

03

Фестонная нестабильность капли летучей нерастворимой жидкости, помещенной на поверхность другой жидкости, при охлаждении испарением

© О.А. Тарасов, Н.А. Горбачева

Тюменский государственный университет
E-mail: tarasov@utmn.ru

Поступило в Редакцию 23 августа 2006 г.

Обнаружено, что на периферии капли *o*-силола или изооктана, лежащей на слое горячей воды, развивается фестонная структура в виде круглых возвышенностей. Достигнув диаметра около 1 mm, фестоны инжектируют в центр капли со скоростью 1...2 mm/s. Рост фестонов вызван термокапиллярными течениями, а их инжекция — капиллярными силами, уменьшающими свободную поверхность. Данная нестабильность существенно отличается от известных термокапиллярных нестабильностей, поскольку инжекция фестонов препятствует растеканию капли и продлевает ее жизнь.

PACS: 47.55.D-

Многие широко распространенные промышленные процессы и явления природы тесно связаны с растеканием жидкостей по твердым или жидким подложкам. Примерами могут служить нанесение покрытий и пленок [1,2] и струйная печать [3] либо формирование пленок Ленгмюра [4] и распространение пятен нефти по поверхности воды [5]. Приложение внешних сил (объемных или поверхностных) делает эти явления намного богаче, чем это считалось четверть века назад [6]. Еще в 1935 г. Волковыский [7] исследовал наполнение горячей жидкости (вазелиновое масло, спермацет) на частично погруженную в нее холодную медную пластинку и обнаружил, что при температуре свыше 270...280°C на тройной границе образуется фестонная структура. Он предположил, что важную роль в этом явлении может играть температурный перепад поверхностного натяжения. К сожалению, его работа осталась практически незамеченной. Недавно было независимо установлено, что контактная линия жидкой пленки, растекающейся

по твердой подложке, проявляет пространственно-периодическую неоднородность (структуру) из-за термокапиллярных течений. Cazabat с сотрудниками [8] наблюдала „пальцевидную“ нестабильность жидкой пленки, вызванную температурным градиентом подложки. Redon с сотрудниками [9] описал „фестонную“ нестабильность при растекании капли летучей жидкости по изотермической подложке.

Мы впервые наблюдали фестонную нестабильность капли летучей нерастворимой жидкости, лежащей на слое другой жидкости. Эксперименты были проведены в керамической чашке диаметром 17 см с плоским дном. Чашку заполняли горячей дистиллированной водой до глубины 4 см. Температуру объема воды измеряли мультиметром с термопарой. С помощью микропипетки в центр водной поверхности помещали одиночную каплю изооктана или *o*-ксилола объемом 50 μ l. Профиль капли визуализировали прямым теневым методом [10]. Тень проектировали на дно чашки и регистрировали ее динамику видеокамерой.

При температуре свыше 65°C (60°C) капля изооктана (*o*-ксилола) разрушается на множество мелких капелек под действием быстрых хаотических термокапиллярных течений. При меньшей температуре капля растекается до квазистационарного диаметра и на ее периферии формируются фестоны (рис. 1). В скользящем отраженном свете хорошо видно, что фестоны представляют собой круглые возвышения поверхности капли. Для капли *o*-ксилола первоначальный квазистационарный диаметр был около 11 mm, а для капли изооктана — около 16 mm, тогда как диаметр фестонов был 0.4...0.8 mm. Фестоны растут, сливаются друг с другом и, когда их диаметр превышает критическую величину (около 1 mm), инжектируют в центр капли со скоростью 1...2 mm/s и релаксируют. В центральной части капли спонтанно либо за счет инжекции фестонов возникают холмики с большим диаметром и меньшей кривизной поверхности, чем у фестонов (рис. 2). Холмики также растут и объединяются, и если они есть, то фестоны инжектируют в ближайшие из них.

На первой стадии жизни капля имеет круглую форму и из-за равной скорости испарения жидкости с разных ее краев фестоны расположены равномерно (рис. 1). Вследствие положительной обратной связи между локальной кривизной профиля капли, скоростью испарения и скоростью термокапиллярных течений, флуктуации профиля усиливаются и капля теряет свою круглую форму (рис. 2). В этом случае фестоны

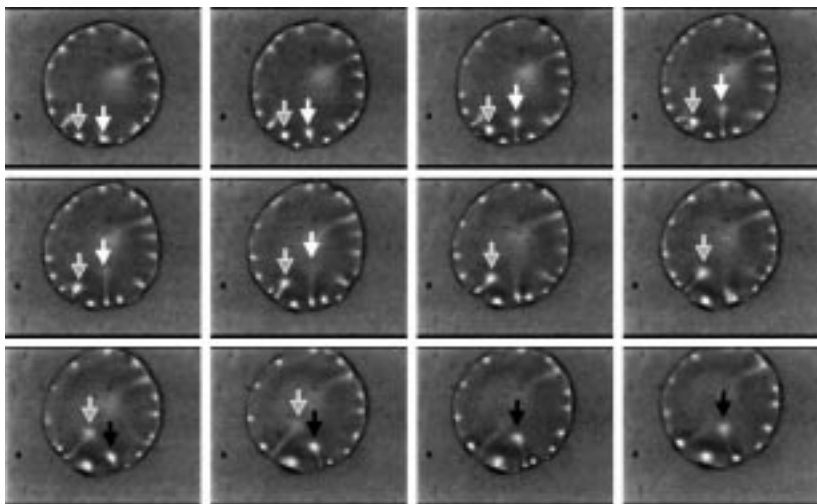


Рис. 1. Теневая картина капли *o*-ксилола, лежащей на поверхности воды с температурой 50°C. Видеокадры размером 28 × 21 мм расположены слева направо и сверху вниз. Интервал между ними равен 0.4 s. Инжектирующие фестоны для наглядности отмечены стрелками.

расположены неравномерно. Отдельные фестоны (1) и их группы (2) инжектируют в центр капли или в холмики (3), а ближайшие холмики объединяются. Инжекция фестонов продолжается в течение почти всего времени жизни капли, при этом их критический диаметр уменьшается с уменьшением диаметра капли. Неоднородное испарение жидкости с различных краев капли приводит к возникновению термокапиллярных течений, направленных от одного края к другому, которые за счет вязкости увлекают окружающие слои жидкой подложки, и капля медленно движется в направлении ее холодного края. Когда капля становится менее 2...3 мм, в диаметре она приобретает скорость до нескольких миллиметров в секунду.

С уменьшением температуры слоя воды время роста фестонов увеличивается, а скорость их инжекции уменьшается. При температуре менее 30°C (35°C) фестоны в капле изооктана (*o*-ксилола) не формируются. При интенсификации испарения, путем создания потоков

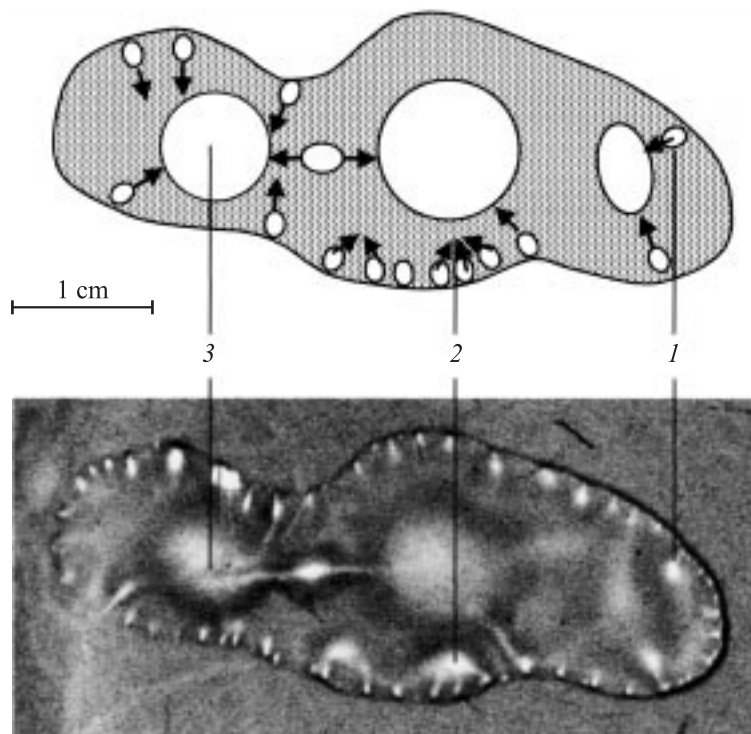


Рис. 2. Теневая картина капли *o*-ксилола на слое воды с температурой 55°C. Профиль капли искажен вследствие неоднородного испарения жидкости с различных ее краев.

воздуха над поверхностью капли, образование фестонов наблюдается при меньшей температуре или ускоряется, если оно имело место.

Инжекция фестонов наблюдается также с прямолинейных границ протяженных жидких пленок и границ проколов внутри пленок. Как и в случае капель, фестоны движутся внутрь пленки по нормали к ее границе либо по направлению к ближайшим холмикам.

Формирование фестонов и холмиков легко объяснить положительной обратной связью между кривизной свободной поверхности жидкости и интенсивностью испарения. Флуктуации испарения при-

водят к неоднородному охлаждению поверхности капли и появлению центростремительных термокапиллярных течений, создающих фестоны и холмики. В свою очередь, испарение с искривленных поверхностей фестонов и холмиков происходит быстрее, что дополнительно охлаждает их поверхность и усиливает термокапиллярные течения, приносящие в них жидкость, благодаря чему фестоны и холмики продолжают расти. Кривизна поверхности фестонов больше, чем у холмиков, так как испарение с края капли интенсивнее, чем с ее центра.

Инжекция фестонов, объединение фестонов и холмиков происходят под действием капиллярных сил, стремящихся уменьшить площадь свободной поверхности. Дополнительную роль играет здесь тот факт, что из-за более интенсивного испарения жидкости температура свободной поверхности фестонов и холмиков понижена и, следовательно, их поверхностное натяжение повышено. Тенденция соседних фестонов инжектировать группами связана с тем, что вязкость изооктана и *o*-силола меньше, чем воды (0.50 и 0.81 сПз против 1.00 сПз при 20°C соответственно), а течение жидкости в более толстом слое испытывает меньшие потери на вязкое трение. Уменьшение скорости инжекции фестонов при уменьшении температуры воды, очевидно, связано с ростом вязкости жидкости в капле.

Существенно, что фестоны препятствуют растеканию капли и продлевают ее жизнь, поскольку они переносят жидкость с края капли в ее центр. Это стабилизирующее влияние фестонов может быть ценным для экологии (препятствовать распространению капель топлива по поверхности воды) и микрофлюидики (уменьшать потери жидкости из капель при их перемещении) или, наоборот, быть вредным для ряда жидкостных технологий (препятствовать образованию однородных пленок жидкостей). Кроме того, фестоны интенсивно и естественным образом перемешивают жидкость в капле. Это их свойство может быть полезным для микрофлюидных смесителей [11].

Список литературы

- [1] Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1981.
- [2] Моро У. Микролитография: В 2 ч. / Пер. с англ. Ч. 1. М.: Мир, 1990.
- [3] Hue P.Le. // Journal of Imaging Science and Technology. 1998. V. 42. N 1. P. 49–62. URL: http://www.imaging.org/resources/web_tutorials/inkjet.cfm.

- [4] *Peterson I.R.* // Functional Organic and Polymeric Materials / T.H. Richardson, Ed. NY: Wiley, 2000.
- [5] *Черняев Д., Забела А.* // Трубопроводная транспортировка нефти. 1995. № 3. С. 15–18.
- [6] *Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.* Физические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976.
- [7] *Volkoviski V.* // Comp. Rend. 1935. V. 200. N 15. P. 1285–1287.
- [8] *Cazabat A.M., Heslot F., Troian S.M.* et al. // Nature. 1990. V. 346. P. 824–826.
- [9] *Redon C., Brochard-Wyart F., Rondelez F.* // J. Phys. II France. 1992. V. 2. P. 1671–1676.
- [10] *Berg J.C., Acrivos A., Boudart M.* // Chem. Eng. 1996. N 6. P. 61–123.
- [11] *Whitesides G.M., Stroock A.D.* // Physics Today. 2001. V. 54. N 6. P. 42. URL: <http://physicstoday.org/pt/vol-54/iss-6/p42.html>.