. Fluid Mech., v. 8, № 4 (1960). ¹⁰ P. R. Nachtsheim, Phys. Fluids, v. 13, № 10 (1970).