

Прыгающие капли (14 баллов)

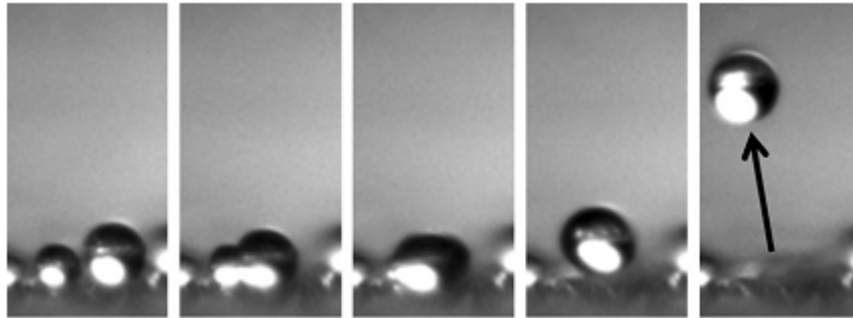


Рис.1 Кадры высокоскоростного видео: формирование подпрыгивающей капли.

Оказывается, достаточно маленькие капли при слиянии могут подпрыгивать (рис. 1).

1. Объясните, откуда в капле берется энергия для прыжка и почему прыгают только относительно маленькие капли. Рассчитайте энергию, высвобождающуюся при слиянии двух капель воды радиусом 7 мкм. (2,5 балла)

2. Оцените начальную скорость и максимальную высоту, на которую может подпрыгнуть капля, образовавшаяся при слиянии двух одинаковых капель радиусом 7 мкм. Однако, высота прыжка таких капель, как правило, не превышает нескольких миллиметров (рис. 2а). Поясните, почему расчетная величина отличается от экспериментальной. (3 балла)

3. Очевидно, что обладающая избыточной энергией капля воды далеко не всегда будет прыгать. Предложите подробный механизм подпрыгивания капли. (3 балла)

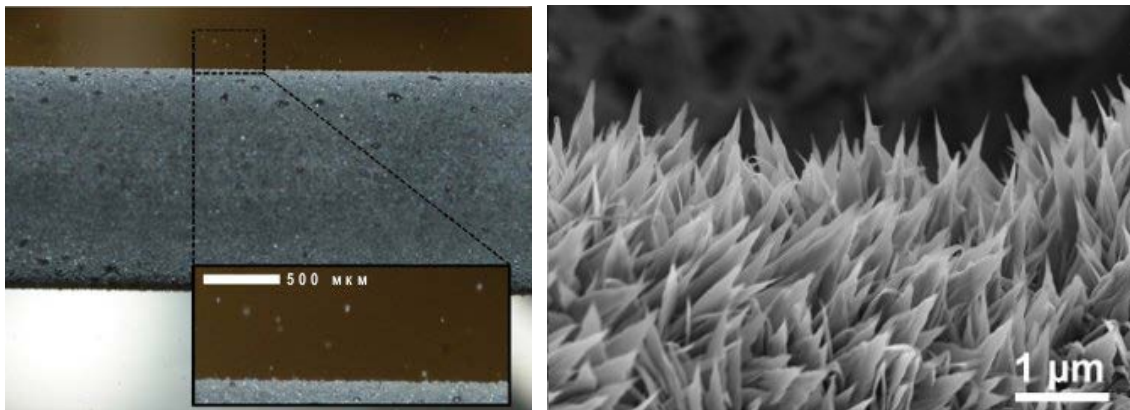


Рис. 2 Поверхность трубки второго типа: а) слияние растущих капель конденсата может сопровождаться подпрыгиванием итоговой капли. б) микроструктура поверхности.

В поисках оптимальных материалов для конденсационных теплообменников (например, змеевиков) ученые исследовали 2 типа металлических трубок. Первый тип – это обычные медные трубки, второй – медные трубки, последовательно обработанные горячим щелочным раствором хлорита натрия и фторированным силаном (рис. 2б). Оказалось, что только на трубках второго типа наблюдались прыгающие капли (рис. 2а).

4. Как меняется смачиваемость поверхности медной трубки на каждом из этапов модификации? Почему капли не хотят прыгать на поверхности обычной медной трубки, но отлично прыгают на модифицированной? Ответы поясните. (2 балла)

5. Поясните, как именно влияет модификация поверхности медной трубки на эффективность конденсации водяного пара и на эффективность теплообмена. Какую роль при этом, помимо прочего, играют прыгающие капли? (3,5 балла)

Ответ.

1. Слияние двух капель в одну большую по размеру сопровождается уменьшением суммарной площади поверхности, и, соответственно, уменьшением поверхностной энергии капель $E = \sigma S$. Именно за счет высвобождающейся поверхностной энергии капли подпрыгивают. Рассчитаем ее величину для сливающихся капель воды радиусом 7 мкм.

Сливающиеся капли одинаковы, поэтому $V_2 = 2V_1$, то есть, $R_2 = \sqrt[3]{2}R_1$, где R_1 и R_2 – радиусы исходных и итоговой капель, соответственно.

Суммарная энергия исходных капель: $E_1 = 2\sigma S_1 = 8\pi\sigma R_1^2$.

Энергия новой капли: $E_2 = \sigma S_2 = 4\pi\sigma R_2^2 = 4\sqrt[3]{4}\pi\sigma R_1^2$.

Высвобождающаяся энергия: $\Delta E = E_1 - E_2 = 8\pi\sigma R_1^2 - 4\sqrt[3]{4}\pi\sigma R_1^2 = 4\pi\sigma R_1^2(2 - \sqrt[3]{4})$.

Подставив в эту формулу справочное значение поверхностного натяжения воды ($\sigma = 72,86 \cdot 10^{-3}$ Н/м), находим:

$$\Delta E = 4 \cdot 3,14 \cdot 72,86 \cdot 10^{-3} \cdot 7^2 \cdot 10^{-6} (2 - \sqrt[3]{4}) = 1,85 \cdot 10^{-11} \text{ (Дж)}.$$

2. Чтобы найти максимальную теоретическую высоту, на которую подпрыгнет итоговая капля, предположим, что вся выделяющаяся энергия переходит сначала в кинетическую, а потом в потенциальную:

$$E = \frac{mv^2}{2}, v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\pi\sigma R_1^2(2 - \sqrt[3]{4})}{\rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot 2 \cdot R_1^3}} = \sqrt{\frac{3\sigma(2 - \sqrt[3]{4})}{\rho \cdot R_1}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 72,86 \cdot 10^{-3} (2 - \sqrt[3]{4})}{1000 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}} = 3,59 \text{ (м/с)}.$$

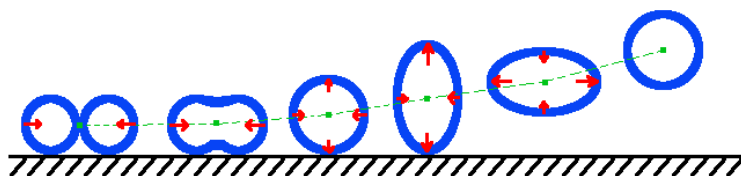
$$E = mgh, h = \frac{E}{mg} = \frac{4\pi\sigma R_1^2(2 - \sqrt[3]{4})}{\rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot 2 \cdot R_1^3 \cdot g} = \frac{3\sigma(2 - \sqrt[3]{4})}{2\rho g} \cdot \frac{1}{R_1} = \frac{3 \cdot 72,86 \cdot 10^{-3} (2 - \sqrt[3]{4})}{2 \cdot 1000 \cdot 9,8} \cdot \frac{1}{7 \cdot 10^{-6}} = 0,66 \text{ (м)};$$

Из выведенных формул можно сделать важный вывод: чем больше радиус капель, тем меньше будет скорость и высота прыжка образующейся капли. То есть, энергия прыжка капель уменьшается с ростом радиуса, и для больших капель ее может не хватить для «отрыва» от поверхности.

Поскольку реально капли подпрыгивают в среднем на несколько мм, в потенциальную энергию переходит лишь малая часть от всей высвобождающейся энергии. Куда может теряться энергия?

- Часть энергии тратится на отрыв капли от поверхности (преодоление сил адгезии);
- часть энергии рассеивается при вязком трении в сливающихся каплях, а также переходит в колебания и нагрев итоговой капли;
- механизм преобразования энергии поверхностного натяжения в кинетическую энергию капли (см. ниже) не подразумевает высокий КПД;
- часть кинетической энергии капли тратится на преодоление сопротивления воздуха;
- капля может прыгать не вертикально вверх.

3.



При соприкосновении двух капель образуется перемычка, объединяющая их содержимое в растущую новую каплю. «Стенки» этой капли начинают двигаться друг навстречу другу под действием силы поверхностного натяжения. Первоначально эта сила не имеет вертикальной составляющей, однако, поскольку в итоговой капле центр масс находится выше, чем в исходных каплях, под действием этой силы, стремящейся придать итоговой капле форму шара, центр масс начинает движение вверх и продолжает его по инерции после слияния капель.

Движущиеся друг навстречу другу капли сталкиваются с большой скоростью: при их столкновении возникает перпендикулярный поток, который может оттолкнуть каплю от поверхности. При этом ученые, исследовавшие феномен прыгающих капель, указывают, что растущая между каплями перемычка расширяется настолько быстро, что может отталкиваться даже от воздуха, находящегося под перемычкой.

4. На каждой стадии модификации происходит увеличение гидрофобности поверхности медной трубки. Первый этап синтеза – получение наноструктурированного «игольчатого» покрытия CuO позволяет достичь «эффекта лотоса». Вторым этапом – обработка гидрофобным фторированным силаном – приводит к формированию дополнительного гидрофобного нанопокртия, которое еще сильнее уменьшает смачивание.

На немодифицированной медной поверхности капли не прыгают, поскольку медь значительно сильнее смачивается водой, выделяющейся при сливании энергии недостаточно, чтобы «оторвать» каплю от поверхности.

5. Вода хуже проводит тепло, чем металл, поэтому при конденсации воды на простых медных трубках образование сплошной пленки снижает эффективность теплообмена и соответственно конденсации.

Модифицированные трубки имеют большую площадь, на которой может происходить конденсация водяного пара. Конденсации также дополнительно способствуют неровности поверхности (гетерогенная нуклеация). В то же время, растущие внутри «нанолеса» капли быстро перемещаются на кончики игл («эффект лотоса»), освобождая поверхность для дальнейшей конденсации.

На гидрофобной поверхности модифицированного теплообменника вода собирается в капли, что уменьшает площадь соприкосновения воды с трубкой – следовательно, высвобождает дополнительную поверхность теплообменника, повышая его эффективность. На гидрофобной поверхности под действием силы тяжести начинают скатываться более мелкие капли, что также дополнительно улучшает теплообмен и ускоряет конденсацию.

Поскольку капли после слияния «отскакивают» от поверхности, то этот механизм быстро освобождает охлаждающую поверхность (чтобы скатится с наклонных поверхностей, капле не нужно расти до более крупных размеров), скорость теплообмена возрастает, эффективность повышается.