

03

Перемешивание испаряющихся капель на жидких подложках, вызванное фестонной неустойчивостью

© О.А. Тарасов, Н.А. Тарасова[¶], Н.А. Иванова

Тюменский государственный университет

[¶] E-mail: nata555li@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2016 г.

Предложена новая конфигурация микрофлюидного смесителя, в котором перемешиваемый объем в виде капли летучей жидкости лежит на слое воды. Перемешивание происходит за счет инъекции фестонов, возникающих в капле под действием испарительной термокапиллярной конвекции, из периферии капли в ее центр. Установлена линейная связь между скоростью инъекции и температурой слоя и показано, что за время жизни капли она успевает перемешаться несколько раз.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44946.16367

Перемешивание объемов микрокапель является одной из практических задач микрофлюидики. Обычно она решается приложением к капле электрических [1], магнитных [2] или тепловых [3] полей и предполагает наличие сложной системы каналов или по крайней мере твердой подложки [3–5]. Однако не все образцы (особенно биологические) позволяют подобное воздействие, а существующие схемы перемешивания увеличивают стоимость микрофлюидных устройств. Задачей настоящей работы является разработка микрофлюидного смесителя, не имеющего указанных недостатков. Для этого предложено заменить базу устройства: перейти от твердой подложки к жидкой, а для перемешивания использовать явление фестонной неустойчивости капли летучей жидкости, лежащей на слое нерастворимой в ней другой жидкости (жидкой подложке) [6]. Перемешивание достигается за счет инъекции фестонов с периферии капли в ее центр.

Для оценки эффективности устройства определялось время перемешивания вещества в капле путем измерения диаметра фестонов и скорости их инъекции относительно края капли в зависимости от

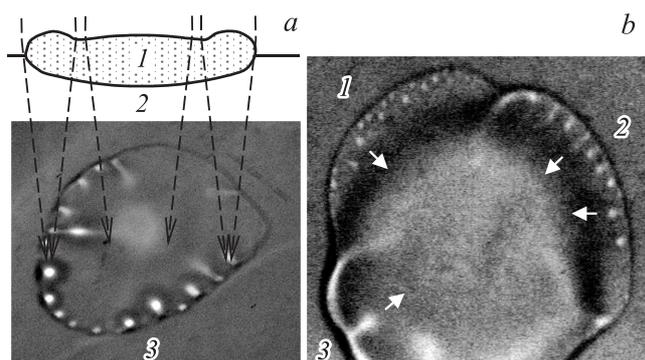


Рис. 1. *a* — теневая картина (3) капли *o*-ксилола (1) с фестонами и центральным холмиком на слое воды (2) с температурой 45°C, размер кадра 25 × 21 мм. *b* — капля изооктана на слое воды с температурой 36°C, размер кадра 16 × 14 мм. 1–3 — номера областей.

температуры подложки. Подложкой служила дистиллированная вода с температурой от 24 до 45°C, а веществами капли — химически чистые изооктан, *n*-гептан и *o*-ксилол (рис. 1, *a*). Капля объемом 50 μl помещалась на подложку толщиной 4 см, изображение капли с фестонами визуализировалось прямым теневым методом на дне сосуда и осуществлялись его видеозапись и покадровая обработка. Начальный диаметр капель был 10–20 мм, что соответствует их толщине 175–700 μm , а фокусное расстояние фестонов — около 4 см, что соответствует их радиусу кривизны 2 см и приращению толщины капли над ними в 6 μm .

Интересная особенность явления, затрудняющая его исследование, состоит в том, что пространственные флуктуации скорости испарения вещества капли приводят к ее неравномерному охлаждению и формированию термокапиллярных (ТК) течений, искажающих круглый профиль капли. В свою очередь искажение профиля капли приводит к пространственной неоднородности скорости испарения. Таким образом, имеется обратная связь между скоростью испарения и локальной горизонтальной кривизной профиля капли.

Так, если возникает выпуклый выступ границы капли относительно ее неискаженной круговой границы, это вызывает усиление испарения

вещества выступа, формирование ТК-течений в выступ и его рост. В ряде случаев, поскольку минимизации поверхностной энергии соответствует сферическая форма выступа, происходит втягивание вещества в область центра выступа, утоньшение перешейка, соединяющего выступ с каплей, разрыв перешейка и отрыв вещества выступа от объема материнской (основной) капли в виде микрокапли. Микрокапля движется под действием ТК-течений в ней, направленных в сторону от материнской капли, т.е. в сторону с большей скоростью испарения. В большинстве случаев микрокапля не успевает сформироваться и отрываться от материнской капли, а происходит испарение тонкой пленки жидкости на периферии выступа, уменьшение кривизны выступа и втягивание выступа в материнскую каплю под действием капиллярных статических сил. При формировании вогнутого профиля границы капли все происходит с точностью до наоборот. Чаще же формируются незначительные (5–10% от радиуса капли) искривления профиля капли, которые не успевают усилиться, а за 0.5–1 с релаксируют (рис. 1, *a*).

На границе капли вблизи области формирования фестоны также происходит искажение профиля капли (рис. 1, *b*, область 3), которое эволюционирует как по мере роста фестоны, так и в процессе его инъекции, поскольку рост фестоны обусловлен притоком вещества к краю капли, а его инъекция — уносом вещества капли с ее периферии в центр и одновременным притоком вещества с прилегающих границ капли к месту, откуда фестон инжектировал, и вслед ему. В конечном итоге пространственное различие начальных условий на краю капли приводит к различию условий для роста и инъекции фестонов. Так, на рис. 1, *b* три области с различной толщиной края капли (толщина растет в ряду 1 → 3) дают фестоны трех различных размеров.

Важно также отметить, что, поскольку капля лежит не на твердой, а на жидкой подложке, отсутствует условие прилипания и течение в капле индуцирует течение в объеме подложки. По этой причине хаотические течения в капле (и соответственно в подложке) не только искажают профиль капли, но и приводят к ее горизонтальному движению (кривая 3 на рис. 2, *a*). При этом становятся различными и скорости испарения на разных краях капли, так как наступающий фронт капли оказывается в области с меньшей концентрацией паров ее вещества, а отступающий фронт — с большей.

Учитывая движение капли по подложке и изменение ее профиля в процессе инъекции фестонов, на каждом кадре (размером 600 × 800 px

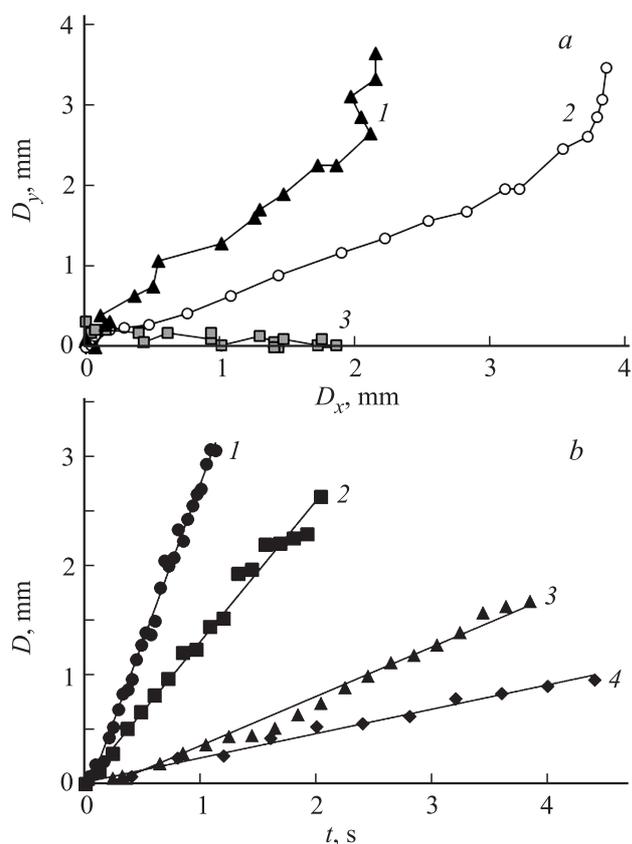


Рис. 2. *a* — типичные смещения D_x и D_y по двум осям края капли (3) и центра фестона (2) относительно сосуда, а также смещение фестона относительно края капли (1) с шагом 0.08 s. Капля изооктана на слое воды с температурой 45°C. *b* — смещение D фестонов в зависимости от времени t с начала инъекции относительно края капли изооктана при различных температурах водной подложки. T , °C: 1 — 45, 2 — 37, 3 — 32, 4 — 24.

при масштабе 28 px/mm) измеряли координаты центра фестона и координаты ближайшего к нему края капли (кривые 2 и 3 на рис. 2, *a*). При покадровой обработке видеозаписи инъекции выбирались фестоны,

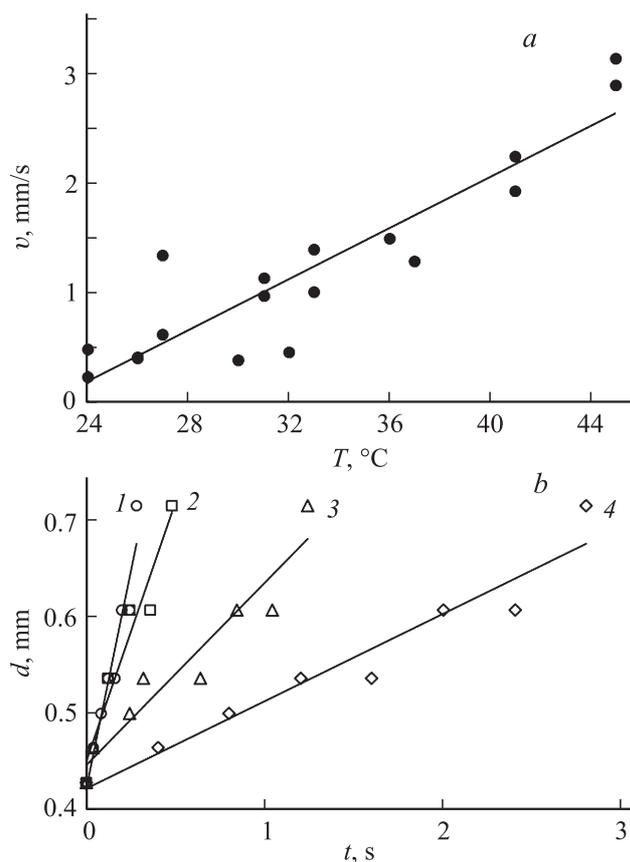


Рис. 3. *a* — скорости v фестонов в капле изооктана на водной подложке в зависимости от ее температуры T . *b* — диаметры d фестонов в той же системе в зависимости от времени t с момента начала их инъекции при различных температурах подложки. T , °C: 1 — 45, 2 — 37, 3 — 32, 4 — 24.

для которых отсутствовало существенное изменение профиля ближайшей границы капли и неравномерное движение капли по подложке. Смещение фестона определялось как смещение относительно края капли за время между кадрами ($1/25$ s) (кривые 1 на рис. 2, *a* и *b*). Такая

оценка смещения фестоны точнее, чем оценка относительно центра масс капли, так как под действием хаотических изменений профиля капли положение ее центра также хаотически меняется, и все флуктуации ее границ (а не только границ вблизи фестоны) вносят погрешность в определение скорости фестоны.

Обнаружена сильная линейная корреляция (коэффициент 0.85) скорости фестоны и температуры подложки (рис. 3, *a*), но прямой зависимости между данными параметрами нет. Это связано с тем, что из-за искажения профиля капли и движения капли относительно облака ее паров условия роста и инъекции для каждого фестоны индивидуальны. Эти условия различны также и потому, что расстояние между соседними фестоны неодинаково (рис. 1, *a*) и определяется процессами инъекции близлежащих фестоны (тем, как близко они расположены, в какой момент и в какую сторону инжектируют).

Кроме того, под действием испарительной ТК-конвекции в центральных областях капли формируются холмики, близость которых также влияет на рост и инъекцию фестоны (рис. 1, *a*). Стремясь уменьшить поверхностную энергию, фестоны инжектируют не в центр капли, а в центр ближайшего холмика или в след недавно инжектировавшего фестоны. При этом наличие холмика или указанного следа вызывает более раннюю инъекцию ближайшего фестоны, как и наличие выпуклости капли в виде следа от инжектировавшего фестоны. Поэтому при заданной температуре подложки скорости инъекции фестоны различаются, причем это наблюдается для фестоны, инжектирующих как последовательно, так и одновременно (рис. 1, *b*). Различие в скорости инъекции фестоны такое, как будто они инжектируют при температуре на 1–7°С выше или ниже заданной (рис. 3, *a*).

На рис. 2, *b* показана зависимость смещения фестоны с момента их инъекции относительно края капли для различных температур жидкой подложки, а на рис. 3, *b* — изменение диаметров фестоны в процессе их инъекции (начало инъекции принято за 0 s). Зависимости диаметров фестоны построены для меньшего интервала времени, чем зависимости смещения фестоны, так как при диаметре фестоны свыше 0.7 mm их границы из-за размытия было невозможно определить, в то время как положение центра фестоны еще уверенно определялось.

Из рис. 2, *b* и 3, *b* хорошо видно, что как смещения фестоны, так и их диаметры зависят от времени линейно. При этом, как указывалось выше, для заданного вещества капли скорость фестоны растёт с

Скорости инъекции фестонов, времена жизни капель и времена их перемешивания фестоном в зависимости от вещества капли и температуры подложки

Жидкость капли	Температура водной подложки, °С	Вязкость жидкости, $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [7]	Скорость инъекции фестонов, mm/s	Время жизни капли t_l , s	Время полного перемешивания капли фесто- нами t_m , s	t_l/t_m
Изооктан	45	0.38	2.64*	60	30	2.0
»	37	0.42	1.71*	80	45	1.8
»	32	0.44	1.12*	100	80	1.3
»	24	0.485	0.19*	120	405	0.3
<i>o</i> -ксилол	45	0.59	0.69	180	45	4.0
<i>n</i> -гептан	37	0.35	2.54	45	12	3.8

* Значения для изооктана рассчитаны на основе линейного тренда на рис. 3, а

ростом температуры. При заданной же температуре скорость фестонов выше у менее вязких жидкостей. Однако обратно пропорциональной зависимости скорости инъекции от динамической вязкости капли не наблюдается, что указывает на сильно нелинейный характер явления. Так, рост температуры изооктана от 24 до 45°С вызывает уменьшение его вязкости в 1.3 раза [7], в то время как скорость инъекции фестонов растет в 14 раз (см. таблицу). Аналогичный нелинейный результат получается при сопоставлении скоростей инъекции в каплях разных жидкостей при одинаковых температурах слоя воды. Так, при температуре 45°С вязкость *o*-ксилола в 1.6 раза больше вязкости изооктана [7], а скорость инъекции в капле *o*-ксилола в 3.8 раза меньше, чем в капле изооктана.

В таблице приведено определенное в эксперименте время жизни капель разного состава (с момента их помещения на подложку до полного испарения) при разной температуре подложек, а также даны оценки времени полного перемешивания капель на основе экспериментальных данных об объемах и скоростях инъекции фестонов. При температуре подложки выше 30°С в течение жизни объем капли успевает перемешаться 1–4 раза (см. таблицу). Поскольку процесс фестонного перемешивания происходит без приложения внешних полей и использования сложных микроканалов, это существенно упрощает и

удешевляет микрофлюидные смесители [8]. Таким образом, на примере процесса перемешивания показано, что замена твердой базы микрофлюидики на жидкую дает ряд преимуществ и открывает новые перспективы для микрофлюидики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-01-92602 КО_а) и Министерства образования и науки РФ (проект № 1019).

Список литературы

- [1] *Тимиров Ю.И., Скалдин О.А., Басырова Е.Р.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 7. С. 62–65.
- [2] *Диканский Ю.И., Борисенко О.В., Беджанян М.А., Коробов М.И.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 9. С. 24–30.
- [3] *Grigoriev R.O., Schatza M.F., Sharmab V.* // Lab Chip. 2006. V. 6. P. 1369–1372.
- [4] *Nguyen N.-T., Wu Z.* // J. Micromech. Microeng. 2005. V. 15. P. 1–16.
- [5] *Whitesides G.M., Stroock A.D.* // Phys. Today. 2001. V. 54. P. 42–48.
- [6] *Тарасов О.А., Горбачева Н.А.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 4. С. 39–44.
- [7] *Vargaftik N.B.* Handbook on thermophysical properties of gases and liquids. Ed. 2. M.: Nauka, 1972. 720 p.
- [8] *Shabarov A.B., Tarasova N.A., Tarasov O.A.* Method of creating flow in liquid droplet. RF Patent N 2403554, 2010.