

03

О роли потока пара в механизме левитации диссипативной структуры капельный кластер

© А.А. Федорец, И.В. Марчук, О.А. Кабов

Тюменский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
Новосибирск
E-mail: fedorets_alex@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 августа 2010 г.

Экспериментально измерена скорость испарения слоя воды в условиях, обеспечивающих формирование диссипативной структуры капельный кластер [1,2]. Показано, что в области локализации капельного кластера скорость паровоздушного потока достаточна для реализации стоковского механизма левитации капель вблизи жидкой поверхности.

При интенсивном локальном нагреве и испарении воды и ряда других жидкостей может наблюдаться диссипативная структура капельный кластер [1] — высокоупорядоченная гексагональная структура из микрокапель, висящих над жидкой поверхностью на расстоянии, сопоставимом с диаметром капель [2]. Изначально эти капли являются каплями тумана, возникающими при конденсации водяного пара, который, поднимаясь от нагретой жидкой поверхности, смешивается с холодными воздушными массами. Если типичный размер капель тумана составляет порядка $10\ \mu\text{m}$ [3], то в условиях кластера размер некоалесцирующих с жидкой поверхностью капель может достигать ста и более μm .

Природа сил, компенсирующих вес капель и стабилизирующих положение кластера над жидкой поверхностью, недостаточно изучена. Данная работа посвящена экспериментальной проверке гипотезы, согласно которой левитация капель кластера объясняется действием на них паровоздушного потока, возникающего вследствие интенсивного испарения жидкости. Скорость такого потока, в отличие от рассматриваемых ранее конвективных течений воздуха гравитационной

природы [2], уменьшается с увеличением расстояния от жидкости, что позволяет объяснить стабильность положения капель кластера над жидкой поверхностью.

Чтобы капля диаметром d из жидкости плотностью ρ_l (в данном случае, $\rho_l \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ — плотность воды) висела в потоке пара со скоростью течения U , вес капли должен компенсироваться силой, с которой поток действует на каплю:

$$m_d g = C_d S_d \rho_v U^2 / 2. \quad (1)$$

Масса капли $m_d = \rho_l \pi d^3 / 6$, ρ_v — плотность насыщенного пара, площадь сечения $S_d = \pi d^2 / 4$, C_d — коэффициент сопротивления сферической капли, зависящий от числа Рейнольдса $Re = Ud\rho_v/\mu$, где $\mu \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [4] — динамическая вязкость влажного воздуха. В данном случае значение числа Re близко к единице и коэффициент сопротивления вычисляется по формуле, вытекающей из решения Стокса:

$$C_d = \frac{24}{Re}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) может быть определена зависимость максимального размера d_{\max} левитирующей капли от скорости паровоздушного потока:

$$d_{\max}(U) = (18\mu U / \rho_l g)^{1/2}. \quad (3)$$

Схема использованной в работе экспериментальной установки показана на рис. 1. Здесь: 1 — дюралевая кювета; 2 — слой воды; 3 — нагреватель (медный стержень, теплоизолированный от корпуса кюветы полимерным слоем, на который навита нихромовая проволока 4, нагреваемая электротоком от регулируемого блока питания 5); 6 и 6' — спаи медьконстантановой термопары; 7 — щуп цифрового термометра; 8 — платформа аналитических весов; 9 — внешняя линза объектива стереомикроскопа МБС-10/ИК камеры Titanium 570M. Данная установка позволяет измерять скорость \dot{m} изменения веса слоя жидкости в процессе генерации капельного кластера и регистрировать изображение объекта исследования в видимом и ИК-диапазонах (рис. 2).

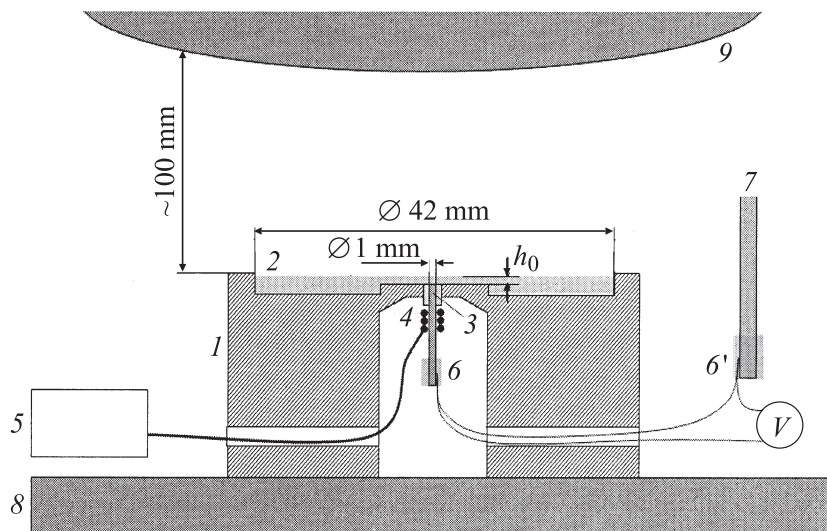


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Зная температуру жидкости, площадь S_h нагретого участка поверхности и скорость испарения слоя \dot{m}_0 при выключенном нагревателе, по величине \dot{m} несложно оценить скорость потока пара над нагревателем. Плотность потока пара $J_v = (\dot{m} - \dot{m}_0)/S_h \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, скорость пара

$$U = J_v \frac{J_v}{\rho_v} = (\dot{m} - \dot{m}_0)/\rho_v S_h. \quad (4)$$

Находясь в кластере, капли постепенно увеличиваются за счет конденсации пара (отражение этого процесса можно наблюдать на рис. 2: капли, которые попали в кластер в разные моменты времени, отличаются диаметром). Такие характеристики, как скорость роста и максимальный диаметр каплей d_{max} , зависят от множества факторов, в том числе от разности температур жидкости в области нагрева и на периферии слоя, температуры воздуха, геометрии нагревателя и др. При прочих равных условиях эти характеристики прямо пропорциональны мощности нагревателя.

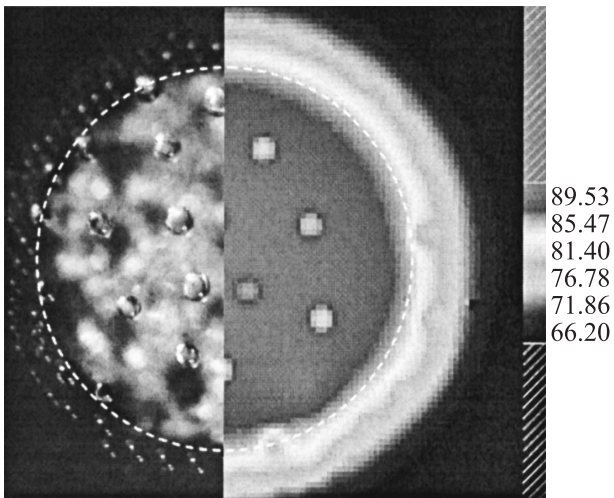


Рис. 2. Изображение нагревателя и капельного кластера в видимом и ИК-диапазоне. Диаметр нагревателя 1 mm (его граница обозначена штриховой линией).

Если при низкой мощности нагревателя изменения диаметра капель незаметны в течение многих минут, то с повышением мощности первоначальный размер капель может удваиваться за время порядка нескольких десятков секунд. В этом случае описанный в [1] эффект спонтанного разрушения кластера приобретает выраженную периодичность, т.е., достигая определенного размера, капля неизбежно коалесцирует со слоем.

Необходимые для оценки U экспериментальные данные по температуре жидкой поверхности и соответствующей скорости испарения при варьируемой мощности нагревателя приведены на рис. 3, *a*. Судить о диаметре капель, способных висеть в потоке при различных значениях U , можно по расчетной зависимости, представленной на рис. 3, *b*. Здесь же приведены экспериментальные данные о максимальных размерах капель кластера, наблюдаемых при разной мощности нагревателя, и соответственно скорости парогазового потока.

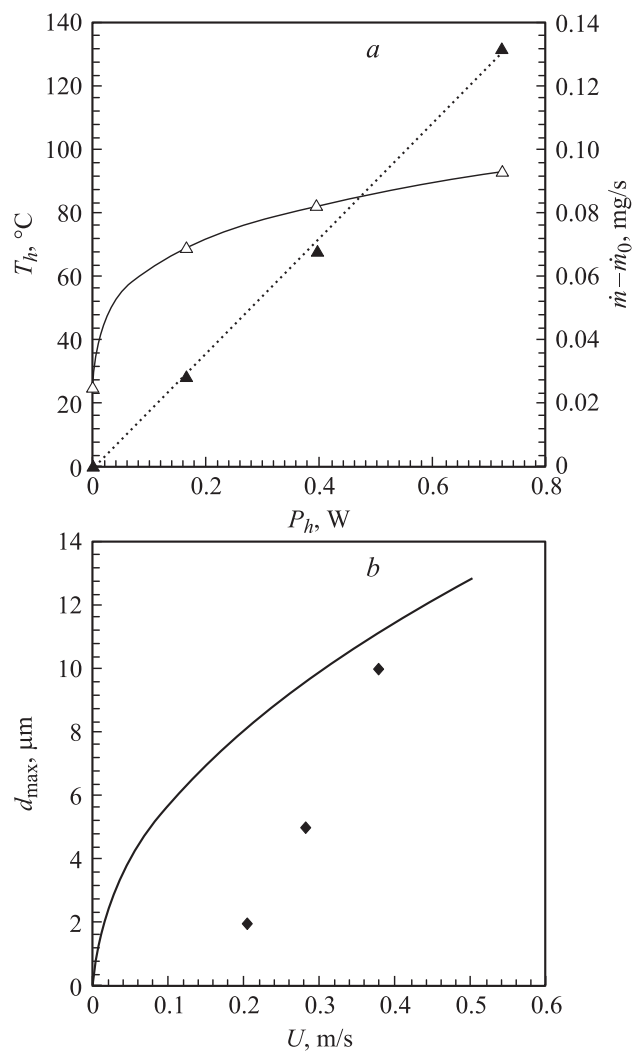


Рис. 3. *a* — график зависимостей температуры нагревателя (светлые маркеры) и скорости испарения слоя (темные маркеры) от подводимой электрической мощности; *b* — зависимость максимального диаметра капли, способной левитировать над слоем, от скорости паровоздушного потока. Сплошная линия соответствует зависимости (2), точки — экспериментальным данным.

Таким образом, во всем изученном диапазоне мощности нагревателя измеренная скорость парогазового потока достаточна для компенсации веса капель, что подтверждает предложенный в работе Стоксовский механизм левитации капельного кластера.

Список литературы

- [1] Федорец А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79 (8). С. 457–459.
- [2] Федорец А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81 (9). С. 551–555.
- [3] Райст П. Аэрозоли — введение в теорию. М.: Мир, 1987.
- [4] Ревкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.