

УДК 532.529.6

*А. А. Антонникова, В. А. Архипов, С. А. Басалаев, К. Г. Перфильева, А. С. Усанина, Г. Р. Шрагер***ДЕФОРМАЦИЯ КАПЛИ ПРИ ЕЕ ГРАВИТАЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ  
В УСЛОВИЯХ ОБДУВА ВСТРЕЧНЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА**

*Представлены результаты экспериментального исследования процесса потери устойчивости формы вязкой капли при ее гравитационном осаждении в условиях обдува встречным потоком воздуха при малых числах Вебера ( $We < 7$ ). Предложена новая схема установки для исследования деформации капли аэродинамическими силами, с помощью которой получены качественная картина деформации капли и эмпирическая зависимость степени деформации от числа Вебера в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 490–2070$ .*

**Ключевые слова:** капля, обдувающий поток, степень деформации, число Вебера, число Бонда, число Рейнольдса, экспериментальное исследование.

**Введение.** Закономерности деформации и дробления капель в двухфазном потоке относятся к фундаментальным задачам гидромеханики двухфазных потоков и представляют интерес при решении прикладных задач, связанных с подводной акустикой, образованием атмосферных осадков, с двухфазными течениями в энергоустановках, кавитацией и т. д. Одним из важных аспектов для любых задач газодинамики двухфазных течений является зависимость степени деформации капель от параметров дисперсионной и дисперсной фаз.

Аналитический обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований по закономерностям деформации и дробления капель в двухфазном потоке показал, что к основным направлениям исследований по рассматриваемой проблеме относятся закономерности разрушения капель за ударными волнами в газе и за волнами разрежения, особенности безударного дробления капель, влияние формы капли на ее сопротивление при движении в потоке, механизм турбулентного дробления капель, определение критических значений чисел Бонда и Вебера, соответствующих началу деформации и дробления капель, математическое моделирование потери устойчивости формы капли в потоке.

Основные результаты, связанные с рассматриваемой проблемой, приведены в классических работах [1–8]. Известные результаты теоретических исследований деформации и дробления капель имеют ограниченное применение, поскольку получены на основе приближенного учета только некоторых факторов из большого набора параметров, определяющих явление в целом. Экспериментальные исследования, затрагивающие исследуемую проблему, позволили получить классификацию основных типов дробления капли в газовом потоке, выявить зависимости потери устойчивости формы капли от числа Вебера, установить характерные времена деформации и дробления, изучить влияние на дробление капли вязкости жидкой фазы, времени воздействия потока на каплю и его неоднородности, влияние интенсивности ударной волны и скорости газа.

В экспериментальных и теоретических исследованиях рассматривают два механизма потери устойчивости формы капли — неустойчивости Рэлея–Тейлора и Кельвина–Гельмгольца [1], возникающие при достижении критических значений чисел Бонда и Вебера соответственно. Вместе с тем, из-за недостатка экспериментальных данных и их противоречивости не представляется возможным установить точные критериальные границы между известными механизмами деформации капли.

Анализ литературы показал, что подавляющее большинство экспериментальных работ посвящено изучению дробления капель, реализуемого при достижении критического значения числа Вебера, которое варьируется в диапазоне  $We_{cr} = 8–17$  в зависимости от условий обдува [7]. Вопросом деформации капли в докритическом режиме обдува посвящено значительно меньшее количество публикаций.

---

Национальный исследовательский Томский государственный университет. Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36; э-почта: leva@niipmm.tsu.ru, usaninaanna@mail.ru. Поступила 14.07.2017.

В связи с развитием современных методов — электродиффузионный метод измерения касательных напряжений и локальной скорости потока, метод стробоскопической визуализации частиц, метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry), теневой метод цветной гильберт-визуализации, подход Planar Fluorescence for Bubbles Imaging — в последние годы появился ряд публикаций, посвященных уточнению закономерностей деформации капли в потоке [9–16]. Приведенные в них результаты получены в основном в условиях внезапного воздействия потока на каплю. Квазистационарное воздействие капли с потоком изучено гораздо менее подробно, хотя имеет большое значение для исследования поведения капель в двухфазных потоках.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных количественных зависимостей, описывающих процесс потери устойчивости формы капли жидкости и ее деформации при гравитационном осаждении в условиях обдува встречным потоком воздуха при докритических числах Вебера ( $We < We_{cr}$ ). Деформация капли приводит к увеличению ее миделева сечения и, соответственно, к увеличению силы сопротивления, что необходимо учитывать при расчете двухфазных течений с деформируемыми частицами дисперсной фазы.

**Экспериментальная установка и методика исследования.** Исследование проводилось на установке, состоящей из вертикально расположенной бюретки с запорным краном, системы подачи обдувающего падающую каплю встречного потока воздуха и системы визуализации [17]. В экспериментах анализировались деформации капель глицерина и касторового масла. Физические свойства глицерина и касторового масла приведены в табл. 1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Таблица 1. Физические свойства используемых жидкостей

Жидкость	$\rho_{др}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_{др}$ , Па · с	$\sigma$ , м/с <sup>2</sup>
Касторовое масло	960	0.987	$35.4 \cdot 10^{-3}$
Глицерин	1260	1.4	$59.4 \cdot 10^{-3}$

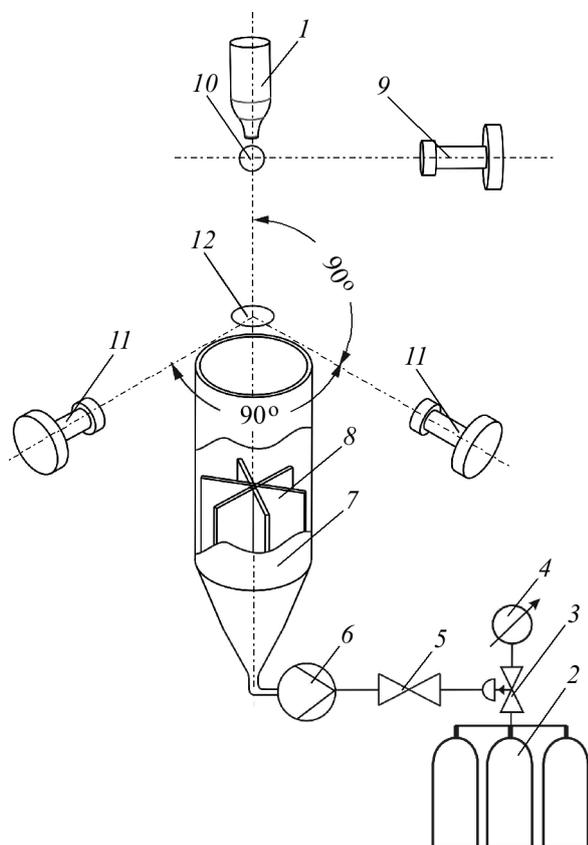


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования деформации капли в условиях обдувающего потока воздуха: 1 — капельница; 2 — батарея баллонов; 3 — редуктор; 4 — контрольный манометр; 5 — регулирующий вентиль; 6 — расходомер; 7 — цилиндрический патрубок; 8 — формирователь потока; 9 — видеокамера; 10 — исходная капля; 11 — высокоскоростные видеокамеры; 12 — деформированная капля

Система визуализации включала видеокамеру, расположенную с возможностью регистрации исходной капли на срезе выходного отверстия бюретки, и две высокоскоростные видеокамеры, расположенные с возможностью регистрации деформированной капли в перпендикулярных плоскостях в выходном сечении патрубка. Для регистрации исходной сферической капли использовалась цифровая видеокамера Panasonic HDC-SD60, а для регистрации деформированной капли — две высокоскоростные видеокамеры Citius C100 Centurio. Видеорегистрация проводилась с пространственным разрешением  $384 \times 790$  пикселей с темпом 300 кадров в секунду и временем экспозиции 0.5–2.0 мс. Для контроля расстояния, пройденного каплей, использовалась масштабная линейка с ценой деления 1 мм.

Система подачи воздуха содержит батарею баллонов со сжатым воздухом, соединенную трубопроводом через редуктор с контрольным манометром, регулирующий вентиль и расходомер с нижним входом цилиндрического патрубка, расположенного соосно с капилляром. В патрубке расположен формирователь потока, выполненный в виде шести симметрично расположенных по радиусам патрубка пластин.

Исследование деформации капли проводилось следующим образом. С помощью редуктора устанавливался заданный объемный расход воздуха, измеряемый расходомером. С помощью бюретки формировалась исходная сферическая капля рабочей жидкости. В момент отрыва капли ее форма и диаметр фиксировались видеокамерой 9. После отрыва исходной капли от бюретки происходило ее гравитационное осаждение под действием силы тяжести. На падающую каплю воздействовал встречный равномерный поток воздуха из патрубка, под действием которого капля деформировалась. При помощи двух высокоскоростных видеокамер, расположенных вблизи выходного сечения патрубка, фиксировались размер и скорость движения деформированной капли.

С целью получения исходной капли строго сферической формы диаметр выходного отверстия бюретки  $d_{\text{cap}}$ , диаметр исходной сферической капли  $D_0$ , внутренний диаметр  $d_{\text{в.п}}$  и длина патрубка  $l_{\text{в.п}}$  выбирались из условий

$$d_{\text{cap}} \leq \frac{1}{6} \sqrt{\frac{\sigma \text{Bo}_{\text{cr}}^3}{g \rho_{\text{др}}}}, \quad D_0 \leq \sqrt[3]{\frac{6\sigma d_{\text{cap}}}{g \rho_{\text{др}}}}, \quad d_{\text{в.п}} \geq 5D_0, \quad l_{\text{в.п}} \geq 10d_{\text{в.п}},$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\text{Bo}_{\text{cr}} = 4.5$  — критическое значение числа Бонда [18];  $g = 9.80665 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{др}}$  — плотность материала капли. В экспериментах использовался патрубок диаметром  $d_{\text{в.п}} = 24 \text{ мм}$  и длиной  $l_{\text{в.п}} = 240 \text{ мм}$ . Диаметр выходного отверстия бюретки варьировался в диапазоне  $d_{\text{cap}} = 0.8\text{--}2.5 \text{ мм}$ .

Соотношение для диаметра выходного отверстия бюретки получено из условия получения исходной капли строго сферической формы. Уравнение, связывающее массу образующейся капли с условием разрыва по периметру смачивания (периметру поперечного сечения выходного отверстия бюретки), имеет вид [19]:

$$mg = \pi d_{\text{cap}} \sigma, \quad (1)$$

где  $m$  — масса капли;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Массу сферической капли можно представить в виде

$$m = \rho_{\text{др}} \frac{\pi D_0^3}{6}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим формулу для расчета диаметра образующейся капли:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{6\sigma d_{\text{cap}}}{\rho_{\text{др}} g}}. \quad (3)$$

Критерием, определяющим деформацию капли за счет массовых сил (силы тяжести), является число Бонда

$$Bo = \frac{\rho_{dr} D_0^2 g}{\sigma}, \quad (4)$$

которое характеризует отношение массовых сил к силам поверхностного натяжения. При достижении некоторого критического значения числа Бонда  $Bo_*$  капля теряет сферическую форму и деформируется под действием массовых сил. Следовательно, для получения исходной капли строго сферической формы необходимо выполнение условия

$$Bo \leq Bo_* . \quad (5)$$

Подставляя в неравенство (5) выражение для числа Бонда (4), получим условие, обеспечивающее существование сферической капли:

$$D_0 \leq \sqrt[3]{\frac{6\sigma d_{cap}}{g\rho_{dr}}} . \quad (6)$$

Подставляя в (6) формулу для диаметра капли (3), получим соотношение для диаметра капилляра, обеспечивающее получение строго сферической капли:

$$d_{cap} \leq \frac{1}{6} \sqrt{\frac{\sigma Bo_*^3}{g\rho_{dr}}} .$$

Соотношение для длины патрубков  $l_{b,p} \geq 10d_{b,p}$  определено экспериментально из условия равномерности измеренного цилиндрическим зондом профиля скорости потока воздуха в выходном сечении патрубка. Для значения  $l_{b,p} < 10d_{b,p}$  равномерный профиль скорости в патрубке не успевает сформироваться. Соотношение для диаметра патрубка  $d_{b,p} \geq 5D_0$  также определено экспериментально и обеспечивает симметричный обдув капли потока воздуха. При этом исключаются эффекты искривления траектории падающей капли.

За счет обеспечения строго контролируемых условий обдува исходной сферической капли, простоты экспериментального оборудования и юстировки измерительной аппаратуры повышается точность измерения степени деформации капли и параметров исследуемого процесса, таких как размер исходной и деформируемой капель, скорость капли и обдувающего потока.

**Измеряемые параметры.** Во время экспериментов проводились измерения всех основных параметров процесса — плотности материала капли  $\rho_{dr}$ , диаметра исходной капли  $D_0$ , скорости осаждения капли  $u_{dr}$ , скорости потока воздуха  $u$ , степени деформации  $\epsilon$ . Плотность материала используемых жидкостей составляла  $\rho_{dr} = 960\text{--}1260 \text{ кг/м}^3$  и измерялась ареометром с относительной погрешностью  $\delta\rho_{dr} = 0.1\%$ .

Диаметр исходной капли  $D_0$  определялся путем покадровой обработки результатов видеосъемки с использованием программного обеспечения CorelDRAW. Погрешность измерения  $D_0$ , связанная с искажением изображения и разрешающей способности видеокамеры, составляла  $\pm 0.2$  мм. В экспериментах диаметр исходной сферической капли варьировался в диапазоне  $D_0 = 25\text{--}39$  мм.

Скорость движения капли  $u_{dr}$  находилась покадровой обработкой результатов скоростной видеосъемки. Скорость капли на некоторой высоте  $h_i$  (где  $i$  — номер кадра) вблизи выходного отверстия патрубка вычислялась по формуле

$$u_{dr}(h_i) = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{\Delta t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $h_{i+1}$ ,  $h_{i-1}$  — пройденные каплей расстояния на  $i - 1$  и  $i + 1$  кадрах;  $\Delta t_i$  — интервал времени между  $i - 1$  и  $i + 1$  кадрами;  $n$  — количество кадров. Расстояние  $h_i$  измеряется с использованием программного обеспечения CorelDRAW. Погрешность измерения скорости капли не превышала 1%.

Для измерения объемного расхода воздуха  $Q$  использовался турбинный расходомер, отградуированный с помощью барабанного газосчетчика ГСБ-400 класса 1 [20] (погрешность измерения расхода не более 1%). Величина объемного расхода в экспериментах варьировалась в диапазоне  $Q = 4\text{--}10.8 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Скорость потока воздуха  $u$  определялась по формуле

$$u = \frac{Q}{S_{b,p}} = \frac{4Q}{\pi d_{b,p}^2},$$

где  $S_{b,p}$  — площадь поперечного сечения патрубка. В экспериментах скорость потока варьировалась в диапазоне  $u = 2.5\text{--}6.6$  м/с.

Погрешность измерения диаметра патрубка  $d_{b,p}$  при использовании стандартных измерительных приборов (микрометр, измерительный микроскоп) составляла менее (0.1–0.2)%. Погрешность измерения скорости потока воздуха  $\delta u$  зависит от класса точности расходомера. В проведенных экспериментах  $\delta u$  не превышала 1% при использовании прибора класса 1 [20].

Степень деформации капли определялась по формуле

$$\varepsilon = \frac{D_m}{D_0},$$

где  $D_m$  — диаметр миделева сечения деформированной капли.

При обработке результатов экспериментов рассчитывались значения чисел Бонда, Рейнольдса и Вебера:

$$Bo = \frac{\rho_{dr} D_0^2 g}{\sigma}, \quad Re = \frac{\rho U D_0}{\mu}, \quad We = \frac{\rho U^2 D_0}{\sigma}, \quad (7)$$

где  $U = u + u_{dr}$  — относительная скорость движения капли. Справочные данные по  $\rho$  и  $\mu$  выбирались с учетом температуры воздуха [21]:  $\rho = 1.205$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 1.808 \cdot 10^{-5}$  Па · с. При расчете безразмерных критериев подобия значения  $\sigma$  для проведенных экспериментов (табл. 1) брались из справочника [21].

**Результаты экспериментов и их анализ.** Эксперименты по потере устойчивости формы капли при ее обдуве встречным потоком воздуха проведены в диапазонах чисел Рейнольдса  $Re = 490\text{--}2070$ , Бонда  $Bo = 1.2\text{--}3.4$ , Вебера  $We = 0.6\text{--}6.9$ , степени деформации  $\varepsilon = 1\text{--}3.7$  и относительной скорости капли  $U = 3\text{--}8$  м/с.

Анализ результатов видеосъемки процесса осаждения капли во встречном потоке воздуха позволил проанализировать форму деформированной капли. Характер деформации капли для исследованных в экспериментах жидкостей и размеров исходных капель одинаковый и проявляется в образовании "каверны" в ее тыловой части и сплющивании капли в направлении движения. Формы деформированных капель глицерина при различных значениях объемного расхода воздуха приведены в табл. 2. В этой таблице также указаны значения степени деформации  $\varepsilon$ , чисел  $Re$  и  $We$ .

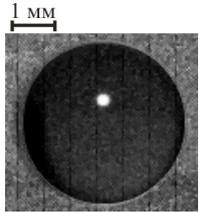
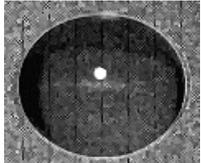
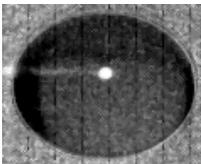
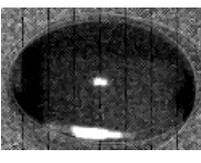
Проведен анализ зависимости степени деформации капли от числа Вебера. Обнаружено, что с увеличением числа Вебера (или скорости обдувающего потока) степень деформации капли монотонно возрастает (рис. 2). На основе регрессионного анализа для исследованных диапазонов чисел Бонда и Вебера получена эмпирическая зависимость для степени деформации капли (кривая 1 на рис. 2) с коэффициентом детерминации, равным  $R^2 = 0.996$ :

$$\varepsilon = 1 + 2.5 \cdot 10^{-3} \exp(1.07We). \quad (8)$$

Представляет интерес сравнение результатов математического моделирования исследуемого процесса с полученными экспериментальными данными. При проведении расчетов использовалась математическая модель деформации одиночной капли в потоке при наличии подвижной поверхности раздела [22]. Модель включает полные уравнения Навье–Стокса как внутри капли, так и во внешнем потоке в предположении ламинарности течения. Граничные условия на поверхности раздела предполагают непрерывность составляющих вектора скорости и напряжений. Эволюция поверхности раздела осуществляется в соответствии с кинематическим условием. Модель позволяет получать стационарное решение при условии его существования, а также прогнозировать критическое значение числа Вебера, при котором осуществляется дробление капли, с привлечением дополнительного алгоритма определения условий устойчивости формы равновесной деформированной капли. Результаты численных расчетов деформации капли с использованием алгоритма на базе конечно-разностного метода позволили получить аппроксимационную формулу

$$\varepsilon = 1 + 0.025We. \quad (9)$$

Таблица 2. Деформация капли глицерина в условиях обдува встречным потоком воздуха при  $Bo = 3$  ( $D_0 = 3.9$  мм,  $d_{cap} = 2.5$  мм)

Фото капли	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$u_{dr}, \text{ м/с}$	$u, \text{ м/с}$	We	Re	$\varepsilon$
	0	2.98	0	0.66	770	1.01
	4	2.76	2.46	2.04	1350	1.07
	6	2.68	3.68	3.02	1650	1.08
	8	2.44	4.9	4.04	1900	1.15
	10	1.87	6.14	4.8	2070	1.43

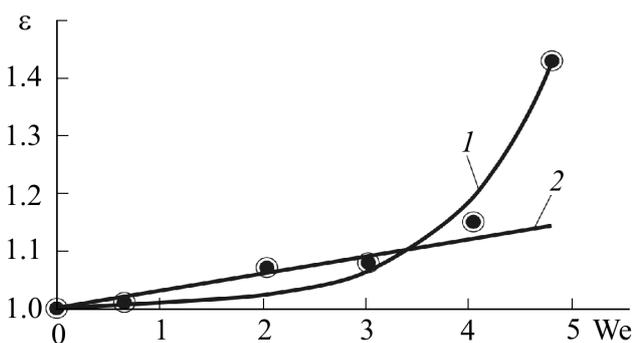


Рис. 2. Зависимость  $\varepsilon(We)$  для капли глицерина ( $D_0 = 3.9$  мм,  $d_{cap} = 2.5$  мм)

На рис. 2 представлены зависимости (8) и (9), их сравнение демонстрирует хорошее согласование в диапазоне чисел Вебера  $We < 4$ . С увеличением числа Вебера ( $We > 5$ ) расчетные значения степени деформации ниже экспериментальных (расхождение до 25% при  $We \sim 4.8$ ). Таким образом, результаты опытов дают экспериментальное подтверждение полученной теоретической зависимости (9) для чисел Вебера  $We < 4$ .

В математическом моделировании рассматриваемого процесса могут быть использованы различные подходы определения деформации капли: из кинематического условия на поверхно-

сти раздела двух сред; решение дифференциального уравнения, определяющего условие для нормальных напряжений с учетом капиллярного давления и т. п. Согласование теоретических и экспериментальных результатов подтверждает адекватность математической модели и способствует выбору алгоритма получения решения. В частности, для работы [22] экспериментальные данные позволяют количественно оценить степень адекватности использования математического условия для определения эволюции формы капли в докритическом режиме.

Для анализа механизма, по которому происходит потеря устойчивости формы капли, проведем оценку действующих на каплю сил. Данная оценка представляет интерес, так как в общепринятой форме числа Бонда и Вебера (7) записываются с точностью до постоянных коэффициентов. Полагаем, что на единичную площадку  $dS$ , расположенную на поверхности капли, действуют следующие силы:

1. Сила скоростного напора (динамического давления), которая для лобовой точки капли равна

$$F_{\text{дн}} = p_{\text{дн}} dS = \frac{\rho |U|^2}{2} dS, \quad (10)$$

где  $p_{\text{дн}}$  — динамическое давление.

2. Сила поверхностного натяжения, определяемая формулой Лапласа

$$F_{\sigma} = p_{\sigma} dS = \frac{4\sigma}{D} dS, \quad (11)$$

где  $p_{\sigma}$  — поверхностное давление.

3. Суммарная массовая сила

$$F_{\omega} = p_{\omega} dS = \frac{m|\omega|}{dS} dS,$$

где  $p_{\omega}$  — давление, создаваемое массовыми силами;  $|\omega|$  — суммарное ускорение массовых сил.

Полагая  $m = \rho_{\text{др}} \pi D_0^3 / 6$ ,  $dS = \pi D_0^2 / 4$ , получим

$$F_{\omega} = \frac{2}{3} \rho_{\text{др}} |\omega| D_0 dS. \quad (12)$$

С учетом (10)–(12) можно получить выражения для оценки вклада рассмотренных сил в числа Вебера и Бонда:

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_{\text{дн}}}{F_{\sigma}} &= \frac{1}{8} \frac{\rho |U|^2 D_0}{\sigma} = \frac{1}{8} \text{We}, \\ \frac{F_{\omega}}{F_{\sigma}} &= \frac{1}{6} \frac{\rho_{\text{др}} |\omega| D_0^2}{\sigma} = \frac{1}{6} \text{Bo}. \end{aligned} \right\}$$

Введем граничные значения числа Бонда  $\text{Bo}_*$  и числа Вебера  $\text{We}_*$ , при которых, соответственно,  $F_{\omega} = F_{\sigma}$  и  $F_{\text{дн}} = F_{\sigma}$  (равенство конкурирующих сил, действующих на каплю). Из (10)–(12) следует, что

$$\text{Bo}_* = 6, \quad \text{We}_* = 8.$$

С учетом зависимости [23]

$$\text{Bo} = \frac{3}{4} C_D \text{We}, \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}$$

соответствующее граничное значение числа Рейнольдса  $\text{Re}_*$  равно

$$\text{Re}_* = 68.$$

Таким образом, проведенные оценки показали, что при  $\text{Re} < \text{Re}_*$  потеря устойчивости капли происходит по механизму Рэлея–Тейлора ( $F_{\omega} \gg F_{\text{дн}}$ ) и определяется критическим значением числа Бонда, а при  $\text{Re} \gg \text{Re}_*$  — по механизму Кельвина–Гельмгольца ( $F_{\omega} \ll F_{\text{дн}}$ ) и определяется критическим значением числа Вебера. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса потеря устойчивости формы капли происходит при значениях  $\text{We}_* > \text{Bo}_*$ ,  $\text{Re} > \text{Re}_*$ . Следовательно, для проведенных экспериментов потеря устойчивости формы капли связана с механизмом Кельвина–Гельмгольца.

## Выводы

По результатам экспериментального исследования процесса потери устойчивости формы капли в условиях обдувающего потока воздуха можно сделать следующие выводы:

1. Получены новые экспериментальные данные по деформации капли вязкой жидкости во встречном потоке воздуха в области чисел Рейнольдса  $Re = 490\text{--}2070$ , Бонда  $Bo = 1.2\text{--}3.4$  и Вебера  $We = 0.6\text{--}6.9$ .

2. Показано, что процесс деформации формы капли в условиях обдувающего потока воздуха проявляется в образовании "каверны" в ее тыловой части и сплющивании капли в направлении движения.

3. Получена эмпирическая зависимость для степени деформации капли от числа Вебера в диапазоне значений числа Вебера  $We = 0.6\text{--}6.9$  и степени деформации  $\varepsilon = 1\text{--}3.7$ . Показано, что с увеличением числа Вебера (или скорости обдувающего потока) степень деформации капли монотонно возрастает.

4. Проведен анализ механизма потери устойчивости формы капли и найдено граничное значение числа Рейнольдса  $Re_* = 68$ . При  $Re \ll Re_*$  потеря устойчивости капли происходит по механизму Рэлея–Тейлора, а при  $Re \gg Re_*$  — по механизму Кельвина–Гельмгольца. Для проведенных экспериментов потеря устойчивости формы капли связана с механизмом Кельвина–Гельмгольца.

5. Проведен сравнительный анализ результатов численного решения задачи о деформации капли с полученными экспериментальными данными, на основе которого уточнены границы применимости теоретической зависимости  $\varepsilon(We)$ .

6. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для уточнения существующих физико-математических моделей эволюции жидко-капельного аэрозоля в атмосфере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014).

## Обозначения

$Bo$ ,  $Re$ ,  $We$  — числа Бонда, Рейнольдса, Вебера;  $C_D$  — коэффициент сопротивления;  $d_{cap}$  — диаметр капилляра капельницы, м;  $d_{b.p}$  — внутренний диаметр патрубков, м;  $D_0$  — диаметр исходной капли, м;  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $l_{b.p}$  — длина патрубка, м;  $R^2$  — коэффициент детерминации;  $U = u + u_p$  — относительная скорость движения капли, м/с;  $u$  — скорость потока воздуха, м/с;  $u_{dr}$  — скорость осаждения капли, м/с;  $\varepsilon$  — степень деформации;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха,  $kg/(m \cdot c)$ ;  $\rho$ ,  $\rho_{dr}$  — плотности воздуха и материала капли,  $kg/m^3$ ;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения, Па·с. Индексы: \* — граничное значение; b.p — патрубок; cr — критический; cap — капилляр; dr — капля.

## Литература

1. Нигматулин Р. И. *Динамика многофазных сред*. Ч. 2. Москва: Наука, 1987.
2. Clift R., Grase J. R., Weber M. E. *Bubbles, Drops and Particles*. New York: Academic Press, 1978.
3. Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Часть I. Москва: Мир, 1971.
4. Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Часть II. Москва: Мир, 1971.
5. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматулин Р. И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газовзвесьях. В сб.: *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа*. Москва: ВИНТИ, 1982. Т. 16. С. 209–290.
6. Гонор А. Л., Ривкин В. Я. Динамика капли. В сб.: *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа*. Москва: ВИНТИ, 1982. Т. 17. С. 86–159.
7. Шрайбер А. А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений. В сб.: *Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики*. Москва: ВИНТИ, 1988.
8. Стернин Л. Е., Шрайбер А. А. *Многофазные течения газа с частицами*. Москва: Машиностроение, 1994. Т. 3. С. 3–71.
9. Flock A. K., Gueldenbecher D. R., Chen J., Sojka P. E., Bauer H.-J. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops. *Int. J. Multiphase Flow*. 2012. Vol. 47. Pp. 37–49.
10. Gao J., Gueldenbecher D. R., Reu P. L., Kulkarni V., Sojka P. E., Chen J. Quantitative, three-dimensional diagnostics of multiphase drop fragmentation via digital in-line holography. *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, No. 11. Pp. 1893–1895.
11. Kulkarni V., Sojka P. E. Bag breakup of low viscosity drops in the presence of a continuous air jet. *Phys. Fluids*. 2014. Vol. 26, Issue 7. 072103.

12. Антонов Д. В., Волков Р. С., Жданов А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние температуры газов на характеристики деформации движущихся капель воды. *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88, № 4. С. 773–781.
13. Wang C., Chang S., Wu H., Xu J. Modeling of drop breakup in the bag breakup regime. *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. 154107.
14. Kelemen K., Gepperth S., Koch R., Bauer H.-J., Schuchmann H. P. On the visualization of droplet deformation and breakup during high-pressure homogenization. *Microfluid Nanofluid.* 2015. Vol. 19. Pp. 1139–1158.
15. Волков Р. С., Жданова А. О., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Механизм деформации капель жидкостей при движении в газовой среде с дозвуковой скоростью. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 6. С. 1297–1307.
16. Volkov R. S., Zabelin M. V., Strizhak P. A. On the laws of liquid drop deformation in gas flows. *Chem. Petrol. Eng.* 2016. Vol. 52. Pp. 85–89.
17. Архипов В. А., Басалаев С. А., Перфильева К. Г., Поленчук С. Н., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. Стенд для исследования деформации капель аэродинамическими силами. Заявка № 2016149916 с приоритетом от 19.12.2016 на патент РФ, В01L 99/00.
18. Архипов В. А., Усанина А. С., Трофимов В. Ф., Васенин И. М. Устойчивость формы частиц дисперсной фазы при малых числах Рейнольдса. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2013. № 2. С. 5–14.
19. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей*. Москва: Мир, 1979.
20. Плотников В. М., Подрешетников В. А., Тетеревятников Л. Н. *Приборы и средства учета природного газа и конденсата*. Ленинград: Недра, 1989.
21. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. *Физические величины. Справочник*. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
22. Бутов В. Г., Васенин И. М., Шрагер Г. Р. Деформация капли в вязком потоке и условия существования ее равновесной формы. *Прикладная математика и механика*. 1982. № 6. С. 1045–1049.
23. Васенин И. М., Архипов В. А., Бутов В. Г., Глазунов А. А., Трофимов В. Ф. *Газовая динамика двухфазных течений в соплах*. Томск: Изд-во Томского университета, 1986.