

УДК 532.525.2:621.43.038

## БЕЗУДАРНОЕ ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Б. Е. Гельфанд, Б. Вьель\*, И. Гёкальп\*, К. Шаво\*

Институт химической физики РАН, 117977 Москва

\* Лаборатория горения, Национальный центр научных исследований, 45071 Орлеан (Франция)

Рассмотрен процесс безударного дробления (разрушения) капель при их встрече со слоем (пеленой) движущегося газа в отсутствие возмущений давления, когда капли жидкости испытывают влияние кратковременного П-образного импульса аэродинамических сил. При высоком давлении окружающей газовой среды  $p_0 = 20 \div 80$  бар капли (этанол, жидкий кислород) успевают разрушиться после пребывания в тонком (толщиной  $2 \div 5$  мм) газовом слое (струе), движущемся со скоростью  $1 \div 10$  м/с. Особенностью процесса является совпадение характерного времени деформации капель и периода собственных колебаний со временем пребывания частиц в зоне их взаимодействия с газовым потоком. Предложены эмпирические соотношения для определения полного времени разрушения и длительности фазы распада капель при их безударном дроблении.

Обычно разрушение капель в газовых потоках связывают с появлением в газовой среде вокруг капель возмущений давления (волн давления или разрежения, ударных или взрывных волн), вызывающих относительное движение капель и газа. Описание основных мод дробления капель, связанных с прохождением волн давления в двухфазной системе газ — капли, приведено в [1].

Известно, что дробление капель может происходить в сплошной среде, не возмущенной волнами давления. Процесс дробления капель в изобарической среде назовем безударным. Ниже приведены некоторые случаи реализации процессов безударного дробления капель (БДК):

- 1) дробление капель при их свободном падении;
- 2) впрыск жидких капель (струй) поперек газового потока в виде прямоугольной пелены конечной ширины или цилиндрической струи конечного диаметра;
- 3) дробление капель тяжелой жидкости плотностью  $\rho_f$ , распределенных в потоке более легкой несжимаемой жидкости.

Некоторые перечисленные случаи реализации БДК имеют практическое значение. Так, для процессов подготовки горючей смеси в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей или дизелей существенным является второй случай. Этот случай реализации процесса БДК изучен недостаточно, в частности, мало изучены его временные характеристики, особенно при высоком начальном давлении газа  $p_0 > 10$  бар. Некоторые данные экспериментов противоречивы, поскольку в них не фиксировались параметры газа в условиях плавного нарастания аэродинамических сил. Например, многие результаты в [2, 3] получены в пределах указанных в этих работах ошибок измерения и мало пригодны для количественных оценок.

Для достоверного описания процесса БДК и определения параметров необходима синхронизация наблюдаемого поведения частиц с начальными и текущими условиями относительного движения газа и капель. Только при использовании специальной методики измерения параметров течения газа вблизи капель этанола и жидкого кислорода в изобарическом пространстве [4, 5] стало возможным получение достоверных данных об условиях

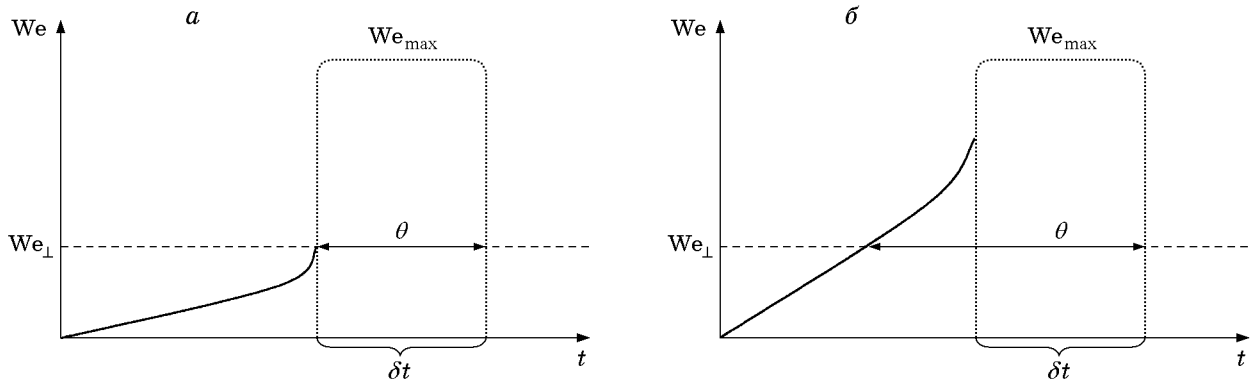


Рис. 1. Качественная зависимость числа Вебера от времени при БДК: сплошные линии —  $We_{\perp}$ , штриховые —  $We_m$ ;  $a - \theta \approx \delta t$ ,  $b - \theta > \delta t$

реализации и временных характеристиках БДК при встрече капель с движущимся тонким слоем газа. Данные опытов [4–6] дополняют результаты наблюдений в [7–9]. Из этих данных следует, что процесс БДК зависит от времени пребывания капель внутри газовой пелены (струи):  $\delta t = \Delta/w_{\perp}$ . Здесь  $\Delta$  — ширина (диаметр) движущейся газовой пелены;  $w_{\perp}$  — скорость движения капель поперек газового слоя.

Для лучшего понимания рассматриваемого процесса целесообразно определить изменение аэродинамических сил, действующих на каплю, во времени. Будем характеризовать величину этих сил с помощью числа Вебера  $We = \rho_g u_r^2 d / \sigma$ . Здесь  $\rho_g$  — плотность газа в газовой пелене (воздух или гелий в [4, 5]);  $u_r = (w_{\perp}^2 + v^2)^{0,5}$ ;  $v$  — скорость газа;  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости. Анализ экспериментов, аналогичных проведенным в [4–6], показал, что капли жидкости испытывают действие П-образного скачка аэродинамических сил, основные разновидности которого могут быть описаны с помощью зависимости числа Вебера от времени  $t$  (рис. 1). В опытах [6–10] число Вебера во время подлета капель к движущейся струе газа  $We_{\perp} = \rho_g w_{\perp}^2 d / \sigma \ll We_m = \rho_g v^2 d / \sigma$ . Однако в реальном рабочем процессе в двигателях, а также в опытах с жидким кислородом при высоком давлении [4, 5]  $We_{\perp} \approx We_m$ . При  $We_{\perp} \ll We_m$  (рис. 1, *a*) капля испытывает П-образное воздействие аэродинамических сил с амплитудой  $We_{max}$  и длительностью  $\theta \approx \delta t$ . При  $We_{\perp} \approx We_m$  (рис. 1, *б*) простая П-образная форма скачка аэродинамических сил искажается вследствие увеличения значений числа Вебера во время полета капель до встречи со струей в покоящемся газе, при этом  $\theta > \delta t$ .

Таким образом, при анализе процесса БДК кроме уровня аэродинамических сил (характеризуемого числом Вебера) необходимо учитывать соотношение времени их действия  $\theta$  с временными масштабами процесса разрушения капель. Согласно [1] такими масштабами являются время деформации частиц  $\tau_1 = du_r^{-1} (\rho_f \rho_g^{-1})^{0,5}$  и период собственных колебаний  $\tau_2 = 0,785 \rho_f d^3 \sigma^{-1} \approx 0,785 \tau_1 We^{0,5}$ .

В [4, 5] определены время начала интенсивного распада капель  $\tau_i$  и собственно длительность процесса разрушения  $\tau_b$  при БДК. Полное время дробления  $\tau_{\Sigma} = \tau_i + \tau_b$ . Ни одна из указанных экспериментально измеренных величин не сопоставлялась с  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , а также со временем пребывания капель в поле действия аэродинамических сил  $\theta$ . На рис. 2 приведена зависимость  $\tau_i(We)$  при различных значениях начального давления газа  $p_0$ . Экспериментальные данные получены для капель жидкого кислорода размером  $d = 0,7 \div 1,4$  мм.

Как показано на рис. 2,  $\tau_i \geq \theta$  при  $We \leq 20 \div 30$  и  $\tau_i \leq \theta$  при  $We \geq 30$ . Существуют аналогичные зависимости между периодом колебаний  $\tau_2$  и временем  $\theta$ :  $\tau_2 \geq \theta$  при  $We \leq 15$ ,  $\tau_2 \leq \theta$  при  $We \geq 30$ . При  $We \approx 15 \div 30$  получено  $\tau_2 \approx \tau_i$ . В большинстве опытов (см. [4, 5])  $\tau_{\Sigma} \geq \theta$ . Выявленное в экспериментах сложное взаимодействие процессов, характеризуе-

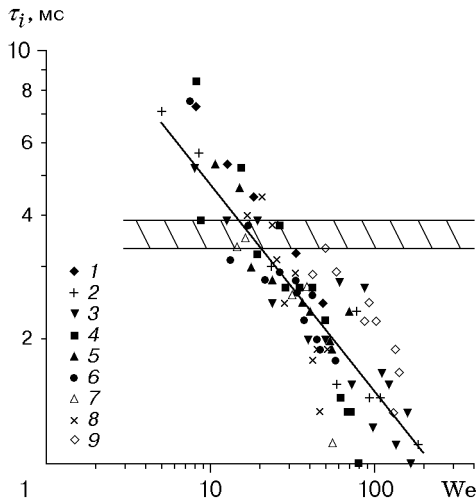


Рис. 2. Зависимость времени начала распада капле от числа Вебера (заштрихованная область — время пребывания капле в зоне действия сверхкритических аэродинамических сил  $We_1 > 10$ ):

сплошная линия — расчет, точки — эксперимент;  
 1 —  $p_0 = 2$  бар, 2 —  $p_0 = 5$  бар, 3 —  $p_0 = 10$  бар,  
 4 —  $p_0 = 20$  бар, 5 —  $p_0 = 30$  бар, 6 —  $p_0 = 40$  бар,  
 7 —  $p_0 = 50$  бар, 8 —  $p_0 = 60$  бар, 9 —  $p_0 = 70$  бар

мых временами  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_\Sigma$  и временем действия разрушающих нагрузок, усложняет анализ опытных данных и обуславливает своеобразие наблюдаемых явлений.

Принято различать три типа разрушения мишени (капли) при действии нагрузки (аэродинамической силы) [11].

1. При  $\theta \gg \tau_2$  распад капле происходит квазистатически и существенно зависит от величины действующей нагрузки (числа Вебера) [6, 10].

2. При  $\theta < \tau_2$  (см. [7–9]) распад капле происходит импульсно, при этом существенно не только величина нагрузки, но и время ее действия.

3. При  $\theta \approx \tau_2$  распад капле происходит импульсно-квазистатически, в этом случае разрушение зависит от динамических характеристик нагрузки:  $We = We(t/\theta)$  (см. [2–5]). В [2, 3] наблюдались также резонансные явления из-за равенства времени пребывания капле и периода собственных колебаний. На основании этого и опытов, проведенных в [4, 5], можно установить безразмерное время начала интенсивного распада капле  $\tau_i^* = \tau_i/\tau_1$  и его длительность  $\tau_b^* = \tau_b/\tau_1$  в зависимости от числа Вебера. Соответственно  $\tau_\Sigma^* = \tau_\Sigma/\tau_1 = \tau_i^* + \tau_b^*$ .

На рис. 3, а, б представлены зависимости полного времени разрушения  $\tau_\Sigma^*$  и длительности фазы распада  $\tau_b^*$  от числа Вебера. Для случая ударного разрушения капле кратковременными возмущениями давления в [12] предложена эмпирическая зависимость  $\tau_\Sigma \approx \tau_1 + \tau_2 = \tau_1(1 + 0,785\chi We^{0,5})$ , т. е.  $\tau_\Sigma^* \approx 1 + 0,785\chi We^{0,5}$ , причем  $\chi \leq 1$ ,  $\tau_i^* = \tau_i/\tau_1 \approx 1$ . Сплошная линия на рис. 3, а соответствует этой зависимости при  $\chi_1 = 0,9$  и удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [4, 5]. Таким образом, полное время распада капле есть сумма времени деформации частиц до критической стадии и периода их собственных колебаний. Собственно длительность распада частиц при  $We < 100$  близка к значению  $\tau_b^* \approx \tau_\Sigma^* - 1 = 0,785\chi_2 We^{0,5}$ , причем  $\chi_2 = 0,8 \pm 0,2$ .

На рис. 3, б приведены расчетная зависимость  $\tau_b^* = 0,785\chi_2 We^{0,5}$  (сплошная линия) и экспериментальные данные [4, 5]. Удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных означает близость времени распада и периода собственных колебаний капле. В [13] в диапазоне чисел Вебера  $18 < We < 45$  также отмечена парадоксальная зависимость для  $\tau_\Sigma^* = \tau_\Sigma^*(We)$ , когда безразмерное время дробления капле за ударными волнами растет с увеличением значений числа Вебера. Такое поведение капле характерно для условий, когда вынужденные колебания частиц еще вносят вклад в процесс разрушения. При  $We > 100$  период колебаний капле  $\tau_2 \gg \tau_1$ . В этом случае процесс распада меньше связан с осцилляциями формы, поэтому  $\tau_\Sigma^* \neq \tau_\Sigma^*(We)$  и значение  $\tau_\Sigma^*$  стремится к постоянной величине, приблизительно равной  $5 \pm 1$ .

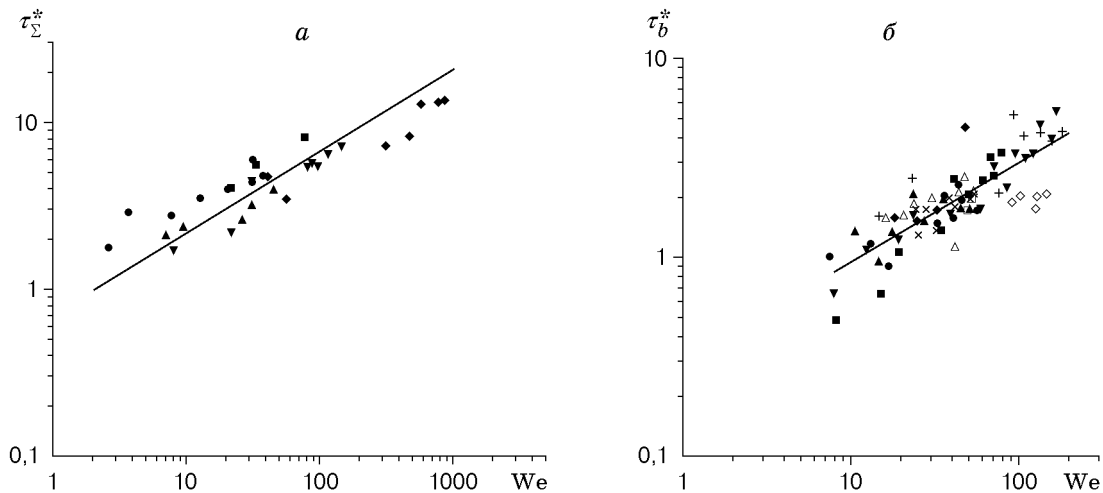


Рис. 3. Зависимости полного безразмерного времени дробления каплей (*а*) и безразмерной длительности фазы распада каплей (*б*) от числа Вебера (обозначения те же, что на рис. 2)

Таким образом, основной особенностью процесса БДК при движении каплей через плену (струю) движущегося газа в изобарическом пространстве является импульсное или импульсно-квазистатическое разрушение частиц при действии аэродинамических сил, обусловленное равенством времени действия нагрузки  $\theta$  и характерных времен деформации  $\tau_1$  и собственных колебаний каплей  $\tau_2$ . В результате полное время разрушения каплей близко к суммарной длительности процесса деформации и периода собственных колебаний. После достижения критической стадии деформации длительность процесса распада каплей соизмерима с периодом собственных колебаний каплей. При  $\theta \gg \tau_1$  и, следовательно,  $\theta \gg \tau_2$  временные характеристики для процессов БДК и дробления каплей в присутствии волн давления совпадают.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Gelfand B. E.** Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // *Progr. Energy Combust. Sci.* 1996. V. 22, N 3. P. 201–265.
2. **Дубровский В. В., Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А.** Экспериментальное исследование дробления каплей аэродинамическими силами // *ПМТФ.* 1991. № 5. С. 87–93.
3. **Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V.** Deformation and breakup of drops by aerodynamic loads // *Atomiz. Sprays.* 1996. V. 6, N 6. P. 667–692.
4. **Vieilli B., Chauveau C., Gekalp I.** Droplet breakup regimes under high pressure conditions. N. Y., 1998. (Paper / AIAA; N 0715).
5. **Vieilli B., Chauveau C., Gekalp I.** Studies of the breakup regimes of LOX-droplets. N. Y., 1999. (Paper / AIAA; N 0208).
6. **Wierzba A.** Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearby critical Weber numbers // *Exp. Fluids.* 1990. V. 9, N 1. P. 59–64.
7. **Lin A. B., Reitz R. D.** Mechanisms of air assisted liquid atomization // *Atomiz. Sprays.* 1993. V. 3, N 1. P. 55–75.
8. **Liu Z., Reitz R. D.** An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed drops // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1997. V. 23, N 4. P. 631–650.
9. **Hwang S. S., Liu Z., Reitz R. D.** Breakup mechanisms and drag coefficients of high-speed vaporizing liquid drops // *Atomiz. Sprays.* 1996. V. 6, N 3. P. 553–575.

10. **Krzeczkowski S. A.** Measurements of liquid droplet disintegration mechanisms // Intern. J. Multiphase Flow. 1980. V. 6, N 2. P. 227–237.
11. **Baker W. E., Westine P. S., Cox P. A., et al.** Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier, 1973.
12. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Комар С. П.** Разрушение капель жидкости в потоке за ударными волнами с треугольным профилем изменения скорости газа // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1973. № 5. С. 54–60.
13. **Pilch M., Erdman C. A.** Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drops // Intern. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13, N 6. P. 741–757.

*Поступила в редакцию 28/II 2000 г.*

---