

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КЛАСТЕРА ИЗ КАПЕЛЬ ВОДЫ

А. В. Шавлов, В. А. Джуманджи*

*Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук
625000, Тюмень, Россия*

Поступила в редакцию 28 мая 2010 г.,
после переработки 31 марта 2011 г.

Получен капельный кластер над поверхностью воды, подогретой до 65–100 °С. Построена парная корреляционная функция капель в кластере. Измерены температурные зависимости межкапельного расстояния, диаметра капель и высоты их левитации над поверхностью воды.

1. ВВЕДЕНИЕ

Капельный кластер — новый интересный физический объект, который был обнаружен при стандартных атмосферных давлении и температуре над подогретой поверхностью воды [1]. Кластер образовывался из капель, выпадающих из пересыщенного водяного пара. Количество капель в кластере достигало нескольких десятков или сотен. Капли располагались в один слой и стремились к кристаллоподобному пространственному расположению по отношению друг к другу. Диаметр капель составлял несколько десятков микрон, расстояние между каплями равнялось 2–5 капельным диаметрам. Расстояние между кластером и поверхностью воды было сравнимо с диаметром капель.

Стремление капель воды в капельном кластере к пространственному упорядочению послужило причиной выдвижения в работе [2] гипотезы о возможности существования подобных структур в атмосферных облаках и туманах, их влиянии на поверхностное натяжение и сдвиговую вязкость облачной среды. Для того чтобы выяснить, какова реальная роль упорядоченных капельных структур в атмосфере, нужны детальные знания о свойствах капельных кластеров при различных температурах, давлении, влажности. Необходимы также исследования механизмов взаимодействия капель между собой, причин левитации капель над водной поверхностью. Подобных знаний в настоящее время накоплено мало.

Капельный кластер близок по структуре к упорядоченным слоям пылевого кристалла, возникающего в пылевой плазме (см., например, обзор [3]). Физические процессы, протекающие в пылевых кристаллах, в настоящее время также до конца не изучены и активно исследуются. Вероятно, данные процессы могут иметь много общего с процессами в капельном кластере. Поэтому исследования капельного кластера актуальны не только с точки зрения физики атмосферы, они также могут представлять интерес для физики пылевой плазмы.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование геометрических характеристик кластеров из капель воды при использовании ряда экспериментальных методик, популярных в физике пылевой плазмы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Для получения капельного кластера использовали методику близкую к описанной в работе [1]. В резиновую кювету с внутренним диаметром и глубиной, соответственно, 10 и 1 мм наливали фильтрованную обезгаженную воду и локально подогревали ее снизу с помощью медного круглого стержня (нагревателя) диаметром 1.6 мм, вставленного в сквозное отверстие в дне кюветы. При температуре нагревателя 65–100 °С и температуре окружающего воздуха 20–25 °С на поверхности воды образовывался кластер из выпадающих из пара капель

*E-mail: shavlov@ikz.ru

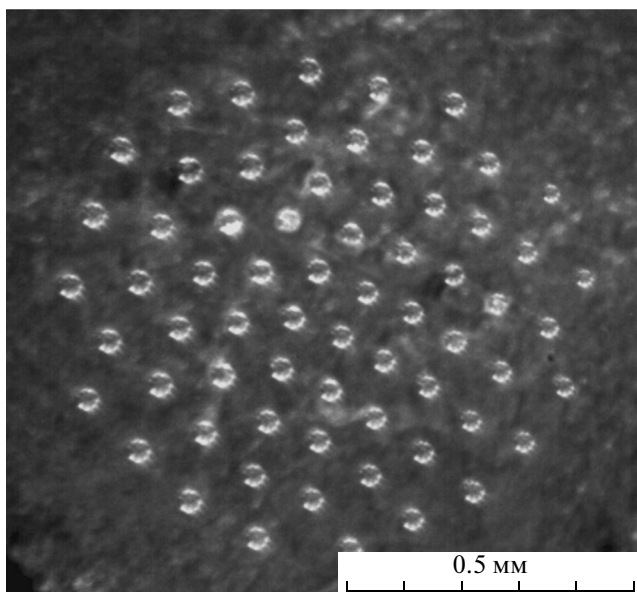


Рис. 1. Видеоизображение капельного кластера над поверхностью воды, нагретой до температуры 90°C

воды. Температуру нагревателя определяли с помощью находящегося в тепловом контакте с ним полупроводникового термодатчика с абсолютной погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Погрешность определения температуры поверхности воды над нагревателем из-за переменной толщины слоя воды в процессе опыта и из-за непостоянной температуры окружающего воздуха оценивали как $+1/-8^\circ\text{C}$. Время ожидания появления кластера было наименьшим при высокой температуре нагревателя, поэтому «низкотемпературные» кластеры получали при высокой температуре, а затем температуру медленно понижали до нужных значений.

Для наблюдения кластера использовали стереоскопический микроскоп МБС-2 с семикратным увеличением. Наблюдения выполняли под углами зрения 90° и 30° к поверхности воды. Малый угол зрения использовали при определении высоты левитации капель над поверхностью.

Регистрацию видеоизображений осуществляли с помощью цифровой камеры MUSEscope 310 M. По видеоизображениям определяли диаметр капель, расстояние между каплями и высоту их зависания над поверхностью. Высоту определяли как половину расстояния между центрами капли и ее зеркального изображения в воде. Абсолютная погрешность определения размеров составляла ± 0.5 пикселей = ± 2 мкм.

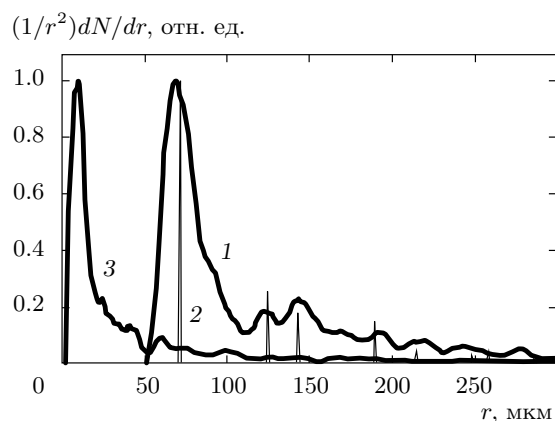


Рис. 2. Парные корреляционные функции капельного кластера при температуре 65°C (1), фрагмента идеальной плоской гексагональной решетки (2), структуры со случайным расположением частиц (3)

Кластер локализуется над той частью поверхности воды, которая расположена над нагревателем и имеет наибольшую температуру. На рис. 1 представлено видеоизображение типичного капельного кластера при температуре 90°C (вид сверху). Капли кластера имеют примерно одинаковые размеры и образуют пространственно-упорядоченную структуру, близкую к структуре плоской гексагональной решетки.

На рис. 2 кривая 1 изображает парную корреляционную функцию капельного кластера, состоящего из 27 капель, при температуре 65°C . Для вычисления функции использовалась формула $(1/r^2)(dN/dr)$, где dN — число пар капель, расстояние между которыми попадает в интервал от r до $r + dr$ при $dr = 1$ мкм. Полученную функцию двукратно сглаживали путем вычисления плавающего среднего по десяти точкам. Для сравнения на рис. 2 приведены аналогичные функции фрагмента идеальной гексагональной решетки, состоящей из 27 узлов (кривая 2), и структуры из 27 частиц со случайным их расположением (кривая 3) — обе со средней концентрацией, совпадающей с концентрацией капель в кластере (к кривой 3 была применена процедура сглаживания, аналогичная примененной к кривой 1). Кривая 1 имеет несколько локальных максимумов, которые совпадают с положениями максимумов идеальной решетки на кривой 2. Таким образом, кривая 1 является объективным свидетельством наличия упорядочения капель в капельном кластере.

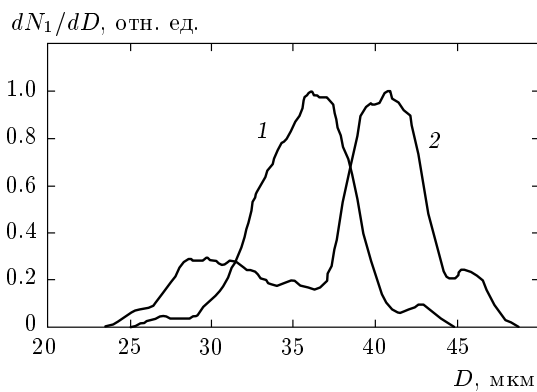


Рис. 3. Функции распределения капель по диаметрам D в кластере спустя 30 с (1), 40 с (2) после образования кластера при температуре 90°C

На рис. 3 изображены распределения 1 и 2 капель в кластере по размерам в различные моменты времени, соответственно, через 30 и 40 с после начала образования кластера при температуре 90°C . Кривые распределения вычислялись по формуле dN_1/dD , где dN_1 — число капель с диаметрами, попадающими в интервал от D до $D + dD$ при $dD = 1 \mu\text{m}$. Полученные кривые сглаживали подобно кривым 1, 3 на рис. 2. Число капель в кластере через 30 с после начала образования кластера составляло 66.

Из рис. 3 видно, что большинство капель в кластере имеют примерно одинаковые размеры. Сдвиг максимума распределения в сторону больших диаметров на кривой 2 по сравнению с кривой 1 свидетельствует о росте капель за счет конденсации с течением времени. Ширина главного пика кривой 2 на полувысоте несколько меньше ширины пика кривой 1. Это показывает, что капли малого размера растут быстрее крупных капель. Приращение массы на единице площади поверхности маленькой капли примерно на 22% больше, чем у большой капли. Причиной различия скоростей роста капель может быть то, что капли меньшего размера левитируют на чуть большей высоте от поверхности воды, чем крупные, и, следовательно, находятся в области больших пересыщений пара (из-за более низких температур). Поэтому скорость роста мелких капель выше. На кривой 2 на рис. 3 присутствует боковой пик, соответствующий группе капель малого диаметра. Это новые 27 капель, выпавшие из пересыщенного пара и присоединившиеся к кластеру в период между 30-й и 40-й секундами с момента образования кластера.

Если температуру нагревателя начать уменьшать, то диаметр капель тоже будет уменьшаться.

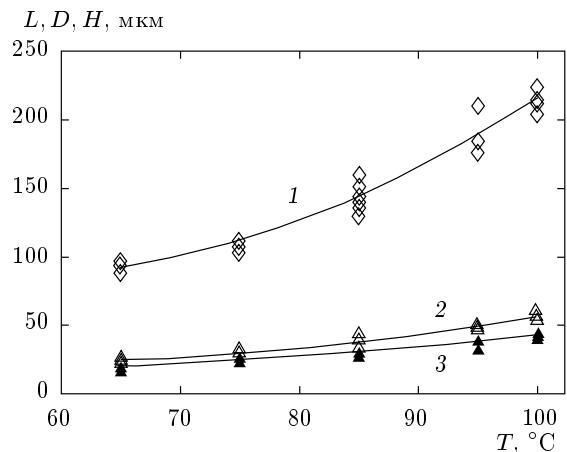


Рис. 4. Температурные зависимости межкапельного расстояния L (1), диаметра D (2) и высоты левитации капель H (3)

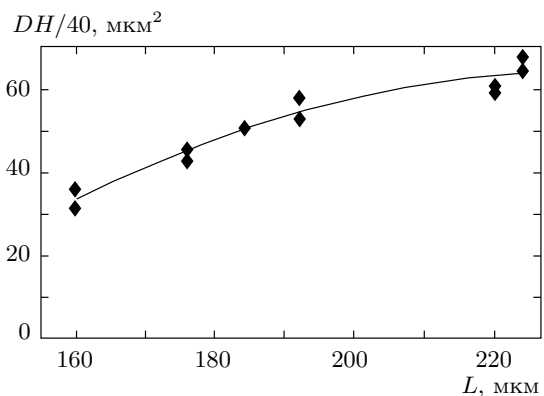


Рис. 5. Значения произведений DH для пар капель в кластерах с различным межкапельным расстоянием L

Это говорит о том, что существует равновесное значение диаметра при фиксированной температуре. Наряду с диаметром существуют также равновесные значения высоты левитации капель и межкапельного расстояния. На рис. 4 изображены зависимости межкапельного расстояния L (кривая 1), диаметра D (кривая 2) и высоты левитации капель H (кривая 3) от температуры. Все параметры L, D, H увеличиваются с ростом температуры нагревателя. Каждая из кривых 1–3 содержит 30 точек в соответствии с количеством обследованных кластеров, равным 30.

При фиксированной температуре между высотой левитации капли и ее диаметром выполняется обратно пропорциональная зависимость $H \propto 1/D$. (Здесь имеется в виду, что диаметр капель имеет

некоторый разброс вблизи равновесного значения.) Для установления зависимости $H \propto 1/D$ в кластере выбирали две капли, различающиеся по диаметру не менее, чем на 10%, и определяли произведение DH для каждой из этих двух капель. Подобные вычисления выполнили для шести пар капель из шести различных кластеров, имеющих разные температуры. Затем нашли среднее (по шести) значение DH отдельно для более крупных капель из пар и отдельно для мелких капель. Получили, что средние значения DH для крупных и мелких капель различаются менее, чем на 1%. Таким образом, была установлена обратно пропорциональная зависимость между диаметром и высотой левитации. Близость произведений DH для крупной и мелкой капель в кластере демонстрирует рис. 5. Пары произведений DH приведены для шести различных кластеров с разными температурами и, соответственно, разными средними расстояниями между каплями L . По оси абсцисс отложено расстояние L . Из рисунка видно, что произведения DH пары капель в кластере мало отличаются друг от друга.

Вопрос о механизме взаимодействия друг с другом капель в кластере (притяжение на больших расстояниях и отталкивание на малых) и причинах левитации кластера над поверхностью воды остается открытым. Выполненные нами дополнительные наблюдения за поведением капель показали следующее.

а) Капли воды могут захватываться из касательного к поверхности воды воздушно-капельного потока и «прилипать» к наиболее нагретой части водной поверхности.

б) По мере испарения воды часть поверхности нагревателя обнажается, при этом капельный кластер притягивается к пространству над слоем воды и отступает вместе с водой от обнажающейся поверхности нагревателя.

Данное поведение капель указывает на существование сил притяжения между каплями и водной

поверхностью, помимо сил отталкивания на малых расстояниях. Таким образом, природа межкапельных взаимодействий и взаимодействия капель с поверхностью воды (конкуренция притяжения и отталкивания в первом случае и то же самое на фоне сил гравитации во втором случае) может оказаться одинаковой. Возможно, как и в пылевой плазме, электрические силы играют в этом взаимодействии важную роль, так как хорошо известно, что поверхность воды при испарении и конденсации может сильно заряжаться электрически. В качестве альтернативы в работе [1] рассматривался стоковский механизм левитации капельного кластера, а также термокапиллярный механизм.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены следующие результаты. Получен капельный кластер при стандартных атмосферных условиях над поверхностью воды при различных температурах. Определены межкапельные расстояния и вычислена парная корреляционная функция капель в кластере, показывающая наличие упорядочения в их пространственном положении. Найдены температурные зависимости среднего расстояния между каплями в кластере, диаметра капель и высоты их левитации над водной поверхностью. Установлена эмпирическая связь высоты левитации и диаметра при фиксированной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Федорев, Письма в ЖЭТФ **81**, 551 (2005).
2. A. V. Shavlov and V. A. Dzhumandzhi, Phys. Lett. A **374**, 2561 (2010).
3. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, В. И. Молотков, О. Ф. Петров, УФН **174**, 495 (2004).