

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 532.22

**Капиллярные волны при коалесценции
микрокапель со слоем жидкости***

А.А. Федорец^{1,2}, И.В. Марчук^{2,3}, П.А. Стрижак⁴, О.А. Кабов^{3,4}

¹*Тюменский государственный университет*

²*Новосибирский государственный университет*

³*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

⁴*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

E-mail: marchuk@itp.nsc.ru

Экспериментально исследуются быстро затухающие капиллярные волны, генерируемые при коалесценции с горизонтальным слоем воды микрокапель (диаметр до 100 мкм), образующихся в газовой среде при конденсации водяного пара. Испарение происходит при интенсивном локальном нагреве жидкости со стороны подложки. Для визуализации и измерений деформаций применяется шлирен-метод и высокоскоростная (до 54000 к/с) видеосъемка. Измеренная амплитуда волн имеет значения в пределах 1–6 мкм, что согласуется с величиной поверхностной энергии коалесцирующих микрокапель. Волны генерируются за счет энергии поверхности капель.

Ключевые слова: капиллярные волны, микрокапли, коалесценция, капельный кластер, испарение, конденсация, слой жидкости, локальный нагрев.

Процесс коалесценции капель со слоем жидкости наблюдается в разнообразных природных явлениях и заслуживает внимания во многих технологических приложениях. Неотъемлемой частью этого процесса является выраженная в той или иной степени деформация межфазной поверхности жидкость–газ, как правило, приводящая к генерации пакета капиллярных волн [1]. Параметры таких волн могут сильно варьироваться в зависимости от свойств жидкости, толщины слоя, размера и высоты падения капли и множества других факторов [2]. Большое внимание уделяется таким сопутствующим коалесценции эффектам, как образование короны из мелких брызг [3], отскок капли [4], инжекция капли меньшего размера [5].

Традиционная схема экспериментов по коалесценции капель предполагает, что сопло дозатора, генерирующего капли заданного размера, находится выше слоя жидкости [1–5]. На момент взаимодействия со слоем капля имеет некоторую скорость падения, что может существенно усложнять процесс возбуждения волн.

В работе [6] впервые были описаны капиллярные волны, генерируемые при коалесценции со слоем воды микрокапель, образующих диссипативную структуру «капельный кластер». До момента коалесценции такие капли левитируют в непосредственной близости от межфазной поверхности [7] и энергия капиллярных волн лимитируется

* Исследование выполнено за счет гранта РФ (согл. № 14-39-00003).

поверхностной энергией капли. Другой уникальной особенностью кластера является возможность получения множества очень близких по размеру микрокапель диаметром d менее 100 мкм. Коалесцируя, такие микрокапли генерируют очень короткие (характерная длина волны $\lambda \sim 100$ мкм), быстро затухающие волны, параметры которых, впрочем, хорошо удовлетворяют классическому соотношению, связывающему скорость v и длину капиллярных волн λ со свойствами жидкости [8]: $v = \sqrt{2\pi\sigma/\lambda\rho}$, где σ и ρ — поверхностное натяжение и плотность жидкости. Фазовая скорость наиболее коротких волн составляет порядка 2 м/с [6], а коалесценция единственной капли может индуцировать массовую коалесценцию десятков капель менее чем за 1 мс, так называемый “коллапс кластера” (рис. 1). Целью настоящей работы является измерение амплитуды капиллярных волн, генерируемых при коалесценции водяных микрокапель с тонким горизонтальным слоем воды, и исследование механизма волнообразования.

Эксперименты проводились на установке, схема которой описана в работе [6]. Для повышения точности и информативности экспериментальных данных были внесены некоторые изменения: зачернена вся подложка (включая металлическую поверхность нагревателя), увеличена мощность источника света, применена высокоскоростная камера FOTRON FASTCAM SA1.1 более высокого класса. В совокупности это позволило повысить максимальную частоту видеозаписи с 13500 до 54000 к/с, улучшить контрастность шпирен-изображения и выполнить количественные измерения величины деформаций поверхности.

В экспериментах использовалась дегазированная дистиллированная вода, содержащая неконтролируемые микропримеси поверхностноактивных веществ. Толщина слоя $h_0 = 200 \pm 10$ мкм определялась объемом жидкости, заливаемой в кювету непосредственно перед началом измерения с помощью дозатора Ленпипет Степпер (наконечник — 5 мл, относительная погрешность дозирования — $\pm 0,3\%$). На периферии слой находился в термодинамическом равновесии с окружающим воздухом, температура которого T_G составляла 22 ± 1 °С.

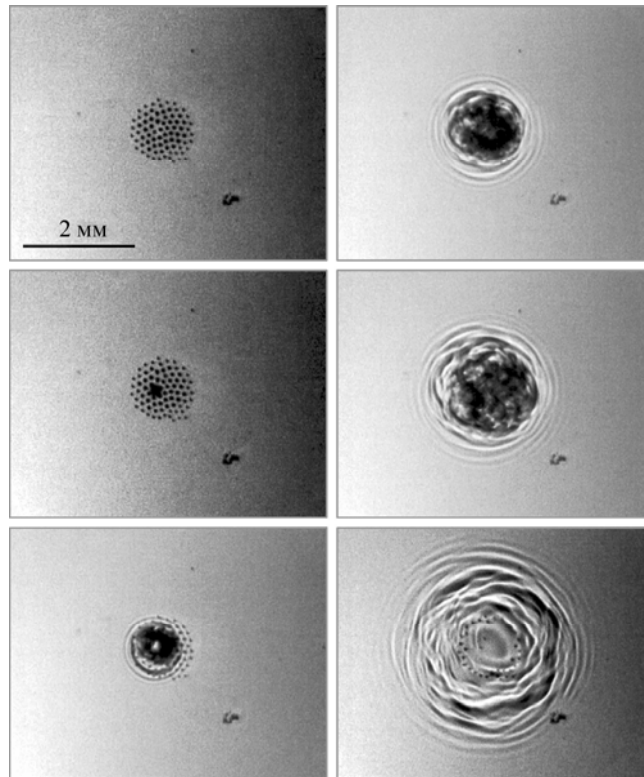


Рис. 1. Последовательные кадры видеозаписи (с частотой 54000 к/с) коллапса капельного кластера.

Для определения профиля капиллярных волн была получена градуировочная кривая (рис. 2), устанавливающая связь локальной яркости I шлирен-изображения с углом α наклона относительно горизонтали жидкой поверхности. При градуировке использовались два взаимодополняющих изображения одной и той же сидящей капли (рис. 2а): шлирен-изображение (вид сверху) и фотография профиля капли, полученная с помощью теневого «на просвет» метода. Кривая профиля осесимметричной капли, сидящей на плоской горизонтальной поверхности, удовлетворяет уравнению Юнга–Лапласа [9, 10]. Для сфотографированной капли был вычислен профиль поверхности, соответствующий решению уравнения Юнга–Лапласа, при помощи алгоритма, описанного в работе [10]. Это позволило максимально точно связать яркость шлирен-изображения с углом наклона межфазной поверхности (рис. 2б).

Интерференция капиллярных волн от десятков разноудаленных источников порождает быстроменяющиеся и крайне сложные для анализа шлирен-изображения (рис. 1). Восстановление профиля межфазной поверхности было сделано с использованием данных, полученных при коалесценции одиночной капли (рис. 3а). На рис. 3б приведено типичное распределение яркости шлирен-изображения в сечении, перпендикулярном фронту кольцевых волн. С помощью градуировочной кривой (рис. 2б) можно получить распределение углов наклона межфазной поверхности $\alpha(x, y)$. Толщину слоя $h(r)$, возмущенного при коалесценции одиночной капли, вдоль радиус-вектора r , берущего начало в центре события, можно выразить следующим образом:

$$h(r) = h(r_0) + \int_{r_0}^r \operatorname{tg}(a(\tau)) d\tau.$$

Здесь предполагается, что деформация поверхности осесимметрична и нормаль к поверхности в каждой ее точке лежит в плоскости (z, r) , поэтому приращение толщины слоя жидкости пропорционально тангенсу угла наклона поверхности. Значение r_0 выбирается так, чтобы волны были расположены при значениях r , следующих за ним.

На рис. 3с видно, что значение максимальной измеренной амплитуды волн немного больше одного микрона. Значения измеренных в экспериментах амплитуд волн находятся в диапазоне 1–6 мкм. Отклонение площади возмущенной поверхности жидкости от площади невозмущенной плоской поверхности позволяет оценить изменение поверхностной энергии во время прохождения волн. В рассматриваемом случае изменение площади оказалось одного порядка с площадью поверхности капли, что согласуется

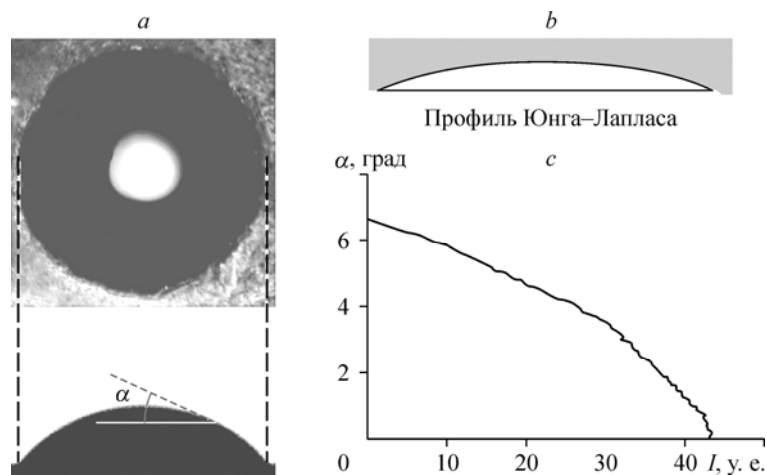


Рис. 2. Градуировка шлирен-метода.

a — сидящая капля (диаметр основания 20,7 мм), используемая для градуировки, — шлирен-изображение (вид сверху и сбоку), b — профиль Юнга–Лапласа, c — градуировочная зависимость, связывающая яркость шлирен-изображения с углом наклона межфазной поверхности.

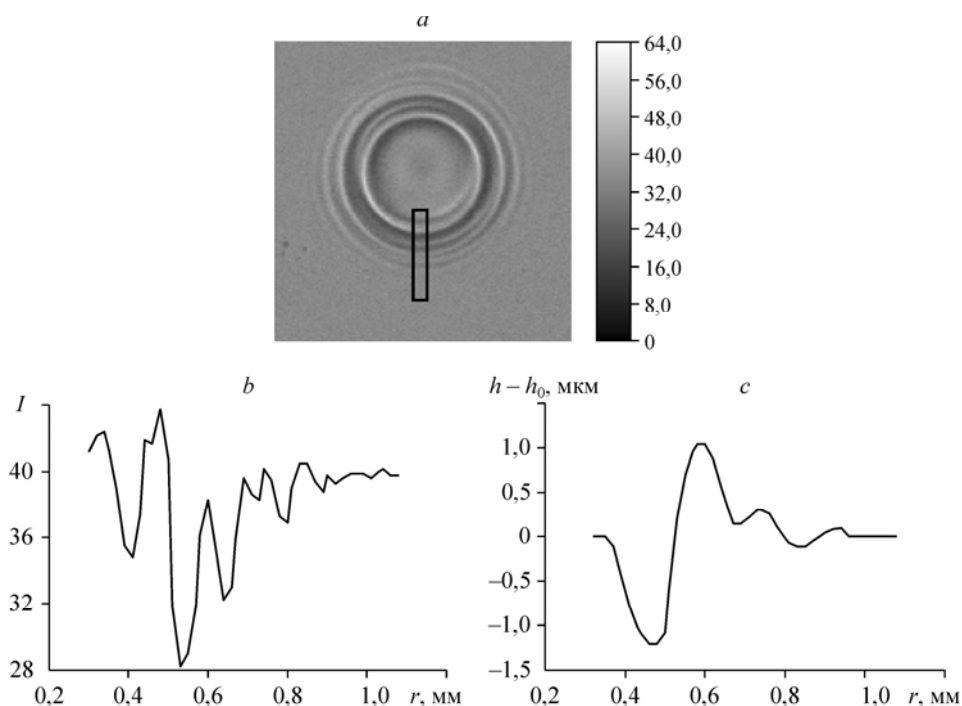


Рис. 3. Капиллярные волны.

a — шпирен-изображение пакета капиллярных волн, генерируемого при коалесценции одиночной капли; *b* — распределение яркости шпирен-изображения, соответствующее сечению, указанному прямоугольником на рис. 3а; *c* — восстановленный на основании этого распределения профиль межфазной поверхности.

с тем, что волны генерируются за счет энергии поверхности капель. Также подтверждается, что коалесценция единичной капли запускает самоподдерживающийся волновой процесс, который за время менее 1 миллисекунды вызывает коалесценцию сотен капель, образующих кластер [6].

Список литературы

1. Craeye C., Sobieski P.W., Bliven L.F., Guissard A. Ring-waves generated by water drops impacting on water surfaces at rest // *J. Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24, No. 3. P. 323–332.
2. Mehaute B. Gravity-capillary rings generated by water drops // *J. Fluid Mech.* 1988. Vol. 197. P. 415–427.
3. Zhang L.V., Brunet P., Eggers J., Deegan R.D. Wavelength selection in the crown splash // *Physics of Fluids*. 2010. Vol. 22. P. 122105-1–9.
4. Gilet T., Bush J.W.M. The fluid trampoline: droplets bouncing on a soap film // *J. Fluid Mech.* 2009. Vol. 625. P. 167–203.
5. Blanchette F., Messio L., Bush J.W.M. The influence of surface tension gradients on drop coalescence // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. P. 072107-1–10.
6. Федорец А.А., Марчук И.В., Кабов О.А. О роли капиллярных волн в механизме коалесценции капельного кластера // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 99, № 5. С. 307–310.
7. Федорец А.А. О механизме некоалесценции в капельном кластере // *Письма в ЖЭТФ*. 2005. Т. 81, № 9. С. 551–555.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. Изд. 4-е. М.: Наука, 1988. 736 с.
9. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. М.: Мир, 1989. 312 с.
10. Марчук И.В., Чеверда В.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Определение поверхностного натяжения и контактного угла смачивания по форме поверхности осесимметричных пузырей и капель // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22, № 3. С. 311–317.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2014 г.,
после переработки — 10 ноября 2014 г.