

Влияние инфракрасного облучения на подавление конденсационного роста капель воды в левитирующем капельном кластере

А. А. Федорец^{+*1)}, Л. А. Домбровский[×], Д. Н. Медведев⁺

⁺Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

^{*}Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

[×]Объединенный институт высоких температур РАН, 111116 Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 августа 2015 г.

Экспериментально установлено, что облучение левитирующего над поверхностью воды капельного кластера инфракрасным излучением уменьшает скорость конденсационного роста капель вплоть до стабилизации размера капель и даже возможного его уменьшения. Обнаруженный эффект пропорционален мощности источника излучения. Правильный выбор потока инфракрасного излучения позволяет предотвратить коллапс кластера и значительно увеличить длительность его устойчивой левитации.

DOI: 10.7868/S0370274X15190108

Появление левитирующего капельного кластера над локально нагретой горизонтальной поверхностью жидкости впервые описано в работе [1]. Диаметр регулярно расположенных капель в кластере над поверхностью воды обычно составляет от 10 до 120 мкм. Кластер постоянно находится над нагретым участком поверхности жидкости, что упрощает экспериментальное исследование процессов, сопровождающих его эволюцию [1–4].

В обычных лабораторных условиях размер капель воды в кластере непрерывно увеличивается в результате преобладающей конденсации пара. По мере увеличения массы капель высота левитации кластера над поверхностью воды уменьшается и происходит коалесценция наиболее крупных капель со слоем воды. В результате на поверхности воды образуются капиллярные волны, которые приводят к коалесценции оставшихся капель и полному коллапсу кластера [3]. Процесс формирования и роста кластера может циклически повторяться. При этом “время жизни” кластера обычно не превышает нескольких минут.

Капельный кластер – весьма удобный объект для лабораторных исследований биохимических процессов в разнообразных каплях воды, взвешенных в земной атмосфере (обычно в облаках и туманах), где капли могут существовать намного дольше, чем в кластере. Приближение к природным условиям требует увеличения времени жизни лабораторных капельных кластеров. Нагрев капель внешним излучением представляется наиболее простым и очевидным

способом решения данной задачи. Однако возможность реализации этой идеи требует экспериментального подтверждения.

В настоящей работе, по-видимому впервые, экспериментально исследуется влияние внешнего инфракрасного (ИК) излучения на скорость роста капель воды в левитирующем капельном кластере. Поглощение инфракрасного излучения каплями воды подробно изучено в связи с задачами атмосферной оптики и различными техническими приложениями [5, 6]. Для предварительной оценки необходимого потока инфракрасного излучения использовались расчеты по теории Ми, которые дают значения безразмерного фактора эффективности поглощения $Q_a = C_a / (\pi a^2)$, где C_a – сечение поглощения для капли радиусом a [7]. Разумеется, величина Q_a зависит от оптических постоянных воды, которые для ИК-области спектра хорошо известны [8].

Принципиальная схема эксперимента показана на рис. 1. Здесь 1 – тонкий горизонтальный слой воды, 2 – металлическое дно кюветы с отверстием в центре, герметично закрытым полированной стеклянной пластинкой 3 толщиной $h_C = 0.1$ мм, 4 – непрозрачное покрытие из термостойкого лака с микрочастицами графита, 5 – лазерный луч, нагревающий данное покрытие и от него – слой воды, 6 – капельный кластер, 7 – излучение от внешних ИК-источников. В данной работе впервые использован лазерный нагрев слоя воды, обладающий рядом преимуществ по сравнению с применявшимся ранее электрическим нагревом [1–4]. К этим преимуществам следует отнести малую инерционность на-

¹⁾e-mail: fedorets_alex@mail.ru

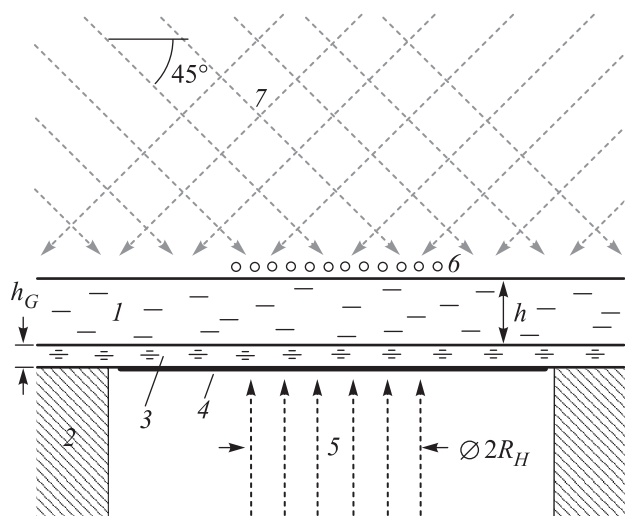


Рис. 1. Схема эксперимента

грева и гладкость поверхности стеклянной пластины. Последнее позволило избавиться от многочисленных центров нуклеации, приводивших к образованию всплывающих пузырьков пара, которые генерировали капиллярные волны на поверхности воды и могли индуцировать коллапс кластера [4]. В эксперименте использовался лазер KLM-N808-600-5 (производитель – ЗАО “ФТИ-Оптроник”) с длиной волны излучения 0.808 ± 0.010 мкм и мощностью 600 мВт. Лазерный луч фокусировался в световое пятно радиусом $R_H = 0.7 \pm 0.25$ мм (рис. 1).

Для нагрева капель кластера использовалось четыре ИК-источника EK-8520 (производитель – Helioworks) с температурой излучающего элемента 950°C . Примерно 97% потока генерируемого излучения приходилось на длины волн от 0.9 до 15 мкм. Инфракрасные источники располагались симметрично с четырех сторон и были направлены под углом 45° к горизонтальной плоскости (рис. 1). Это обеспечивало почти равномерное освещение верхней стороны кластера. Для измерения оптической мощности ИК источников и лазера применялись приборы производства компании OPHIR: блок управления NOVA и детектор 2A-SH (спектральный диапазон – от 0.19 до 20 мкм, мощность – от 60 мкВт до 2 Вт, относительная погрешность $\pm 3\%$). Толщина h слоя воды контролировалась при помощи лазерного триангуляционного датчика расстояния RF603-15/2 (производитель – Rifices) с точностью ± 2 мкм.

Эксперименты проводились с дистиллированной водой, содержащей естественные микропримеси поверхностно-активных веществ, которые обеспечивали подавление термокапиллярных течений. Мощность лазера P_L варьировалась от 130 до

195 мВт, а интегральный (по спектру) поток ИК-излучения от четырех источников q_{IR} – в диапазоне до 12.2 мВт/мм². В качестве энергетического параметра ИК-воздействия далее выступает величина $P_{IR} = q_{IR}(\pi R_H^2)$. Во всех экспериментах поддерживалась постоянная толщина слоя воды $h = 300$ мкм. Для наблюдения за капильным кластером использовался стереомикроскоп Zeiss Discovery.V8, оборудованный видеокамерой. Типичное изображение кластера показано на рис. 2.

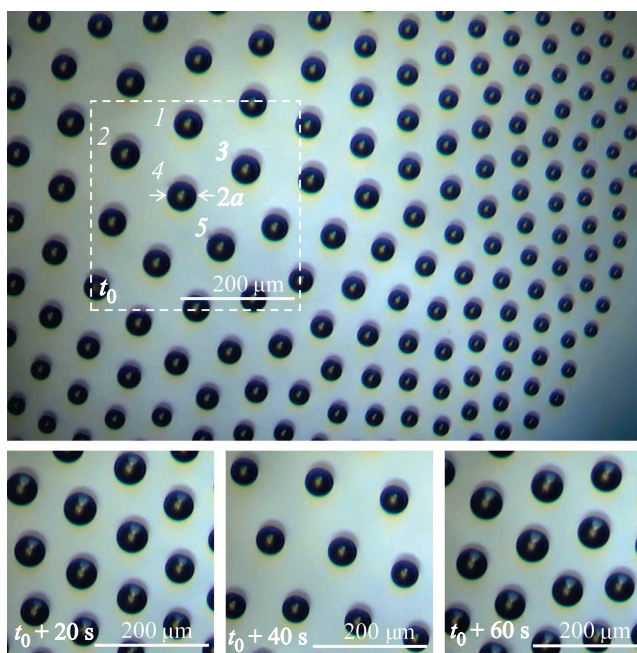


Рис. 2. (Цветной онлайн) Кадры видеозаписи капильного кластера

С учетом времени прогрева слоя воды лазер включался не менее чем за две минуты до начала видеозаписи. Продолжительность каждой записи составляла 60 с: первые 20 с – при выключенных ИК-источниках, а в период $20\text{ с} < t < 40\text{ с}$ – при включенных ИК-источниках, которые после этого выключались еще на 20 с. Воздействие ИК-излучения на кластер иллюстрирует серия кадров на рис. 2: за 20 с (с 20-й по 40-ю) диаметр капели уменьшался примерно на 15%, а при выключении ИК-источников конденсационный рост капели возобновлялся.

На рис. 3 показано изменение площади поверхности капли с течением времени при мощности лазера 163 мВт. Здесь S – средняя площадь, рассчитываемая по диаметрам пяти наиболее крупных капели в центре кластера (см. рис. 2). Зависимость 1 соответствует обычным условиям (без ИК-облучения), зависимости 2 и 3 – 20-секундному ИК-воздействию

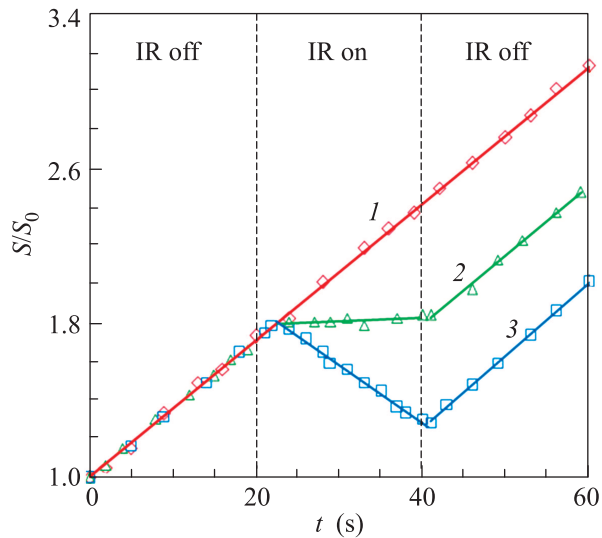


Рис. 3. (Цветной онлайн) Изменение площади поверхности капли во времени. Начальный диаметр капли 34.2 мкм. Зависимости 1–3 получены при $P_{IR} = 0$ (ИК-источники не включались), 9.3 и 19.1 мВт соответственно

разной мощности. Каждая из приведенных зависимостей содержит линейные участки. При этом, на первом и третьем участках скорости изменения площади каплей практически совпадают. Видно, что при ИК-облучении скорость роста каплей снижается. Более того, размер каплей может даже уменьшаться. После включения ИК-источников им требуется около 2 с для выхода на постоянную мощность, а после выключения около 1 с сохраняется остаточное излучение. Поэтому изломы на кривых не совпадают с моментами включения/выключения ИК-источников. Конденсационный рост каплей кластера подчиняется известной закономерности, согласно которой зависимость $S(t)$ близка к линейной. Это справедливо и в случае ИК-воздействия на капли, по крайней мере в первые несколько десятков секунд облучения.

Обобщенные экспериментальные данные приведены на рис. 4. Приведенные зависимости получены для трех значений мощности лазера. Чем выше P_L , тем выше температура поверхности слоя воды под кластером и тем выше скорость конденсационного роста каплей. При ИК-облучении скорость \dot{S} снижается обратно пропорционально его потоку и даже становится отрицательной. Путем линейной интерполяции можно оценить мощность ИК-источника $P_{IR(0)}$, при которой размер каплей не изменяется с течением времени. Чем интенсивнее лазерный нагрев, тем выше $P_{IR(0)}$. Вместе с тем отношение $P_{IR(0)}/P_L$ остается практически неизменным

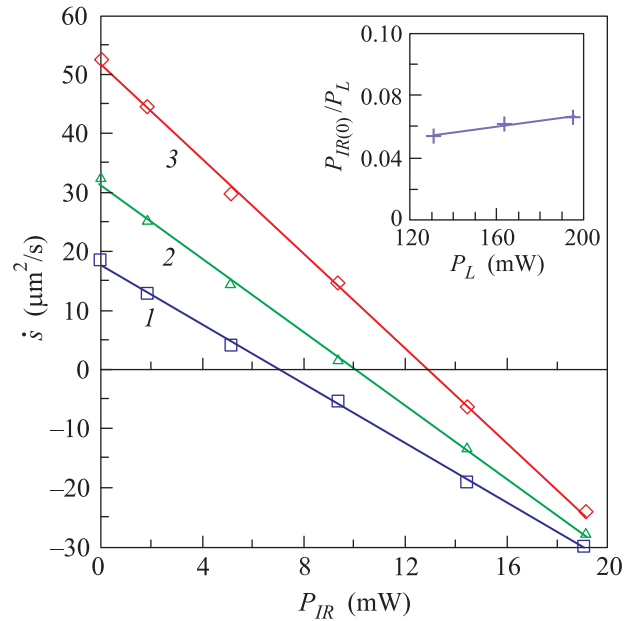


Рис. 4. (Цветной онлайн) Скорость изменения площади поверхности капли в зависимости от мощности ИК-излучения: 1 – $P_L = 131$ мВт, 2 – 163 мВт, 3 – 195 мВт. На вставке – зависимость мощности ИК-излучения, при которой капли перестают расти, от мощности лазерного нагрева

(см. вставку к рис. 4). В условиях эксперимента параметр $P_{IR(0)}$ составляет около 6 % от P_L . При таком соотношении инфракрасный нагрев обеспечивает динамический баланс испарения и конденсации пара на поверхности капли.

При правильном выборе параметров (спектральный диапазон, мощность и длительность воздействия) ИК-излучение позволяет управлять размером каплей и значительно увеличивать время устойчивой левитации кластера. Время “жизни” капли становится ограниченным лишь техническими возможностями экспериментальной установки. Это открывает новые перспективы для использования кластера в исследованиях сложных физических и химических процессов в каплях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (идентификатор проекта RFMEFI61314X0011).

1. А. А. Федорец, Письма в ЖЭТФ **79**, 457 (2004).
2. Э. А. Аринштейн, А. А. Федорец, Письма в ЖЭТФ **92**, 726 (2010).
3. А. А. Федорец, И. В. Марчук, О. А. Кабов, Письма в ЖЭТФ **99**, 307 (2014).
4. A. A. Fedorets, L. A. Dombrovsky, and A. M. Smirnov, *Infrared Phys. Tech.* **69**, 238 (2015).

5. K. N. Liou, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, 2nd edition, Int. Geophys. Ser., Academic Press, San Diego (2002), v. 84.
6. W. F. Godoy and P. E. Des Jardin, *Int. J. Heat Mass Transfer* **52**, 2893 (2009).
7. L. A. Dombrovsky and D. Baillis, *Thermal Radiation in Disperse Systems: An Engineering Approach*, Begell House, N.Y. (2010).
8. В. М. Золотарев, А. В. Демин, *Оптика и спектроскопия* **43**, 271 (1977).