

УДК 532.529.5/6

РАЗРУШЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ С ТРЕУГОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗА

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, С. А. ГУБИН, С. М. КОГАРКО,
С. П. КОМАР

(Москва)

При взаимодействии капель и газового потока наблюдается явление дробления капель. В стационарном газовом потоке условия дробления определяются числом Вебера $W^* = 5 \div 8$ [1, 2]. В зависимости от величины числа Вебера $W > W^*$ экспериментально обнаружены три разновидности процесса дробления. Так, при $W \approx 1.1 \div 1.2 W^*$ имеет место дробление типа «мешок» [1-3]. В интервале чисел Вебера $W^* < W < (1.1 \div 1.2) W^*$ в нестационарном газовом потоке наблюдалось раздвоение исходных капель [4, 5]. В тех случаях, когда $W > R^{0.5}$, где R — число Рейнольдса, в процессе разрушения капель наблюдается срыв поверхностного слоя жидкости [6-8].

Вопрос о закономерностях процесса дробления имеет большое значение при изучении горения аэрозолей, при решении задач, связанных со сверхзвуковым полетом летательных аппаратов через двухфазную среду и т. п. В работах [9, 10] показано, что гипотеза о дроблении капель как одной из ведущих стадий процесса преобразования жидкой компоненты в пар и далее в продукты сгорания позволяет понять ряд особенностей гетерогенного горения. На основе известных представлений о явлении дробления капель [1-8] выяснены условия возбуждения гетерогенной детонации и ее механизм. В работах [9, 10] на основе анализа гетерогенного горения выдвинуты соображения о динамике процесса дробления [11], которые в явном виде не вытекают из экспериментальных наблюдений.

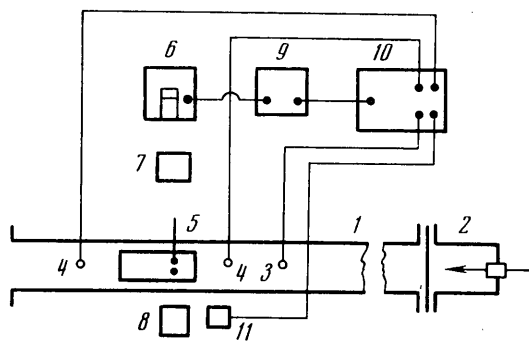
В работе [9] сделан вывод о пренебрежимо малой роли процесса срыва поверхностного слоя жидкости при распаде капель. В работе [10] указано на существование определенных временных критериев процесса дробления, без выполнения которых разрушение капель невозможно. Раньше к подобным выводам пришли и авторы работ [12, 13]. С целью подтверждения выдвинутых представлений проведены эксперименты по изучению процесса дробления капель в ударных волнах с линейно убывающими с течением времени давлением и скоростью газа. На ударном фронте имеет место наибольшая относительная скорость между газом и каплей, которая далее убывает до нуля за известный и регулируемый отрезок времени. При этой методике весьма точно воспроизводятся условия движения капель жидкости после их впрыскивания в газовую среду, имеющую скорость меньше скорости капель.

1. Экспериментальная установка. Опыты по изучению процесса дробления капель в нестационарном газовом потоке выполнялись на ударной трубе прямоугольного сечения 70×30 мм² (фиг. 1). Длина камеры низкого давления (КНД) 1 равна 2 м. Камера высокого давления (КВД) 2 (круглого сечения диаметром 50 мм) оснащена устройством для принудительного прорыва разделительной мембраны. Длина КВД изменялась в интервале $10 \div 70$ мм. В КНД на расстоянии 1.5 м от мембраны получались ударные волны с треугольным профилем изменения давления и скорости газа. Давление и скорость газа в ударной волне спадали до начального уровня $p_0 = 1$ атм и $u = 0$ м/сек за интервал времени $\Delta t = 0.5 \div 1.5$ мсек. Параметры ударных волн $p = p(t)$ и скорость D регистрировались двумя пьезоэлектрическими датчиками давления 4 с собственной частотой $f > 30$ кгц на базе 300 мм. Показания датчиков записывались на осциллографе С1-33 (10).

Для наблюдений за поведением капель на стенках ударной трубы на расстоянии 200 мм от открытого торца смонтированы кварцевые окна

с полем зрения $200 \times 50 \text{ мм}^2$. Фотографирование капель выполнялось с помощью стробоскопической лампы 6 типа ИСШ-100-3, объективов 7, 8 на неподвижную пленку. Длительность вспышки источника света $\sim 20 \text{ мксек}$. Вследствие однократности действия источника света кинограмма процесса дробления получалась как совокупность снимков, сделанных в ряде опытов при одних и тех же начальных условиях с разными задержками момента вспышки лампы относительно момента прохождения волн. Принятая схема съемки позволяла получать на пленке увеличенное в 7 раз изображение капель. Размер фотографируемых капель ограничен величиной $10 \div 15 \text{ мк}$.

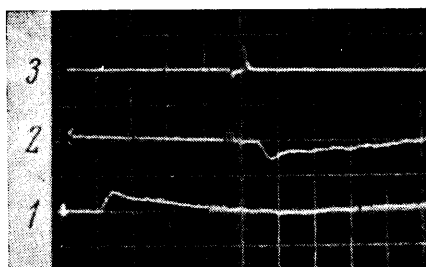
Запуск осциллографа и источника света осуществлялся с помощью сигнала от запускающего датчика 3. Момент срабатывания источника света задавался устройством 9 и регистрировался на осциллографе в виде сигнала фотозлемента 11 при вспышке лампы. Типичная запись изменения давления в ударной волне и регистрация



вспышки лампы фотозлемента представлены на фиг. 2. На первом и втором лучах осциллографа — записи сигналов датчиков давления, на третьем луче — запись сигнала от фотозлемента. Масштаб времени (по горизонтали) 250 мксек на деление. Масштаб давления (по вертикали) $0,083 \text{ атм}$ на деление.

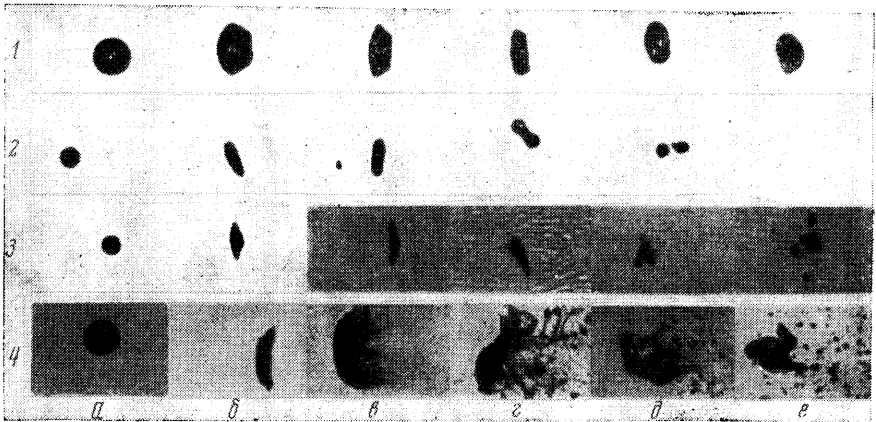
Капли одинакового размера получались путем подбора режима истечения жидкости из капилляра 5. В поле зрения попадало $6 \div 8$ капель. Отклонение от заданного размера при последовательных включениях выдачи жидкости не более 10%. В опытах изучалось разрушение капель керосина диаметром d_0 от 70 мк до 1 мм ударными волнами с числом Маха $M=1,05 \div 1,26$.

2. Результаты экспериментов. На серии 1а-д фотографий фиг. 3 представлена кинограмма процесса деформации капли керосина диаметром 900 мк под воздействием ударной волны с числом Маха $M=1,1$ и длительностью положительной фазы сжатия $\Delta t=500 \text{ мксек}$. На фотографиях с увеличением в 7,4 раза зарегистрированы мгновенные состояния капли перед фронтом волны и через 220, 320, 1100, 1310 и 5400 мксек



после начала взаимодействия капли с волной. Наибольший поперечный размер капли $1,5d_0$. В дальнейшем из-за уменьшения скорости газа места наибольшей кривизны сглаживаются и к 1100 мксек капля приобретает форму диска. После этого капля восстанавливает свою первоначальную форму. Так как капля не разрушается через промежуток времени, равный периоду собственных колебаний (4200 мксек), то это означает, что возбужденные под влиянием импульсного воздействия потока газа колебания жидкости являются затухающими. Необходимо отметить, что на фронте

ударной волны значения критериев Вебера $W=0.5\rho_1 u_1^2 d_0 \psi^{-1}=120$ и Рейнольдса $R=\rho_1 u_1 d_0 \mu^{-1}=3300$ таковы, что все условия для начала процесса дробления в стационарном газовом потоке выполнены. Здесь через ρ_1 , u_1 обозначены плотность и скорость газа на ударном фронте, ψ и μ — поверхностное натяжение жидкости и вязкость газа. Следовательно, выполнение неравенства $W>W^*$, где W^* — критическое число Вебера, не является достаточным условием начала процесса дробления в нестационарном газовом потоке.



Фиг. 3

Характерные времена колебательных процессов и процессов деформации капель определяются размером частиц. Уменьшение размера капель должно способствовать появлению признаков разрушения при $W>W^*$. На серии фотографий 2а–д фиг. 3 представлена увеличенная в 12.7 раза кинограмма процесса деформации капли диаметром 350 мк под воздействием волны, имеющей число Маха $M=1.1$ и длительность фазы сжатия $\Delta t=650$ мксек. Фотографии соответствуют мгновенным состояниям капли перед волной и через 350, 560, 1100, 1200 мксек соответственно. Числа Вебера и Рейнольдса на фронте ударной волны равны 35 и 1300.

Под действием аэродинамических сил газового потока капля деформируется, принимая через 560 мксек форму, близкую к форме эллипсоида вращения. Размер большой полуоси эллипсоида $a\approx 2d_0$. Затем из-за уменьшения относительной скорости поперечные размеры капли начинают сокращаться. Несмотря на уменьшившееся действие аэродинамических сил, в капле, по-видимому, возникают незатухающие собственные колебания, так как происходит распад исходной капли на две части. Процесс уменьшения поперечных размеров капли и момент ее раздвоения отражены на фотографиях.

Увеличение интенсивности ударной волны и ее продолжительности ведет к дальнейшей интенсификации процесса дробления. На серии 3 фотографий фиг. 3 приведена увеличенная в 8 раз кинограмма разрушения капли диаметром 650 мк в волне с параметрами $M=1.16$ и $\Delta t=750$ мксек. На фронте волны $R=4090$, $W=140$. Фотографии соответствуют моментам времени 0, 300, 469, 500, 904 и 1000 мксек. Капля, находясь еще в фазе сжатия волны, претерпевает такую деформацию, что ее поперечный размер становится равным $a=2.5d_0$ через 469 мксек. В представленном случае происходит разрушение капли на 5 частей приблизительно одинакового размера.

| d , мм | M | Δt | W | R | t_1 , мсек | n | τ_n , мсек | τ , мсек |
|----------|------|------------|-----|------|--------------|-----|-----------------|---------------|
| 100 | 1.12 | 1200 | 15 | 360 | 170 | 2 | 140 | 43 |
| 300 | 1.11 | 700 | 40 | 1100 | 1200 | 2 | 736 | 242 |
| 450 | 1.16 | 700 | 100 | 3190 | 1520 | 2 | 1350 | 250 |
| 450 | 1.16 | 800 | 100 | 3190 | 704 | 5 | 324 | 250 |
| 900 | 1.16 | 1200 | 200 | 6380 | 1503 | 4 | 1280 | 480 |

Обнаруженный тип дробления раньше в ударных волнах не наблюдался. Ввиду аналогии с вибрационной модой разрушения капель в нестационарных газовых потоках [4, 5] его следует причислить к тому же виду. В таблице приведены результаты опытов, в которых наблюдалось разрушение капель по вибрационной моде. Период собственных колебаний определяется по соотношению

$$\tau_n = \pi \left[\frac{d^3 \rho_f}{n(n-1)(n+1)\psi} \right]^{0.5}$$

а время деформации — по формуле

$$\tau = \frac{2d_0}{u_1} \left(\frac{\rho_f}{\rho_1} \right)^{0.5}$$

где ρ_f — плотность жидкости. Из анализа данных таблицы легко убедиться, что выполняется следующее приближенное соотношение между основными временными параметрами: $t_1 \approx \tau_n + \tau$.

Дальнейшее увеличение скорости газа за фронтом ударной волны ведет к тому, что процесс разрушения капель начинает сопровождаться срывом пограничного слоя жидкости с капель. На фотографиях 4 фиг. 3 приведена увеличенная в 7,4 раза кинограмма процесса деформации и разрушения каплей диаметром 900 мк в волне с параметрами $M=1.21$ и $\Delta t=1150$ мсек. Фотографии соответствуют моментам времени 0, 235, 330, 698, 1085, 1500 мсек.

Из анализа приведенных регистраций видно, что и в этом случае происходит деформация капли и лишь спустя время τ начинается срыв поверхностного слоя жидкости. Ниже приведены значения критериев Вебера и Рейнольдса в различные моменты времени за фронтом ударной волны. С уменьшением скорости потока за ударным фронтом изменяются аэродинамические силы. Спад динамического напора газа отражается на интенсивности процесса разрушения капли. На серии фотографий 4 фиг. 3 можно проследить различные фазы процесса дробления. Так, в момент времени $t=330$ мсек при $W=150$ и $WR^{-0.5}=2.08$ с капли срывается облако мельчайших капель размером 40 мк. При уменьшении значения числа Вебера до 30 и $WR^{-0.5}=0.6$ (момент времени $t=698$ мсек) с концов капли сползает пленка жидкости, которая из-за своей неустойчивости разрушается на капельки с размером от 20 до 300 мк. При дальнейшем снижении значений чисел W и R грубость распыливания жидкости возрастает.

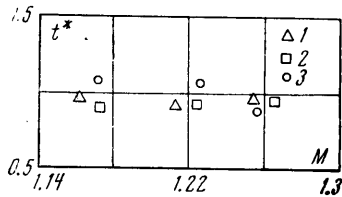
В период времени между 698 и 1085 мсек срыв жидкости с краев капли прекращается. Оставшаяся неразрушенной часть капли достигает скорости $\sim 10 \div 15$ м/сек. Инерция капли столь велика, что она внедряется в облако практически безынерционных микрокапель, сорванных в предыдущие моменты времени. После выхода капли из зоны сжатия меняется направление вектора относительной скорости газа и капель. В дальнейшем интенсивность процесса ослабевает настолько, что остается заметной только вибрационная мода. Завершающая стадия процесса дробления,

по-видимому, осложняется вращением капель, вызванным как переменной направлением обдувания, так и неустойчивостью тела неправильной формы, каким является капля на последних стадиях разрушения в газовом потоке. Как видно из фотографий, за время действия ударной волны значительная масса капли остается неразрушенной. Подобная картина наблюдается в треугольных волнах с длительностью положительной фазы сжатия до

$$\Delta t_1 = 12d_0 \rho_f^{0.5} (\rho_1 u_1^2)^{-0.5}$$

В волнах большой длительности имеет место более полное разрушение капли. Ударные волны с длительностью положительной фазы сжатия $\Delta t > \Delta t_1$ мало отличаются от волн бесконечной длительности, у которых полное разрушение капель достигается ко времени 5τ . В работе [6] разрушение капель, сопровождаемое срывом поверхностного слоя жидкости, наблюдалось на каплях с размером $d_0 > 0.2$ мм. В серии выполненных опытов подтверждено существование такого же процесса разрушения и для капель размером $d_0 \approx 70$ мк.

На основе проведенных экспериментов по дроблению капель диаметром $d_0 = 70 \div 10^3$ мк в ударных волнах с числом Маха $M = 1.1 \div 1.26$ установлено



Фиг. 4

существование временной задержки τ_i между моментом взаимодействия фронта волны с каплей и началом срыва жидкости с каплей. Определение значения величины τ_i (периода индукции) вследствие особенностей методики съемки (дискретности съемки, шаг между последовательными моментами съемки $30 \div 50$ мксек) производилось с погрешностью $\sim 20 \div 30\%$. На графике фиг. 4 построена зависимость отношения периода индукции τ_i к величине τ , определяющей момент достижения капель степени деформации $a = (2.5 \div 3)d_0$ (для точек 1, 2, 3 $d_0 = 350, 900, 150$ мк соответственно). Как видно из графика, имеет место равенство

$$\tau_i \approx (1.5 \div d) d_0 \rho_f^{0.5} (\rho_1 u_1^2)^{-0.5}$$

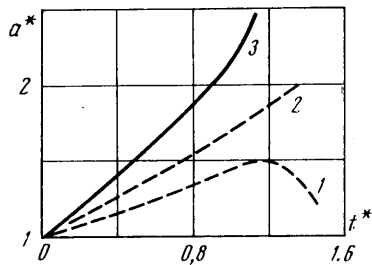
В заключительной серии опытов показано, что сокращение длительности воздействия газового потока на каплю при $\Delta t \rightarrow \tau_i$ ведет к прекращению процесса дробления.

3. Обсуждение результатов. На основе выполненных исследований установлены особенности процесса разрушения капель в нестационарном газовом потоке с плавно уменьшающейся скоростью. Поскольку в экспериментах смоделированы условия впрыскивания и торможения капель в газовой среде, то полученные результаты описывают поведение жидкой фазы после выхода из распылителей (форсунок) в реальных энергетических установках. Основной особенностью дробления капель под влиянием газового потока с плавно убывающей относительной скоростью между фазами следует считать то, что выполнение критических условий Вебера является недостаточным для начала дробления капель. Критические условия для процесса дробления необходимо связывать не только с интенсивностью обдуваемой капли потока газа, но и с длительностью взаимодействия. Из выполненных экспериментов следует, что значение критической длительности возмущений при дроблении по вибрационной моде близко ко времени достижения капель критической стадии деформации. Критическая длительность возмущений при дроблении, сопровождаемом срывом слоя жидкости, соответствует времени индукции начала процесса срыва. Таким

образом найдена длительность нестационарных волн давления, прохожде-ние которых по двухфазной среде при числах Вебера $W \leq 100$ не вызывает разрушения капель. Критическая длительность возмущений давления $\Delta t^* \approx 2d_0 \rho_f^{0.5} (\rho_l u_1^2)^{-0.5}$, а возрастание критического числа Вебера при $\Delta t \rightarrow \Delta t^*$ описывается зависимостью

$$W_i^* = W^* (1 - \Delta t^* \Delta t^{-1})^{-0.33}$$

В более ранних работах по изучению дробления капель в ударных волнах разрушение по вибрационной моде не наблюдалось. Укажем условия, при которых имеет место подобное разрушение капель. Построим графики изменения поперечного размера капель со временем. На фиг. 5 по оси ординат отложены величины $a^* = ad_0^{-1}$, а по оси абсцисс — $t^* = t\tau^{-1}$. Проведенные кривые соответствуют трем различным случаям. В первом случае (кривая 1) капля диаметром 100 мк под влиянием газового потока длительностью $\Delta t = 600$ мксек, за волной числом Маха $M = 1.1$ за время $t^* \approx 1$ достигает степени деформации $a^* \approx 1.4$ и не разрушается. Если при увеличении длительности волны капля успе-вает сформироваться за время $t^* \approx 1$ до величины $1.5 < a^* < 1.7$, то наблюдается раздвоение исходных капель. При дости-жении к моменту времени $t^* \approx 1$ степени деформации $a^* \approx 2 \div 2.5$ имеет место разру-шение капель на 4–8 частей. Срыв по-верхностного слоя жидкости во всех пере-численных случаях не наблюдается. Время разрушения капель по вибрационной моде складывается из времени деформации ка-пли, которое близко к $t \approx 0.7\tau$, и периода собственных колебаний.



Фиг. 5

Переход к разрушению капель со срывом поверхностного слоя жид-кости происходит без промежуточных стадий (дробление типа «парашют»), наблюдавшихся в стационарных условиях нагружения капель аэродина-мическими силами. Срыв поверхностного слоя жидкости имел место в слу-чаях, когда к моменту времени $t \approx \tau_i$ выполнялось соотношение $W > R^{0.5}$. При этом в течение периода времени $t \approx \tau_i$ поперечный размер капли до-стигал величины $a^* \approx 3$.

Из опытов удалось установить длительность треугольных возмущений давления, для которых еще не имеют место эффекты, связанные с неста-ционарностью обтекания капель газом. В волнах с длительностью фазы сжатия до $\Delta t \approx (6 \div 8)\tau$ нестационарность газового потока влияет на про-цесс разрушения капель. В волнах с фазой сжатия $\Delta t > (7 \div 8)\tau$ дробление капель происходит, как в стационарном случае.

Поступила 14 IV 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вольинский М. С.* Изучение дробления капель в газовом потоке. Докл. АН СССР, 1949, т. 68, № 2, стр. 237–240.
2. *Hanson A. R., Domich E. G., Adams M. S.* Shock tube investigation of the break up of drops by air blasts. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 8, pp. 1071–1080.
3. *Hass F. C.* Stability of droplets suddenly exposed to a high velocity gas stream. A.I.Ch.E. Journal, 1964, vol. 10, No. 6, pp. 920–924.
4. *Blanchard D. C.* The behavior of water drops at terminal velocity of air. Trans. Amer. Geo. Un. 1950, vol. 31, No. 7, pp. 836–842.
5. *Koenig L. R.* Drop freezing through drop breakup. J. Atmos. Sci, 1965, vol. 22, No. 4, pp. 448–451.

6. *Dickerson R. A., Coultas T. A.* Breakup of droplets in an accelerating gas flow. AIAA paper, 1966, No. 611.
7. *Бузуков А. А.* Разрушение капель и струй жидкости воздушной ударной волной. ПМТФ, 1963, № 2, стр. 154–158.
8. *Simpkins P. G.* On the distortion and break up of suddenly accelerated droplets. AIAA paper, 1971, No. 325.
9. *Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л.* Усиление слабых ударных волн в горящей двухфазной системе жидкость – газ. ПМТФ, 1970, № 1, стр. 168–173.
10. *Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л.* Механизм образования волны сжатия за фронтом слабой ударной волны, распространяющейся по горючей двухфазной смеси. Докл. АН СССР, 1970, т. 190, № 3, стр. 621–624.
11. *Когарко С. М., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Борисов А. А.* Динамика разрушения капель жидкости в газовом потоке. Докл. АН СССР, 1971, т. 198, № 1, стр. 71–73.
12. *Дунский В. Ф., Никитин Н. В.* Распыление жидкости вращающимся диском и вопрос о вторичном дроблении капель. Инж.-физ. ж., 1965, т. 5, № 1, стр. 55–58.
13. *Morrell G., Povinelli F. P.* Breakup of various liquids jets by shock waves and applications to resonans combustion NASA TND-2423, 1964.