

Экспериментальное исследование потери устойчивости формы капли в закрученном потоке

В.А. Архипов^{1,2}, А.П. Березиков³, В.Ф. Трофимов⁴, А.С. Усанина^{4*}

¹НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 26.01.2012 г.

Представлены результаты экспериментального исследования движения и деформации капли в закрученном потоке вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. Впервые показано, что при малых числах Рейнольдса деформация капли наблюдается при достижении некоторого критического значения числа Бонда. Экспериментально получена зависимость критического значения числа Бонда, соответствующего потере устойчивости формы капли по механизму Рэлея–Тейлора, от режима движения капли в диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 0,03 \div 0,84$).

Ключевые слова: вязкая жидкость, капля, критическое число Бонда, деформация, неустойчивость Рэлея–Тейлора; viscous liquid, drop, critical Bond number, breakdown, Rayleigh–Taylor instability.

Введение

Механизмы процессов разрушения капли на отдельные фрагменты являются одними из классических задач гидродинамики. Процесс деформации и дробления капли – чрезвычайно сложный и характеризуется взаимодействием сил поверхностного натяжения, вязкости и инерции. В классических работах по гидродинамике известны два механизма потери устойчивости при движении капли в потоке [1]. При достаточно больших числах Бонда (Bo) разрушение происходит из-за развития неустойчивости Рэлея–Тейлора, а при достаточно больших числах Вебера (We) – из-за развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

В работе [2] теоретически изучена возможность разрешимости задачи для осесимметричных возмущений капли, удерживаемой силами поверхностного натяжения в случае осесимметричных возмущений во внешнем потоке. В результате решения задачи на собственные значения чисел Бонда найдено критическое значение $Bo_{cr} \approx 90$, при котором первоначально сферическая частица начинает деформироваться и распадаться на более мелкие фрагменты. Данная проблема также изучалась в работах [1, 3].

В работе [4] предпринята попытка экспериментально подтвердить результаты указанных теоретических исследований. Однако используемая методика не позволила достичь требуемого режима движения капли, а именно $Re < 1$ и $Bo \approx Bo_{cr}$, поскольку для экспериментов требовалось получить исходную сферическую каплю диаметром 15 мм, что невозможно с помощью обычных капилляров.

Экспериментального подтверждения потери устойчивости капли для данного режима течения до настоящего времени не получено, что, по-видимому, связано с технической сложностью одновременного выполнения условий $Re < 1$, $Bo \approx Bo_{cr}$. В настоящей статье рассмотрены механизм потери устойчивости дисперсной фазы, условия возникновения и характер деформации капли в области малых чисел Рейнольдса при достижении некоторого критического значения числа Бонда.

Экспериментальная установка и методика исследования

Предложен новый способ исследования [5] устойчивости капли, движущейся в поле ускорения центробежных массовых сил, в области малых значений числа Рейнольдса ($Re < 1$) при значениях числа Бонда $Bo \approx 90$, позволяющий обеспечить более высокие значения числа Бонда при меньшем диаметре капли. Достижение больших значений числа Bo происходит за счет замены силы тяжести на

* Владимир Афанасьевич Архипов (leva@niipmm.tsu.ru); Алексей Петрович Березиков; Вячеслав Федорович Трофимов; Анна Сергеевна Усанина.

центробежные массовые силы. В рамках предложенного способа разработано устройство [6] (рис. 1).

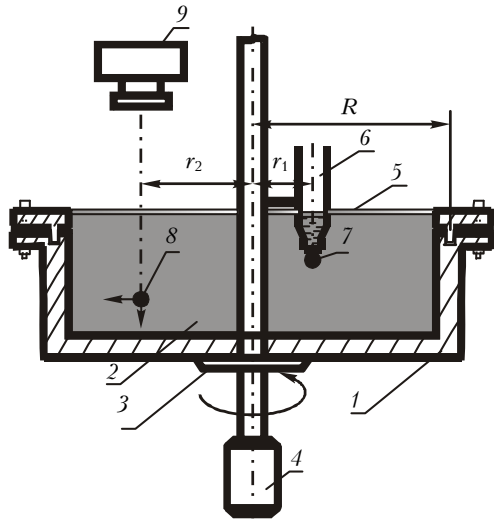


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования устойчивости формы капли: 1 – цилиндрический сосуд; 2 – рабочая жидкость; 3 – основание; 4 – электродвигатель; 5 – прозрачная крышка; 6 – устройство для получения капель; 7 – начальная капля; 8 – движущаяся капля; 9 – скоростная видеокамера

Устройство состоит из цилиндрического резервуара 1 радиусом 0,13 м и высотой 0,17 м, наполненного вязкой жидкостью 2.

Резервуар с рабочей жидкостью, установленный на основании 3, раскручивается с помощью электродвигателя 4 до необходимой угловой скорости n . Для того чтобы жидкость не выплескивалась при вращении, сверху резервуар закрыт прозрачной крышкой 5, обеспечивающей герметичность конструкции. Из устройства для получения капель 6, закрепленного на валу двигателя на расстоянии r_1 от оси вращения, начальная капля 7 поступает в резервуар с вязкой жидкостью. При этом капля 8 движется в радиальном направлении (к периферии резервуара) и одновременно движется вниз под действием силы тяжести. В процессе движения капли 8 ее деформация регистрируется скоростной видеокамерой 9.

Для обеспечения требуемого режима движения капли ($Re < 1$, $Bo = Bo_{cr}$) необходимо использовать каплю определенного размера, рабочую жидкость с определенным значением коэффициента динамической вязкости и вращать резервуар с определенной угловой скоростью. Оценка этих параметров проводилась с помощью следующих аналитических выражений соответственно:

$$D = \sqrt{\frac{\sigma Bo}{(\rho_p - \rho_l) g \sqrt{1 + k^2}}};$$

$$\mu_l > \left[\frac{\rho_l (\rho_p - \rho_l) D^3}{18} g \sqrt{1 + k^2} \right]^{0,5};$$

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{r}} \left\{ \left(\frac{\sigma Bo}{(\rho_p - \rho_l) D^2} \right)^2 - g^2 \right\}^{0,25},$$

где r – радиальная координата капли; σ – коэффициент пограничного натяжения; ρ_p – плотность материала капли; ρ_l – плотность рабочей жидкости; $k = \omega_{cf}/g$ – степень перегрузки; ω_{cf} – ускорение центробежных массовых сил; g – ускорение свободного падения; D – диаметр капли.

На описанной выше установке были проведены серии экспериментов по исследованию движения и деформации капель ртути в закрученном потоке вязкой жидкости. Результаты экспериментального исследования получены для следующего диапазона значений определяющих параметров: $D = 4 \div 6$ мм, $n = 4 \div 9$ оборотов за 1 с, $Re = 0,01 \div 4$, $Bo = 6,4 \div 456$, $We = 0,01 \div 20$. Скорость видеосъемки процесса движения капли в вязком потоке варьировалась в диапазоне 800–3000 кадр/с. При этом время экспозиции не превышало 0,1 мс.

В качестве рабочей жидкости использовался раствор хлористого цинка $ZnCl_2$ в глицерине. До и после проведения экспериментов проводились тщательные измерения физических характеристик рабочей жидкости. Результаты измерений показали, что плотность раствора и коэффициент пограничного натяжения равны $\rho_l = (1,27 \pm 0,02)$ г/см³, $\sigma = (0,300 \pm 0,015)$ Н/м соответственно. Значения вязкости рабочей жидкости варьировались в диапазоне $\mu_l = (2,2 \div 15,0)$ Па·с при температуре рабочей жидкости $T = 8 \div 20$ °С. Для вязкости и плотности ртути использовались табличные значения [7] при температуре 20 °С: $\mu_p = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho_p = 13,55$ г/см³.

Анализ результатов экспериментов

Результаты видеосъемки показали, что после введения капли ртути в резервуар с вязким раствором она движется по спиралевидной траектории, расширяющейся в направлении оси Oz (рис. 2). Вид спирали зависит от исходных параметров эксперимента.

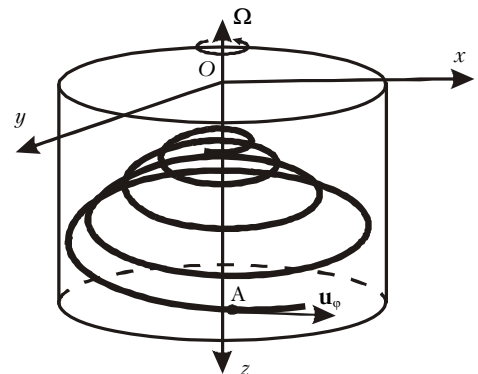


Рис. 2. Траектория движения капли: точка А – капля; u_ϕ – тангенциальная компонента вектора скорости капли

После введения капли ртути в резервуар с вязким раствором она движется в радиальном направлении к периферии резервуара с радиальной скоростью u_r , вниз с аксиальной скоростью u_z и по окружности с тангенциальной скоростью u_ϕ .

Радиальная u_r и тангенциальная u_ϕ компоненты скорости капли линейно возрастают с увеличением радиальной координаты. Было обнаружено отставание капли от несущего потока, которое уменьшается с увеличением вязкости рабочей жидкости и уменьшением диаметра капли. По мере движения капли к периферии резервуара значения чисел Рейнольдса, Вебера и Бонда возрастают. Критерии подобия вычислялись для условий конкретных экспериментов по следующим формулам:

$$Re = \frac{\rho_l \sqrt{u_z^2 + u_r^2 + (V_\phi - u_\phi)^2} D}{\mu_l};$$

$$We = \frac{\rho_l [u_z^2 + u_r^2 + (V_\phi - u_\phi)^2] D}{\sigma};$$

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

где V_ϕ – тангенциальная компонента вектора скорости вращающейся жидкости.

Поскольку капля одновременно движется в аксиальном, радиальном и тангенциальном направлениях, то суммарное ускорение массовых сил $|\omega|$, входящее в выражение для числа Бонда, складывается из трех компонент:

$$|\omega| = \sqrt{|\omega_z|^2 + |\omega_r|^2 + |\omega_\phi|^2}.$$

Здесь

$$|\omega_z| = g(\rho_p - \rho_l) / \rho_p, \quad |\omega_r| = (u_r^2 - V_\phi^2 \rho_l / \rho_p) / r,$$

$$|\omega_\phi| = u_r u_\phi / r.$$

При некотором критическом наборе параметров D , n и μ_l начинается деформация капли, причем степень деформации увеличивается с возрастанием радиальной координаты (рис. 3).

Во всех проведенных экспериментах качественная картина деформации была одинаковой и характеризовалась образованием осесимметричной «вмятины» со стороны, противоположной направлению суммарного вектора ускорения капли ω . В зависимости от начальных параметров эксперимента было обнаружено отклонение ориентации «вмятины» от радиального направления (от оси Or), вызванное действием силы Кориолиса.

На начальном этапе потери устойчивости капли происходит незначительная деформация сферической формы, проявляющаяся в образовании небольшой «вмятины» на поверхности капли. По мере увеличения числа Бонда или числа Рейнольдса размер «вмятины» увеличивается и затем наряду с появлением «вмятины» наблюдается сплющивание капли.

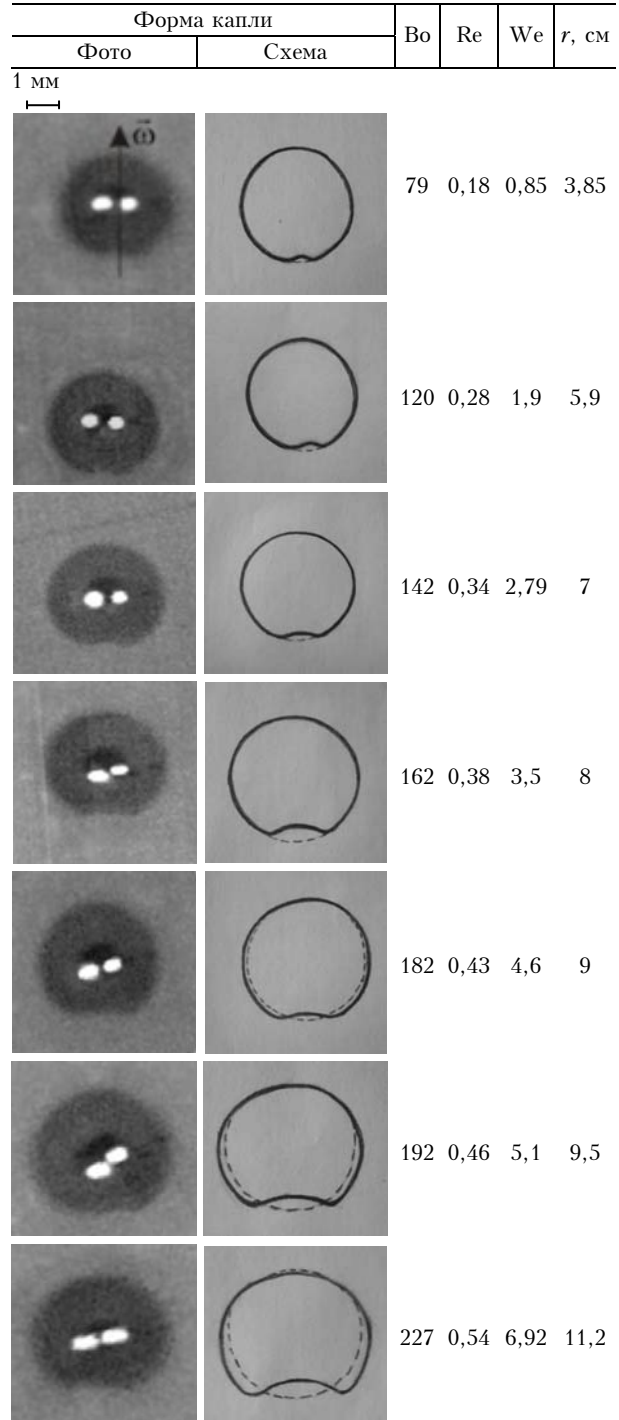


Рис. 3. Форма капли в зависимости от радиальной координаты ($D = 6$ мм, $\mu_l = 7,67$ Па · с, $n = 6,06$ об/с)

Отметим, что величина угла β , характеризующего отклонение ориентации «вмятины» от радиального направления (от оси Or), зависит от начальных параметров эксперимента и определяется отношением тангенциальной и радиальной компонент вектора ускорения массовых сил ω :

$$\beta = \arctg |\omega_\phi| / |\omega_r|. \quad (1)$$

Значение угла β тем больше, чем больше сила Кориолиса. Сравнение экспериментальных значений угла β и рассчитанных по формуле (1) показало, что отклонение составляет не более 10° для всего диапазона исследуемых параметров.

При анализе условий потери устойчивости формы капли показано, что критическое значение числа Бонда, соответствующее началу деформации капли в области $Re < 1$, существенно зависит от вязкости рабочей жидкости (или числа Рейнольдса). Из рис. 4 видно, что значение Bo_{cr} аппроксимируется с погрешностью не более 8% эмпирической формулой (сплошная линия):

$$Bo_{cr} = 3,8 \exp(2,3/(Re + 0,5)).$$

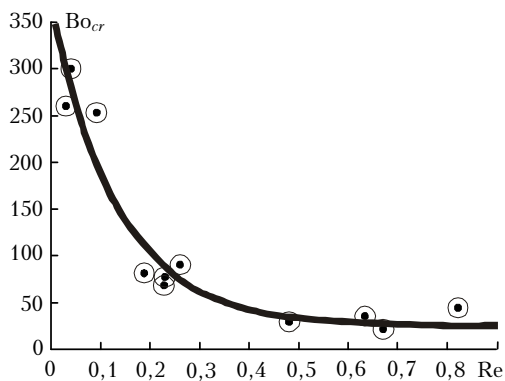


Рис. 4. Зависимости критических значений числа Бонда от числа Рейнольдса

Для анализа механизма, по которому происходит потеря устойчивости формы капли, проведена оценка действующих на каплю сил. Анализ экспериментальных данных показал, что для проведенных экспериментов потеря устойчивости формы капли связана с механизмом Рэлея–Тейлора.

Поскольку на основном участке траектории капля движется в квазистационарном режиме, то из уравнения движения капли, записанного в проекции на ось вектора ускорения массовых сил ω , для квазистационарного режима движения получим

$$Bo = 3C_D We / 4. \quad (2)$$

При равенстве конкурирующих сил, действующих на каплю, найдены граничные значения числа Бонда и Вебера: $Bo_* = 6$, $We_* = 8$. С учетом зависимости (2) для стоксовского режима ($C_D = 24/Re$) соответствующее граничное значение числа Рейнольдса Re_* , отделяющее области с разным механизмом потери устойчивости капли, равно

$$Re_* = 18We_*/Bo_* = 24.$$

При $Re \ll Re_*$ потеря устойчивости капли происходит по механизму Рэлея–Тейлора, а при $Re \gg Re_*$ — по механизму Кельвина–Гельмгольца.

На рис. 5 приведена зависимость (2), полученная при различных выражениях для коэффициента сопротивления C_D [1]: 1 — по формуле Стокса; 2 — по формуле Рыбчинского–Адамара; 3 — по формуле Клячко.

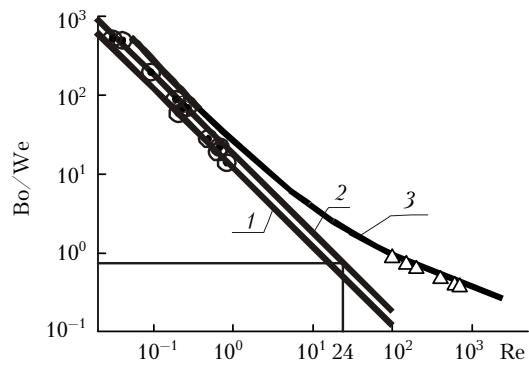


Рис. 5. Зависимость Bo/We от Re для разных C_D : точки — наши экспериментальные данные при $Re < 1$; Δ — экспериментальные данные при $Re > 100$ [8]

Приведенные на рис. 4 экспериментальные данные, полученные нами при $Re < 1$, и данные [8] при $Re > 100$ хорошо описываются единой зависимостью $Bo/We = f(Re)$. При этом граничное значение числа Рейнольдса $Re_* = 24$ отделяет области с разным механизмом потери устойчивости капли — механизм Рэлея–Тейлора (при $Re \ll Re_*$) и Кельвина–Гельмгольца (при $Re \gg Re_*$).

Отметим, что приведенная зависимость $Bo/We = f(Re)$ с точностью до постоянного коэффициента в формуле (2) соответствует известной зависимости коэффициента сопротивления твердой сферической частицы от числа Рейнольдса (стандартной кривой сопротивления).

Заключение

На основе анализа полученных экспериментальных и теоретических данных по потере устойчивости формы капли в закрученном потоке вязкой жидкости сформулированы следующие выводы.

Предложен новый способ исследования потери устойчивости формы капли в области $Re < 1$, заключающийся в замене ускорения свободного падения на ускорение центробежных массовых сил. Для реализации этого способа разработана установка, позволяющая определять устойчивость формы капли ртути в закрученном потоке вязкой жидкости.

Разработана физико-математическая модель движения капли в закрученном потоке вязкой жидкости с учетом ее гравитационного осаждения, на основе которой проанализированы режимы движения капли и получены исходные данные для проведения экспериментов в заданных диапазонах критериев подобия $Re = 0,01 \div 4$, $Bo = 6,4 \div 460$, $We = 0,01 \div 20$. Показана необходимость учета силы Кориолиса при расчете суммарного ускорения капли.

На данной установке проведена серия экспериментов по анализу характеристик движения и деформации капли ртути в вязкой жидкости (раствор хлористого цинка в глицерине с $\mu_l \leq 15$ Па·с). Впервые экспериментально обнаружена потеря устойчивости сферической формы капли при $Re < 1$, проявляющаяся в образовании осесимметричной «вмятины» со стороны, противоположной направлению суммарного вектора массовых сил.

Показано, что в области малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$) потеря устойчивости формы капли происходит по механизму Рэля–Тейлора при достижении некоторого критического значения числа Бонда. При этом критическое значение числа Бонда, соответствующее началу деформации границы раздела фаз, существенно зависит от режима движения (числа Рейнольдса) и монотонно уменьшается от 300 до 20 в диапазоне $Re = 0,03 \div 0,84$.

Показано, что результаты по потере устойчивости формы капли при $Re < 1$, обработанные в координатах Re , Bo/We , удовлетворительно описываются единой зависимостью $Bo/We = f(Re)$, которая позволяет выделить граничное значение числа Рейнольдса.

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 264 с.

3. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles. N. Y.: Academic Press, 1978. 378 p.

4. Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф., Шереметьева У.М. Режимы деформации и дробления жидкокапельных аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 526–529.

5. Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С., Ткаченко А.С. Метод оценки условий потери устойчивости капли в закрученном потоке // Изв. вузов. Физ. 2010. Т. 55, № 12/2. С. 14–21.

6. Устройство для исследования устойчивости движения капель: Пат. Российская Федерация: МПК В01L 99/00 / Архипов В.А., Березиков А.П., Васенин И.М., Трофимов В.Ф., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. № 2394649; заявл. 27.04.2009; опубл. 20.07.2010, электронный бюл. «Изобретения. Полезные модели». № 33.

7. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наук. думка, 1974. 984 с.

8. Корсунов Ю.А., Тишин А.П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 2. С. 182–186.

V.A. Arkhipov, A.P. Berezikov, V.F. Trofimov, A.S. Usanina. Experimental study of the loss of the droplet shape stability in a skirling flow.

The results of experimental study of drop movement and breakdown in a skirling viscous flow at small Reynolds numbers are presented. For the first time it is shown that at small Reynolds numbers the drop breakdown is observed at some critical Bond number values. The dependence of the critical Bond number value corresponding to drop shape instability by Rayleigh–Taylor mechanism from drop movement regime at Reynolds numbers $Re = 0.03 \div 0.84$ is experimentally found.