

Капельный кластер

А. А. Федоретц¹⁾

Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

Поступила в редакцию 20 января 2004 г.

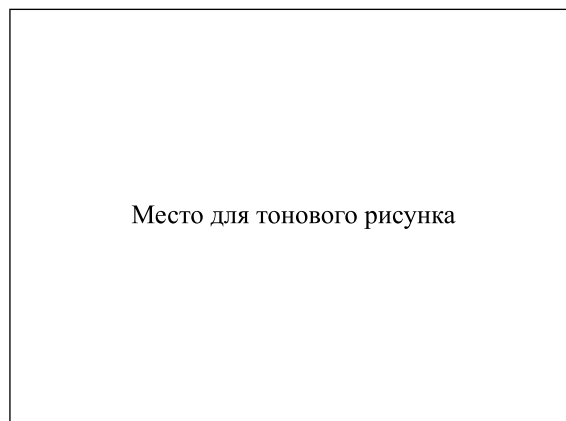
После переработки 15 марта 2004 г.

При облучении открытого горизонтального слоя воды (и некоторых органических жидкостей) пучком света, вызывающим локальный нагрев и испарение жидкости, обнаружено новое явление возникновения на свободной поверхности слоя упорядоченной структуры из микрокапель конденсата.

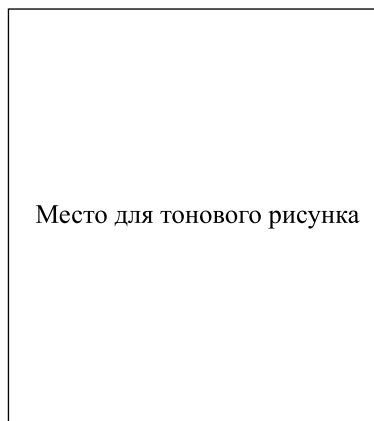
PACS: 44.25.+f, 47.55.D2

Новое явление обнаружено в ходе исследования фотоиндуцированных термокапиллярных течений [1,2], проводимого с применением микроскопа МБС-10, оборудованного приставкой для фото- и видеосъемки. Одной из изучаемых систем был открытый тонкий слой воды на эбонитовой подложке. Стремясь улучшить условия видеозаписи, пучок осветителя ОИ-9М (мощность лампы накаливания 20 Вт) сфокусировали на подложке, что вызвало локальный нагрев и испарение жидкости. В итоге над освещенным участком (прямоугольная область 8×10 мм) возник паро-воздушный конвективный факел, который выглядел как подвижный шлейф тумана. Неожиданным оказалось поведение капель конденсата, выпадавших из шлейфа на слой. Эти капли в виде миниатюрных шариков перемещались по свободной поверхности, не коалесцируя со слоем и между собой. Выпадая на разных участках слоя, капли устремлялись к единому центру, образуя упорядоченную структуру из десятков и сотен капель, которую будем называть капельным кластером, рис.1. Время стабильности капель в кластере легко отслеживалось, так как разрушение одной капли приводило к “исчезновению” целого сектора из десятков капель, рис.2. Оказалось, что при постоянных внешних условиях зарегистрированный период стабильности кластера лимитировался временем непрерывного наблюдения и превышал 10 мин.

На сегодняшний день осуществлены поисковые эксперименты с водопроводной некипяченой, кипяченой и дистиллированной водой и рядом органических жидкостей (бутанолом, бензиловым спиртом и глицерином) с применением подложек из эбонита, карболита и цветного стекла, при варьируемых интенсивности светового пучка, толщине жидкого слоя и режиме испарения (открытая или закрытая кювета). Не-



Место для тонового рисунка



Место для тонового рисунка

Рис.1. а) Типичный капельный кластер. Слой воды на эбонитовой подложке. Круговые бороздки – следы обработки подложки на токарном станке, в нижнем правом углу приведена фотография объект-микрометра (цена большого деления 10 мк); б) Увеличенное изображение кластера

смотря на качественный характер этих опытов, они позволили выявить ряд важных особенностей капель-

¹⁾e-mail: fedorets_alex@utmn.ru

Место для тонового рисунка

Рис.2. Кадры видеозаписи процесса “исчезновения” сектора капельного кластера. Термин исчезновение весьма нагляден, так как при скорости записи 25 кадров в секунду процесс разрушения капель не регистрируется видеокамерой, то есть происходит быстрее, чем за 0.04 с

ных кластеров и, в частности, условия, необходимые для их воспроизведения.

Далее обобщены основные наблюдения, проясняющие природу явления.

1. *Независимо от вещества подложки явление воспроизводилось со всеми пробами воды, бензиловым спиртом и глицерином и не обнаружено для слоев бутанола. Все образцы жидкостей, в которых наблюдалась стабилизация капель, были загрязнены поверхностно-активными веществами (ПАВ).*

2. *Явление связано с тепловым действием света:* а) возникает лишь тогда, когда имеет место сильное поглощение света подложкой либо жидкостью, нагрев и испарение слоя; б) темновая пауза не приводит к потере стабильности капель до тех пор, пока ее продолжительность меньше времени (в наших экспериментах ~ 10 с), за которое температура слоя успевает заметно понизиться.

3. *Существует критическая температура жидкости в области нагрева, ниже которой капли нестабильны (по-видимому, здесь важна не сама температура, а комплекс связанных с ней термодинамических характеристик процесса испарения).* В частности, можно привести данные для системы вода/эбонитовая подложка, полученные с помощью погруженной в слой медь-константановой термопары: а) 43°C – появление тумана в конвективном факеле (температура воздуха $\sim 25^\circ\text{C}$); б) 46°C – кратковременное, в течение нескольких секунд, существование капель, выпадающих на свободную поверхность слоя; с) 52°C – стабилизация капель и образование кластера.

4. *Необходимым условием является открытость слоя в области нагрева, так как стабилизация капель происходит лишь в струях конвективного факела. При перекрытии кюветы прозрачной пленкой, хотя над слоем оставалась прослойка воздуха толщиной около 5 мм, стабильные до этого момента капли исчезали одновременно с затуханием факела.*

5. *Движителем отдельных капель, устремляющим их к единому центру, а также кластера как целого, являются паро-воздушные струи конвективного факела, скорость которых в приповерхностном слое имеет выраженную центростремительную компоненту. Отслеживая застойную область в центре основания конвективного факела, кластер может перемещаться по поверхности слоя на расстояния порядка нескольких собственных диаметров, сохраняя свою структуру.*

Подробнее остановимся на результатах, связанных с ПАВ. Уже в первых наблюдениях кластеров было замечено, что образцы воды загрязнены ПАВ – в них не было ни малейших проявлений конвекции. В чистых же жидкостях, к моменту развития конвективного факела, слой был настолько возмущен термокапиллярными (ТК) течениями, что выпадавшие на него капли оказывались в очень агрессивной, с точки зрения механических воздействий, среде. В жидкостях с высоким поверхностным натяжением (из рассмотренных к таким можно отнести все жидкости, кроме бутанола), в которых ПАВ подавлял ТК эффект, “успокоение” слоя внесением ПАВ всегда сопровождалось и стабилизацией капель. Однако это

не дает ответа на вопрос: ограничивается ли действие ПАВ функцией успокоения слоя или же их роль значительно сложнее? Впрочем, в пользу первой версии свидетельствует то, что стабилизация капель регистрировалась независимо от свойств (использовались растительное масло и гексадеканол) и концентрации ПАВ.

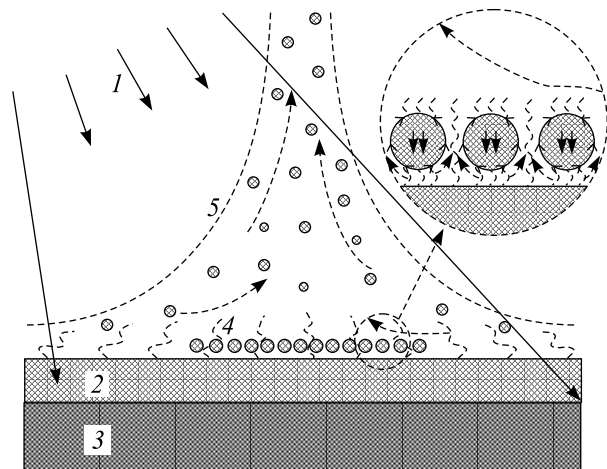


Рис.3. Схема явления в рамках предложенной гипотезы: 1 – пучок света, 2 – жидкий слой, 3 – подложка, 4 – капельный кластер, 5 – конвективный факел. Штриховыми и сплошными стрелками показаны течения газа и жидкости, соответственно; волнистыми линиями – потоки пара

В случае капельного кластера любая гипотеза должна раскрывать природу: а) некоалесценции капель; б) устойчивости капель к испарению; в) упорядочивания структуры кластера. Здесь предлагается гипотеза, основанная на хорошо изученном для относительно крупных капель термокапиллярном ме-

ханизме некоалесценции [3, 4]. Суть этого механизма состоит в том, что при условии поддержания разницы температур капли и жидкой поверхности их слиянию препятствует прослойка газа, увлекаемого ТК течениями жидкости. Согласно гипотезе предполагается, что в каплях кластера развиваются интенсивные ТК течения, рис.3, вызываемые нагревом капли снизу и охлаждением ее сверху. Эти течения, во-первых, увлекают потоки газа (смесь пара и воздуха), которые в совокупности с течениями конвективного факела создают газовую оболочку, предотвращающую коалесценцию капель; во-вторых, позволяют реализоваться динамическому режиму, при котором испарение с вершины капли компенсируется конденсацией пара на ее нижней, охлаждаемой приосевым течением жидкости, поверхности, рис.3. Благодаря балансу потоков пара капли стабилизируются и могут в течение многих минут, не изменяясь в диаметре, существовать на поверхности слоя в условиях, неравновесных с точки зрения уравнения Кельвина²). Что касается структуры кластера, по-видимому, она является результатом действия аэродинамических течений разной природы и, по сути, соответствует плотной упаковке одинаковых шаров на плоскости.

Автор благодарит профессора Д. Швабе за моральную поддержку на начальном этапе исследования, а также А. Н. Аксёнова за техническую помощь.

1. G. Da Costa and J. Calatroni, *Appl. Opt.* **18**, 233 (1979).
2. А. А. Федорец, Дисс. : канд. физ.-матем. наук, ТюмГУ, Тюмень, 2002.
3. P. Dell'Aversana, J. R. Banavar, and J. Koplik, *Phys. Fluids* **8**, 15 (1996).
4. D. Schwabe and P. Hintz, *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **25**, 215 (2000).

²) Речь идет об известном уравнении, устанавливающем связь между кривизной жидкой поверхности и давлением пара.