

УДК 532.516.5:532.69

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КАПЕЛЬ И ПУЗЫРЬКОВ
ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА**

© 2011 г.

А.С. Усанина¹, В.А. Архипов²¹Томский госуниверситет²НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета

leva@niipmm.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены результаты экспериментального исследования потери устойчивости сферической поверхности раздела фаз, возникающей в результате развития неустойчивости Рэлея–Тейлора, в области малых чисел Рейнольдса $Re \leq 1$ при достижении критического значения числа Бонда $Bo \sim 90$. Данный режим движения рассмотрен для случая всплытия одиночного пузырька воздуха в водно-глицериновом растворе и для случая движения капли ртути в закрученном потоке вязкой жидкости.

Ключевые слова: капля, пузырек, потеря устойчивости, граница раздела фаз, неустойчивость Рэлея–Тейлора.

Движение пузырьков газа и капель жидкости, режимы их деформации и дробления, механизмы потери устойчивости являются классическими задачами гидродинамики, которые в течение многих лет привлекают внимание исследователей. Результаты теоретических и экспериментальных работ по данной проблеме представлены в монографии и обзорах [1–5]. Известны два механизма потери устойчивости при движении пузырька или капли в потоке – развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и неустойчивости Рэлея–Тейлора. В соответствии с этими механизмами деформация и дробление частиц дисперсной фазы происходит при достижении некоторых критических значений чисел Вебера и Бонда соответственно [4].

Представлены результаты экспериментального исследования режимов деформации одиночного пузырька воздуха при его всплытии в вязкой жидкости и одиночной капли при ее движении в закрученном потоке жидкости в поле центробежных массовых сил. В отличие от большинства известных работ, подробно исследованы режимы движения при малых числах Рейнольдса ($Re < 1$). Из решения Адамара для сферической частицы дисперсной фазы, движущейся в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса, следует, что разность нормальных напряжений на поверхности частицы постоянна и не стремится ее деформировать. Исходя из этого, Бэтчелором сделан вывод о том, что если вязкости и плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды таковы, что при малых чис-

лах Рейнольдса позволяют пренебречь силами инерции, то нет никаких ограничений на размер сферической частицы дисперсной фазы [6]. Теоретический анализ задачи о деформации сферической частицы дисперсной фазы позволил получить наименьшее, не равное нулю, собственное значение числа Бонда $Bo_{кр} = 89.9$ [7]. При таком значении числа Бонда решение нелинеаризованной задачи становится неединственным.

На основе экспериментального исследования проведен анализ процесса потери устойчивости одиночного первоначально сферического пузырька, движущегося в области малых чисел Рейнольдса при значении числа Бонда, близком к критическому. Эксперименты проведены для случая всплытия пузырька воздуха в водно-глицериновых растворах со значениями плотности, вязкости и коэффициента поверхностного натяжения $\rho = 1.23 \div 1.27$ г/см³, $\mu = 0.19 \div 4.1$ Па·с, $\sigma = 0.063 \div 0.065$ Н/м соответственно.

Эксперименты показали, что при достижении критического значения числа Бонда наблюдается переход от эллипсоидальной формы пузырька к сферическому сегменту. На рис. 1 изображены характерные формы пузырьков: *a* – сфера; *b* – эллипсоид; *в*, *г* – шаровой сегмент.

Для исследования движения капли при малых числах Рейнольдса разработана методика эксперимента, отличающаяся от известных методик по изучению устойчивости капли в поле силы тяжести [8].

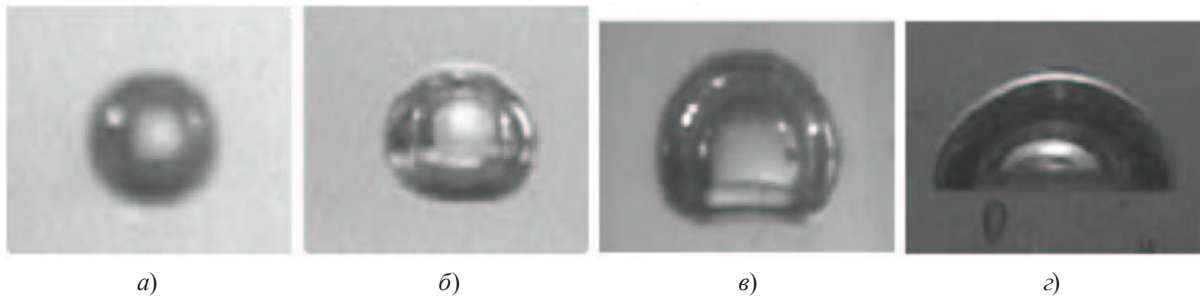


Рис. 1

На рис. 2 представлена экспериментальная установка, которая состоит из цилиндрического сосуда 1 с вязкой жидкостью 2. На рисунке обозначено: 3 – электродвигатель, 4 – каплевица, 5 – начальная капля, 6 – движущаяся капля, 7 – скоростная видеокамера. Цилиндрический сосуд раскручивается постепенно до некоторой угловой скорости. Жидкость при этом в стационарном режиме движется по закону твердого тела, т.е. все компоненты скорости любой точки в жидкости, кроме угловой (касательной), равны нулю. При достижении данного режима в этот сосуд с глицерином на некотором расстоянии от оси вращения вводится капля ртути заданного размера. С помощью видеосъемки фиксируется траектория движения капли, ее деформация и, в конечном итоге, дробление на фрагменты.

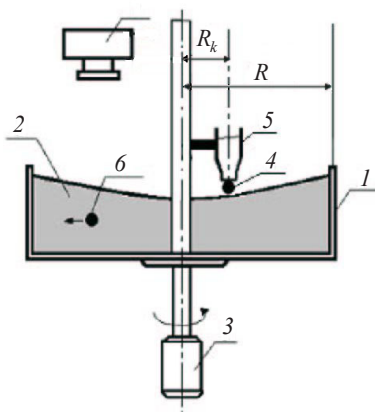


Рис. 2

Необходимый режим движения капли исследовался на примере движения капли ртути в водном растворе глицерина. Эксперименты показали, что при скорости вращения сосуда $\omega \sim 5$ оборотов в секунду, изначально сферическая капля диаметром $D > 4$ мм деформируется и принимает

форму вытянутого эллипса.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что при достижении критического значения числа Бонда происходит потеря сферической формы частицы. При этом переход от сферической к эллипсоидальной форме капли происходит при значениях числа Бонда ~ 90 . Для случая всплывающих пузырьков при достижении критического значения числа Бонда, а именно при $Bo_{кр} = 100 \div 200$, происходит потеря устойчивости эллипсоидальной формы пузырька.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы при поддержке государственного контракта П474 от 04.08.2009 г. «Создание и переработка высокоэнергетических наполненных полимерных композиций».

Список литературы

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 464 с.
2. Воинов О. В., Петров А. Г. Движение пузырей в жидкости // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. 1976. Т. 10. С. 86–147.
3. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles. New York: Academic Press, 1978. 378 p.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
5. Jinsong Hua, Jing Lou. Numerical simulation of bubble rising in viscous liquid // J. Computational Physics. 2007. No 222. P. 769–795.
6. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 315 с.
7. Васенин И.М. и др. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1986. 264 с.
8. Патент РФ № 2394649 от 27.04.2009 г. Устройство для исследования устойчивости движения капель / В.А. Архипов, А.П. Березиков, И.М. Васенин, В.Ф. Трофимов, А.С. Усанина, Г.Р. Шрагер.

**ANALYSIS OF INSTABILITY MECHANISM IN DROPS AND BUBBLES
AT SMALL REYNOLDS NUMBERS***A.S. Usanina, V.A. Arkhipov*

The theoretical and experimental results of studying the spherical phase interface instability occurring at the Rayleigh–Taylor instability in the range of small Reynolds numbers $Re \leq 1$ at Bond numbers close to critical value $Bo \sim 90$ are presented. This regime was investigated for gas bubbles rising in water-glycerin solution and mercury drops moving in a swirling flow of viscous liquid.

Keywords: drop, bubble, instability, interface of phases, Rayleigh–Taylor instability.