

УДК 532.529.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ВТОРИЧНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ
В ГРАДИЕНТНЫХ ПОТОКАХ**

© 2011 г.

В.М. Бойко, С.В. ПоплавскийИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск

bvm@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлены результаты систематического экспериментального изучения динамики поведения капель различных жидкостей в двух типах высокоградиентных потоков: сверхзвуковых недорасширенных струях и в плоских ударных волнах. Исследования выполнены с использованием комплекса современных оптических методов диагностики, включая PIV-диагностику, метод лазерного ножа, метод теневой визуализации и метод высокоскоростной импульсной киносъемки с частотой 30000 кадр/с.

Ключевые слова: аэродинамическое диспергирование жидкостей, высокоградиентные газовые потоки, оптические методы диагностики.

Данные о механизмах и динамике аэродинамического диспергирования жидкостей востребованы в многочисленных инженерных приложениях, где предъявляются повышенные требования к дисперсному составу продуктов дробления жидкости, а также к производительности и эффективности процессов. Этим определяется актуальность изучения поведения капель в сверхзвуковых двухфазных струйных течениях – высокоградиентных газовых потоках с переменным и ограниченным во времени действием аэродинамических сил на каплю.

Представлены результаты систематического изучения динамики поведения капель различных жидкостей в двух типах высокоградиентных потоков: сверхзвуковых недорасширенных струях и в плоских ударных волнах. Эксперименты выполнены на вертикальной струйной установке ВСУ и на ударной трубе УТ-4М для жидкостей, различающихся по теплофизическим характеристикам. Исследование структуры двухфазных течений проводилось с использованием комплекса современных оптических методов диагностики, включая PIV-диагностику, метод лазерного ножа, метод теневой визуализации и метод высокоскоростной импульсной киносъемки с частотой 30000 кадр/с.

Изучены особенности поведения дисперсной фазы в трансзвуковых и сверхзвуковых струях при числах Вебера $We \geq 100$. Установлено, что присутствие жидкости существенно не нарушает основные градиентные структуры течения вплоть до средней массовой концентрации жидкости ~10%.

Показано, что моделирование таких течений требует учета не только масштабных факторов струи, но и релаксационных параметров капель, таких как длина скоростной релаксации и период индукции разрушения.

Детальные исследования релаксационных параметров капель в потоке за ударной волной в условиях деформации и разрушения проведены на ударной трубе [1]. Выполнены измерения аэродинамического сопротивления капли по динамике перемещения передней кромки и показана сильная его зависимость от времени наблюдения. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления капли воды в зависимости от безразмерного времени взаимодействия с УВ. Кривая 1 построена для $We = 400$; 2 – для $We = 1010$; 3 – для $We = 2250$.

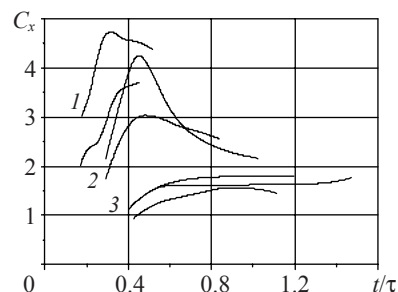


Рис. 1

Детально исследованы срывные типы разрушения капель, реализующиеся при $We \geq 100$. Рассмотрены два возможных механизма их реализации: 1) дробление за счет «обдирки» погранич-

ного слоя жидкости с капли («sheet stripping»), 2) срыв частиц с гребней волновых возмущений, образующихся на наветренной поверхности капли при развитии неустойчивости Кельвина – Гельмгольца («wave crest stripping»). Получены экспериментальные зависимости периода индукции дробления. На их основе выявлен критерий смены механизмов срывного разрушения капли и уточнены значения критических чисел Вебера, соответствующих различным жидкостям.

В качестве примера на рис. 2а, б представлены результаты измерения и расчета времени индукции разрушения капель гексана и воды соответственно в зависимости от скорости потока за фронтом ударной волны. На рисунках обозначено: 1 – расчет по выражению (1); 2 – расчет по выражению (2); квадратики – экспериментальные значения. Из условия наилучшего совпадения с результатами всех опытов получено, что значение коэффициента в формуле (2) равно $B = 480$.

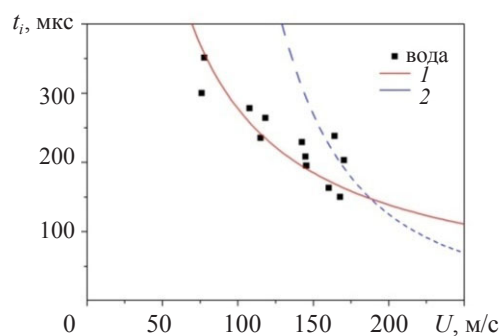
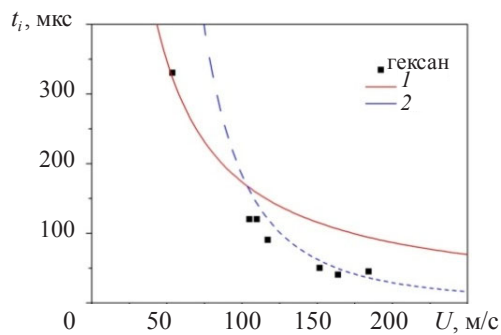


Рис. 2

Условие смены механизма можно сформулировать так: преимущественную роль в разрушении капли играет тот механизм, задержка которого меньше. Тогда, согласно [1], время индукции по первому механизму соответствует времени формирования пограничного слоя жидкости в экваториальной части материнской капли, а средние размеры вторичных микрокапель d_p , образующихся в результате «обдирки», оцениваются величиной порядка толщины пограничного слоя:

$$d_l \approx \delta_{\max} = 2.43d_0(\mu_l/\mu)^{1/2}(\rho_l/\rho)^{1/4} \text{Re}^{-1/2},$$

$$t_i \approx 0.37t_0 = 0.37(d_0/u)(\rho_l/\rho)^{1/2}. \quad (1)$$

Размеры микрочастиц при втором типе дробления оцениваются величиной, пропорциональной средней длине волны λ_s неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, а время индукции срыва – характерным временем развития неустойчивости [2]:

$$d_l = A\lambda_s, \quad \lambda_s = 9\pi\mu_l^{2/3}\sigma^{1/3}\rho^{-1/3}(\rho u^2/4)^{-2/3},$$

$$t_i = B\mu_l^{1/3}\sigma^{2/3}\rho^{1/3}(\rho u^2/4)^{-4/3}. \quad (2)$$

Смена механизмов происходит, если

$$0.37(d_0/u)(\rho_l/\rho)^{1/2} \geq$$

$$\geq 480\mu_l^{1/3}\sigma^{2/3}\rho^{1/3}(\rho u^2/4)^{-4/3}.$$

Отсюда получается простое выражение для критерия перехода от механизма «обдирки» к механизму неустойчивости Кельвина–Гельмгольца:

$$\text{We} \geq 1.65 \cdot 10^4 \text{Oh}^{0.4},$$

где $\text{We} = \rho u^2 d / \sigma$ – число Вебера, $\text{Oh} = \mu_l / (\rho_l d \sigma)^{0.5}$ – число Онезорге.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты №04-01-00235, 07-01-00318 и 10-01-00418).

Список литературы

1. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. О динамике дробления капель в ударных волнах // ПМТФ. 1987. №2. С. 108–115.
2. Ranger A.A. Shock wave propagation through a two-phase medium // Acta Astronaut. 1972. Vol. 17, No 4/5. P. 675–683.
3. Mayer E. Theory of liquid atomization in high velocity gas streams // ARS Journal. 1961. Vol. 31, No 12. P. 1783–1785.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL CHARACTERISTIC PROPERTIES OF THE SECONDARY AERODYNAMIC BREAKUP OF A LIQUID DROP IN GRADIENT FLOWS

V.M. Boiko, S.V. Poplavski

The results of systematical experimental studying of the behavior of drops of different liquids are presented for two kinds of high gradient flows: supersonic jets and incident shock waves. The investigation was carried out using modern hardware of optical methods including PIV, the laser knife method, shadow visualization and high velocity impact filming with the picture frequency of 30000 frames per second.

Keywords: aerodynamic dispersion of liquids, high gradient gas flows, optical methods of diagnostic.