

О роли капиллярных волн в механизме коалесценции капельного кластера

А. А. Федорец¹⁾, И. В. Марчук^{+,*}, О. А. Кабов^{+,×}

Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

⁺Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

^{*}Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

[×]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 27 января 2014 г.

С применением высокоскоростной видеосъемки и теневого метода зарегистрированы пакеты капиллярных волн на поверхности горизонтального слоя воды, генерируемые при коалесценции со слоем микрокапель (характерный диаметр 50–100 мкм) диссипативной структуры “капельный кластер”. Длина наиболее коротких из наблюдавшихся в эксперименте волн составляла порядка 130 мкм, а их фазовая скорость превышала 1.8 м/с. Установлено, что коалесценция единичной капли запускает самоподдерживающийся волновой процесс, который за время менее 1 мс вызывает коалесценцию сотен капель, образующих кластер.

DOI: 10.7868/S0370274X14050051

При интенсивном локальном нагреве и испарении воды и ряда других жидкостей (глицерин, бензиловый спирт, этиленгликоль) может наблюдаться явление “капельный кластер” [1]. Это гексагонально упорядоченный монослой из десятков или сотен микрокапель конденсата, левитирующих над горизонтальной межфазной поверхностью жидкость–газ на расстоянии, сопоставимом с диаметром капель [2] (рис. 1). За левитацию капель ответственны силы аэродинамической природы, возникающие при обтекании капель паровоздушной струей от нагретого участка жидкой поверхности (стоксовская левитация) [3].

Исследуемый в работе эффект коллапса капельного кластера известен достаточно давно [1]. В случае видеозаписей со стандартной частотой 25 к/с его весьма точно характеризует термин “исчезновение” кластера: ни на одной из сотен таких видеозаписей не удавалось зафиксировать переходные стадии процесса. До недавнего времени лишь предполагалось, что коллапс кластера происходит вследствие коалесценции со слоем единичной капли [1] – из-за генерируемых при этом капиллярных волн. Косвенным подтверждением такого механизма стали данные, полученные с помощью высокоскоростной (1000 к/с) тепловизионной съемки [4]. Однако эта методика не позволяла визуализировать капиллярные волны, из-

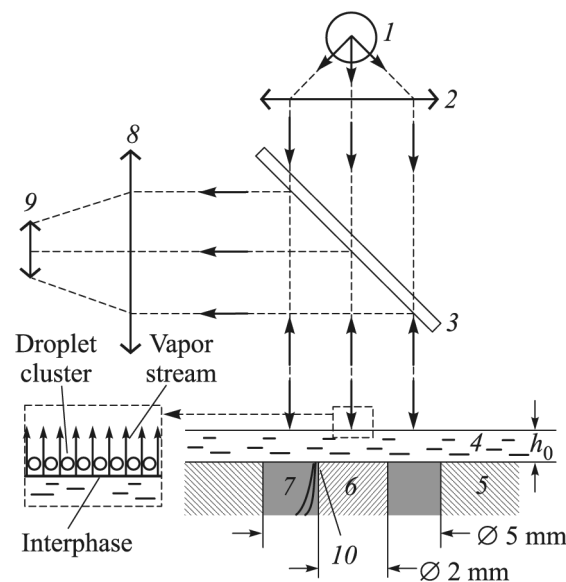


Рис. 1. Схема эксперимента

мерять их скорость и длину. Также стало очевидным, что частота записи 1000 к/с недостаточна для детализации процесса.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Здесь 1 – точечный источник света, помещенный в фокусе линзы 2, 3 – светоделитель, 4 – открытый горизонтальный слой жидкости, 5 – металлическая подложка, в центре которой располо-

¹⁾e-mail: fedorets_alex@mail.ru

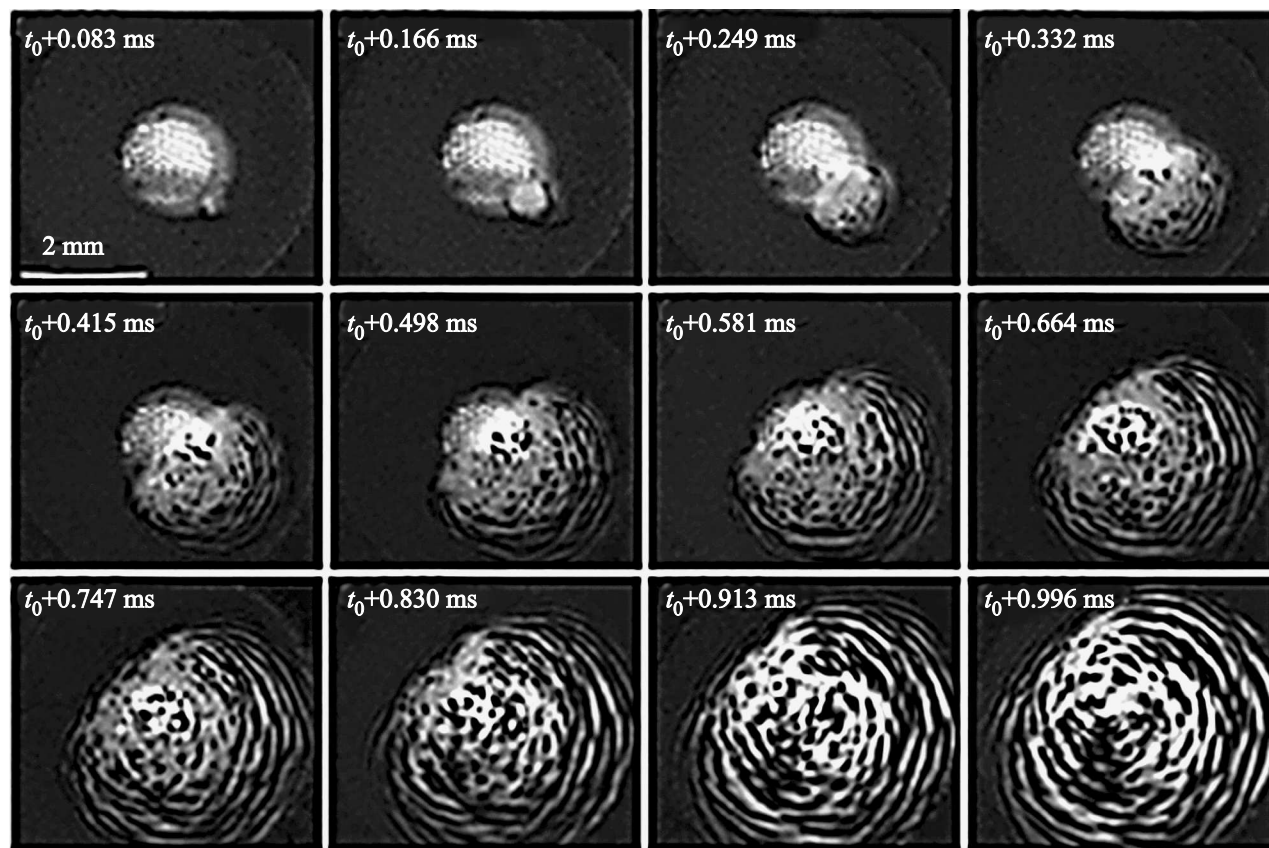


Рис. 2. Волновой процесс при коалесценции капель кластера со слоем

жен нагреватель *b*, теплоизолированный от подложки полимерным слоем *7*, *8* – собирающая линза, *9* – объектив высокоскоростной видеокамеры, который одновременно служит шпирен-фильтром, *10* – спай медь-константановой термопары (диаметр проволоки 0.12 мм).

Эксперименты проводились с дегазированной дистиллированной водой с естественными микропримесями поверхностно-активных веществ. Кювета была открыта для свободного доступа воздуха лабораторного помещения. Толщина слоя, $h_0 = 300 \pm 10$ мкм, определялась объемом жидкости, заливаемой в кювету непосредственно перед началом измерения (применялся дозатор Ленпипет Степшер, наконечник 5 мл, относительная погрешность дозирования $\pm 0.3\%$). Жидкость на периферии слоя находилась в термодинамическом равновесии с окружающим воздухом, температура которого T_G составляла 22 ± 1 °С. Термопара (рис. 1) позволяла контролировать температуру нагревателя в непосредственной близости от поверхности его контакта со слоем жидкости.

Общее представление о физическом механизме коллапса кластера дает серия кадров, показанная на

рис. 2 (здесь и далее момент времени t_0 соответствует последнему кадру, на котором нет видимых признаков коалесценции капель). Частота записи составляла 12000 к/с. Большинство капель, образующих данный кластер, имело диаметр 90 ± 20 мкм.

Расстояние между каплями в кластере составляет десятки мкм. Первичная волна достигает ближайших капель за время порядка 10 мкс. Распространяясь, волна индуцирует коалесценцию соседних капель, т.е. включается эффект домино. Лавинообразный коллапс всего кластера происходит менее чем за 1 мс.

Интерференция волн существенно осложняет высокоточное измерение их параметров. В этой ситуации очень полезен тот факт, что при коллапсе кластера небольшое число капель (как правило, не более 1–3) может “выжить”. Такие капли оказываются отброшенными капиллярными волнами на периферию области нагрева. Через сотые доли секунды они также коалесцируют со слоем. Это позволяет наблюдать распространение одиночного пакета капиллярных волн, не возмущенного интерференцией (рис. 3). В соответствие с физическим принципом теневого метода по распределению яркости, изображения *I*

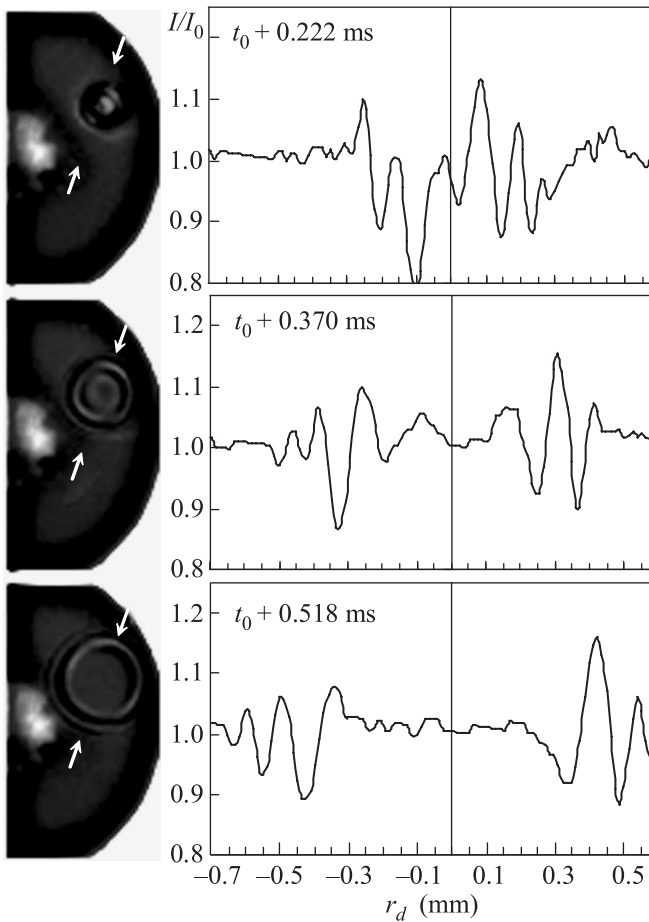


Рис. 3. Исходные изображения пакета капиллярных волн, генерируемого при коалесценции одиночной капли диаметром 90 ± 20 мкм, и соответствующие распределения яркости (направление сечения показано стрелками, r_d – расстояние от центра коалесцировавшей капли). Частота записи 13500 к/с

(здесь I_0 – средняя яркость фона) в сечении, проходящем через центр коалесцировавшей капли, можно измерить длину генерируемых капиллярных волн.

Схема на рис. 4а поясняет связь распределения яркости изображения с параметрами капиллярной волны. Локальные экстремумы яркости I_{\max} и I_{\min} соответствуют участкам межфазной поверхности с максимальным уклоном. Следовательно, расстояние между соседними экстремумами равняется половине длины волны [5]. По числу экстремумов (рис. 3) можно заключить, что, коалесцируя, капля генерирует пакет из трех радиальных капиллярных волн.

График на рис. 4б отражает изменение во времени расстояния от точки коалесценции капли до локальных максимумов и минимумов распределения яркости (график относится к серии кадров на рис. 3).

Тангенс угла наклона таких зависимостей равен фазовой скорости волн. Каждой радиальной волне соответствует два экстремума яркости (максимум и минимум), что дает три пары зависимостей. В данном случае имеем $\lambda_1 = 130 \pm 10$ мкм, $v_1 = 1.82 \pm 0.01$ м/с, $\lambda_2 = 205 \pm 10$ мкм, $v_2 = 1.46 \pm 0.01$ м/с; $\lambda_3 = 260 \pm 10$ мкм, $v_3 = 1.30 \pm 0.01$ м/с.

В приближении тонкого слоя фазовая скорость капиллярной волны определяется классическим выражением [6]:

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda\rho}}, \quad (1)$$

где σ и ρ – поверхностное натяжение и плотность жидкости. Чем меньше длина, тем выше скорость волны.

Поскольку волны распространялись по одной и той же межфазной поверхности, из (1) следует, что измеренные параметры волн должны удовлетворять соотношению

$$\lambda_1 v_1^2 = \lambda_2 v_2^2 = \lambda_3 v_3^2 = \frac{2\pi\sigma}{\rho}. \quad (2)$$

Из приведенных выше данных находим, что среднее для трех волн значение $\lambda v^2 = 435 \pm 5$ см³/с², т.е. разброс не превышает 1%. Воспользовавшись справочными таблицами по плотности и поверхностному натяжению, несложно оценить соответствующую температуру поверхностного слоя воды. Она составляет ≈ 40 °С. Температура нагревателя ($T_H = 75$ °С) была заметно выше. Однако если учесть, что температура межфазной поверхности была заведомо ниже T_H и капля коалесцировала над теплоизолирующим полимерным слоем, т.е. в области, где происходит резкий спад температуры жидкости [4], то данная оценка вполне соответствует физическим ожиданиям.

В случае кластера капля имеет скорость, близкую к нулевой, и левитирует в непосредственной близости от межфазной поверхности. По сути, вся энергия возбуждения капиллярных волн есть энергия $\pi\sigma D^2$ поверхностного натяжения капли, которая может быть измерена с высокой точностью. Такая система крайне интересна с точки зрения исследований гидродинамики процесса коалесценции микрокапли с межфазной границей раздела газ–жидкость и микромасштабных механизмов возбуждения капиллярно-волновой неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. А. А. Федорец, Письма в ЖЭТФ **79**, 457 (2004).

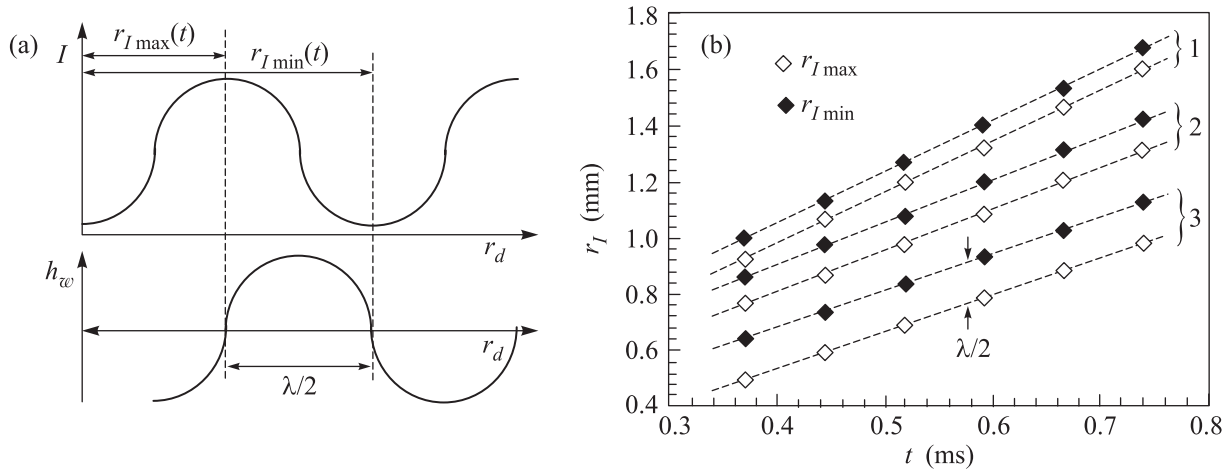


Рис. 4. (а) – Схема, поясняющая связь распределения яркости на изображении, получаемом теневым методом и параметрами капиллярной волны (h_w – локальное отклонение толщины слоя жидкости от h_0). (б) – Зависимость положения экстремумов яркости от времени

2. А. А. Федорец, Письма в ЖЭТФ **81**, 551 (2005).
3. А. А. Федорец, И. В. Марчук, О. А. Кабов, Письма в ЖТФ **37**, 45 (2011).
4. А. А. Fedorets, I. V. Marchuk, and O. A. Kabov, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* **1**, 51 (2013).
5. O. A. Kabov, M. V. Bartashevich, and V. Cheverda, *Int. J Emerg. Multidisciplinary Fluid Sciences* **2**, 161 (2010).
6. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics, Course of Theoretical Physics*, Pergamon Press, Oxford (1987), v. 6.