

В.А. Архипов, И.М. Васенин, В.Ф. Трофимов, У.М. Шереметьева
Режимы деформации и дробления жидкокапельных аэрозолей

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете

Поступила в редакцию 18.01.2006 г.

Представлены результаты экспериментального исследования деформации и дробления капли при гравитационном осаждении жидкокапельных аэрозолей для двух режимов обтекания — при умеренных ($Re \approx 10 \div 100$) и малых ($Re \sim 1$) числах Рейнольдса и числах Бонда, близких к критическому значению: $\tilde{Bo}_{кр} = 22,5$.

Одним из наиболее существенных процессов, определяющих дисперсность жидкокапельных аэрозолей, является аэродинамическое дробление капель. При движении капли в потоке действующие на нее аэродинамические силы могут превышать силы поверхностного натяжения, в результате чего капля теряет устойчивость, деформируется и разрушается с образованием более мелких вторичных капель.

Данный процесс играет важную роль в формировании спектра размеров атмосферных осадков [1], в газовой динамике двухфазных потоков [2], а также при оценке экологических последствий, вызванных выбросом токсичных компонентов жидких ракетных топлив при авариях ракет-носителей [3–5].

Процессы деформации и дробления капель в потоке на протяжении многих лет изучались разными авторами. Обзоры по данной проблеме представлены в [6, 7]. В большинстве опубликованных работ основным параметром, от которого зависят деформация и дробление капли в потоке, считается число Вебера:

$$We = (\rho |\mathbf{u}_r|^2 D) / \sigma,$$

где $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_p - \mathbf{u}$ — относительная скорость движения капли диаметром D ; \mathbf{u}_p — вектор скорости капли; \mathbf{u} — вектор скорости газа; σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ — плотность среды (газ или жидкость), в которой движется капля. Значение числа Вебера $We_{кр}$, при котором происходит дробление капли, называется критическим. В зависимости от режима движения капли величина $We_{кр}$ лежит в широких пределах: $We = 12 \div 60$ [7].

В некоторых работах [2, 6–8] указывается, что при определенных условиях капля может дробиться в ускоряющемся потоке за счет неустойчивости Рэлея–Тейлора, которая наступает при достижении критического значения числа Бонда:

$$Bo = (\rho_p \omega D^2) / \sigma,$$

где ω — ускорение капли; ρ_p — плотность материала капли.

Можно показать, что критерии Бонда и Вебера связаны соотношением [2]:

$$Bo = \frac{3}{8} \frac{C_D}{|1 - \bar{\rho}|} \left(\frac{D_M}{D_0} \right)^2 We,$$

где C_D — коэффициент сопротивления; $(D_M/D_0)^2$ — отношение миделева сечения сплюснутого сфероида к сечению эквивалентного шара; $\bar{\rho} = \rho / \rho_p$.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования деформации одиночной первоначально сферической капли, движущейся под действием силы тяжести в другой жидкости при двух режимах обтекания — при умеренных ($Re \approx 10 \div 100$) и малых ($Re \sim 1$) числах Рейнольдса и малых числах Вебера ($We < We_{кр}$) в области чисел Бонда, близких к критическому: $\tilde{Bo}_{кр} = Bo_{кр} (1 - \bar{\rho}) = 22,5$ [2].

Выбор указанных режимов обтекания капли обусловлен следующими причинами. Работы, посвященные обтеканию сфероидов, рассматривают в основном течение либо при $Re \leq 1$, либо при $Re \gg 1$:

$$Re = \rho |\bar{u}_r| D / \mu,$$

где μ — коэффициент динамической вязкости обтекающего потока.

Область умеренных чисел Рейнольдса, определяемая условно диапазоном $1 \leq Re \leq 100$, изучена в меньшей степени. В то же время этот диапазон характерен для гравитационного осаждения жидкокапельных аэрозолей в атмосфере и требует детального исследования.

Из решения Адамара для капли, падающей в вязкой жидкости под действием силы тяжести при малых числах Рейнольдса, следует, что разность нормальных напряжений на всей поверхности сферической капли постоянна и не стремится деформировать каплю [8]. Исходя из этого, в монографии Бэтчелора [9] отмечается, что «если вязкости и плот-

ности двух жидкостей таковы, что малые значения чисел Рейнольдса позволяют пренебречь силами инерции, то, очевидно, нет никаких ограничений на размер жидкой сферы».

Проведенный в [2] линейный анализ задачи о нахождении критической совокупности параметров с учетом влияния внутреннего течения на форму капли показал, что для произвольных возмущений существование решения неоднородной задачи становится проблематичным при значении $\tilde{V}_{0кр} = 22,5$. С целью изучения поведения капли в области значений чисел Бонда, близких к критическому, было проведено исследование второго из указанных режимов обтекания.

Движение капли при умеренных числах Рейнольдса

В экспериментах с умеренными числами Рейнольдса исследовалось движение капли оливкового масла в растворе дистиллированной воды – этанола. Варьируя концентрацию этанола в растворе, несложно добиться сколь угодно малого отличия $\bar{\rho} = \rho/\rho_p$ от единицы. При этом скорость падения или всплытия капли можно варьировать в некоторых пределах, начиная от нуля.

Экспериментальное исследование движения и деформации капли проводилось на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1.

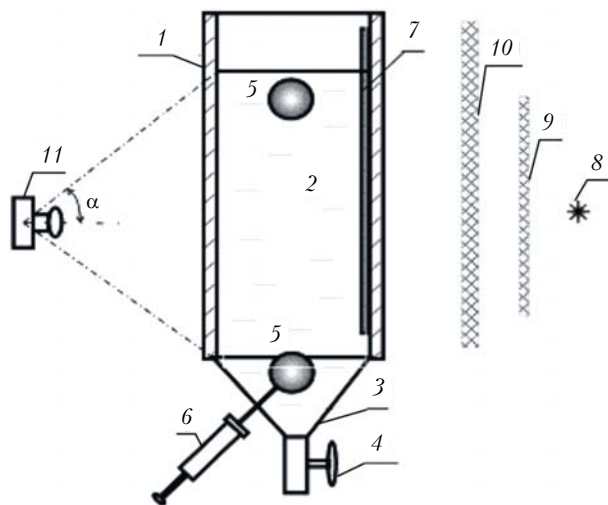


Рис. 1. Установка для исследования деформации капли

Установка состоит из кюветы с плоскопараллельными стенками, устройства для получения капель и системы визуализации течения. Кювета 1 изготовлена из органического стекла толщиной 5 мм. Размеры кюветы 58×58×800 мм и объем 2,7 л. Кювета установлена строго вертикально. В кювету заливается раствор этанола в дистиллированной воде 2. Слив раствора осуществляется через воронку 3, вклеенную в дно кюветы, и вентиль 4. Капли 5 получали путем выдавливания оливкового масла с помощью шприца 6 либо в нижнюю (через прокладку из вакуумной резины), либо в верхнюю части кюветы.

Для измерения скорости движения капли и ее размеров внутри кюветы вклеена масштабная линейка 7 с ценой деления 1 мм. Система визуализации состоит из лампы подсветки 8 мощностью 1 кВт, двух матовых рассеивателей 9 и 10 и кинокамеры «Конавас-автомат» 11 (размер кадра 18×24 мм). Кинокамера установлена на штативе, головка которого позволяет поворачивать камеру на угол $\pm 2\alpha$, обеспечивая тем самым съемку различных фаз движения капли.

При киносъемке движения капли масштабная линейка постоянно находилась в поле зрения объектива кинокамеры. Контрастность изображения капли оливкового масла в растворе достаточна для получения кинограмм, пригодных к обработке (рис. 2).

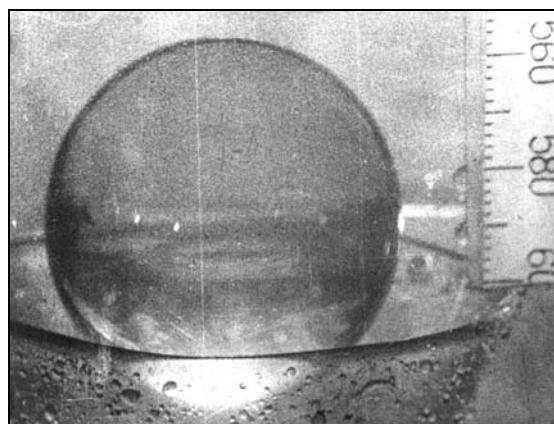


Рис. 2. Получение капли оливкового масла в водно-спиртовом растворе

Все эксперименты данной серии проводились при температуре +20 °С. Диаметр капель оливкового масла варьировался в диапазоне 10÷30 мм. Перед проведением каждого опыта оливковое масло нагревалось до температуры ~110 °С с целью выпаривания абсорбированной влаги. Изучалось движение капли в двух направлениях – вверх (всплытие) и вниз (падение) под действием силы тяжести.

Порядок проведения экспериментов следующий. Приготавливался и заливался в кювету водно-спиртовой раствор плотностью, близкой к плотности оливкового масла (для опытов с падением капли $\rho_p > \rho$ и для опытов со всплытием $\rho_p < \rho$). Заданный объем оливкового масла вводился шприцем в верхнюю (падение) или нижнюю (всплытие) части кюветы. При этом на конце иглы формировалась сферическая неподвижная капля. После этого игла резко убиралась. Для обеспечения движения капли в кювету добавлялся водно-спиртовой раствор, плотность которого несколько выше исходного (для всплытия капли) или ниже (для падения капли). Место ввода раствора – противоположное исходному положению капли. При движении капли проводилась ее киносъемка в различных сечениях кюветы. За время падения (всплытия) капли, которое составляло в данной серии экспериментов ~5 мин, проводилось 5–6 включений кинокамеры с темпом съемки 18 кадр./с.

Анализ кинограмм показал, что капля при своем движении принимает форму сплюснутого эллипсоида вращения (сфероида), малая ось которого ориентирована по направлению движения капли (рис. 3).

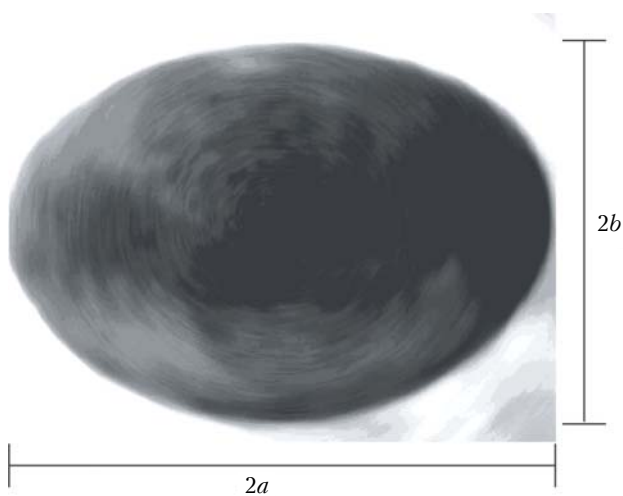


Рис. 3. Движение капли оливкового масла в водно-спиртовом растворе

При обработке кинограмм измерялись размеры большой ($2a$) и малой ($2b$) осей сфероида, осевая координата его центра масс и определялась скорость движения капли. Диаметр эквивалентной сферической капли (объем которой равен объему деформированной капли) рассчитывался по формуле

$$D_0 = 2\sqrt[3]{a^2b}.$$

По измеренным значениям $|\eta|$, D_0 рассчитывались критерии подобия – числа Рейнольдса, Вебера и Бонда.

Экспериментальные данные о степени деформации капли в зависимости от числа Вебера $\varepsilon = f(We)$ в диапазоне $Re \approx 10-100$ представлены на рис. 4.

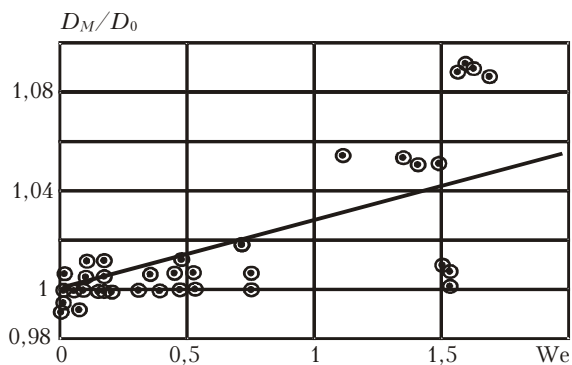


Рис. 4. Зависимость степени деформации капли от числа We

Здесь же приведена зависимость

$$\varepsilon = D_M/D_0 = 1 + 0,027 We,$$

полученная аппроксимацией результатов численного решения задачи [10].

Движение капли при малых числах Рейнольдса

Экспериментальное исследование движения капели при малых числах Рейнольдса проводилось на рассмотренной выше установке для другой пары модельных жидкостей (падение капли ртути в глицерине). При проведении опытов серьезной проблемой оказалось получение крупных капель ртути. В связи с большой плотностью и малой вязкостью ртути использование обычного капилляра не позволяет получить капли диаметром более 1–2 мм. Для получения капели ртути диаметром 5–10 мм использовалось специальное устройство, схема которого представлена на рис. 5 [11].

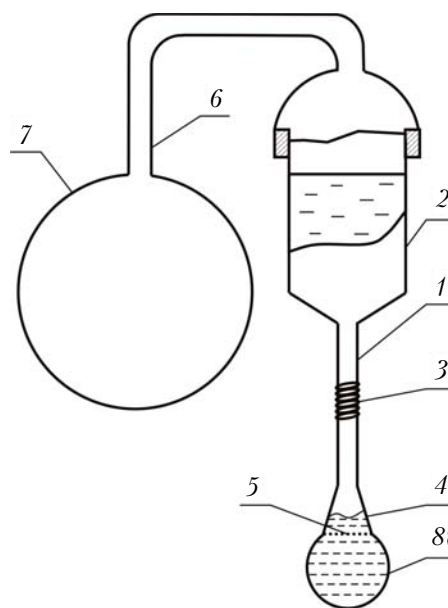


Рис. 5. Устройство для получения крупных капель ртути

Устройство представляет собой стеклянную трубку (капилляр) 1 с приемной воронкой 2 для подачи ртути. В капилляре путем перекручивания стеклянной трубки, нагретой до вязкопластичного состояния, изготовлен спиральный участок 3 с большим гидродинамическим сопротивлением. На конце капилляра припаян выходной раструб 4, диаметр которого подбирается опытным путем в диапазоне 5–10 мм. Раструб закрыт сеткой 5 с размером ячеек 1 мм, изготовленной из меди, полуженной припоем ПОС-40. Шланг 6 соединяет воронку 2 с резиновой грушей 7.

После заливки заданной порции ртути в воронку на металлической сетке, имеющей развитую поверхность, образуется капля 8, форма которой близка к сферической. При создании небольшого избыточного давления в капилляре (с помощью резиновой груши) капля увеличивается, отрывается от сетки и падает в кювету, заполненную глицерином, температура которого регистрируется. С помощью кинограмм снимается картина движения и деформации капли.

При исследовании движения капли при малых числах Рейнольдса (ртуть в глицерине) было установлено, что если диаметр капли меньше 8 мм, то капля устойчива и при падении сохраняет сферическую форму. Соответствующее значение $\tilde{Bo}_{кр} = 6,4$. При диаметре капли ~ 10 мм она неустойчива и при движении распадается на фрагменты. Соответствующее значение числа Бонда составляет при этом 10.

Необходимо отметить, что при получении капель диаметром более 8 мм их форма в исходном состоянии отличалась от сферической. Это связано с трудностью получения крупных сферических капель тяжелой маловязкой жидкости. Поэтому определенное в экспериментах критическое значение $\tilde{Bo} \sim 10$ следует рассматривать как оценку нижней границы устойчивости по числу \tilde{Bo} . Для исследования движения капель в области значений $\tilde{Bo} \sim 22,5$ необходимо получить исходную сферическую каплю диаметром ~ 15 мм. Модификации устройства для получения капель на основе капилляра не дали положительных результатов. Однако результаты проведенных экспериментов подтверждают существование диапазона чисел Бонда, равного $6,4 \div 10$, в котором капля, движущаяся при малых числах Рейнольдса, теряет устойчивость и дробится на фрагменты. Существование данного диапазона качественно подтверждает полученное теоретически значение $\tilde{Bo}_{кр} \sim 22,5$.

Выводы

Разработана установка для экспериментального исследования деформации капель, движущихся в вязком потоке при умеренных и малых значениях числа Рейнольдса.

Получена экспериментальная зависимость степени деформации капли от числа Вебера в диапазоне $Re \approx 10 \div 100$.

Сконструировано устройство для получения крупных капель тяжелой маловязкой жидкости.

Экспериментально подтверждена неустойчивость капли в диапазоне значений чисел Бонда больше 10 при малых значениях чисел Re и We .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 05-03-32729; 05-08-18237).

1. *Матвеев А.Т.* Основы общей метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 874 с.
2. *Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазун А.А., Трофимов В.Ф.* Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 286 с.
3. *Александров Э.Л.* О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 4. С. 36–45.
4. *Александров Э.Л.* Поведение жидких ракетных топлив в атмосфере // Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие / Под ред. В.В. Алдушина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. М.: АНКИЛ, 2000. 600 с.
5. *Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А., Матвиенко О.В., Шереметьева У.М.* Моделирование распространения аэрозольного облака при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 488–493.
6. *Гонор А.Л., Ривкинд В.Я.* Динамика капли // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 17. С. 86–159.
7. *Шрайбер А.А.* Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики. М.: ВИНТИ, 1988. Т. 3. С. 3–80.
8. *Нугматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
9. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 760 с.
10. *Бутов В.Г., Васенин И.М., Шрагер Г.Р.* Деформация капли в вязком потоке и условия существования ее равновесной формы // Прикл. мат. и мех. 1982. Т. 46. Вып. 6. С. 1045–1049.
11. А. с. № 1428462 СССР, МКИ В 01L. Устройство для получения капель / В.Ф. Трофимов, Н.А. Линина, К.Ж. Пузырь, А.А. Пупасов. Оpubл. в БИ. 1988. № 17.

V.A. Arkhipov, I.M. Vasenin, V.F. Trofimov, U.M. Sheremet'eva. Regimes of deformation and breaking of the liquid-drop aerosol.

Results of an experimental research of drop deformation and crushing at gravitational sedimentation of liquid-drop aerosols for two flow modes – at Reynolds's moderate numbers ($Re \approx 10 \div 100$) and at Reynolds's small numbers ($Re \sim 1$), and the Bond numbers close to critical value $\tilde{Bo}_{кр} = 22.5$ are presented.