

03;07

Влияние толщины жидкого слоя на рост капли, управляемый тепловым действием лазерного излучения

© Н.А. Иванова, Б.А. Безуглый

Тюменский государственный университет
E-mail: natbruss@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 октября 2008 г.

Исследован рост капли в тонких слоях спиртоводного раствора при действии концентрационно-капиллярного течения, управляемого пучком лазера. Установлено, что с повышением толщины слоя раствора время формирования обособленной от раствора капли увеличивается, а время роста диаметра образовавшейся капли до максимально возможного значения, определяемого критериями устойчивости, уменьшается. На начальном этапе формирования капли наблюдается незначительное уменьшение ее диаметра, вызванное кратковременным увеличением испарения.

PACS: 47.55.pf, 47.61.-k, 42.62.-b

Современные биохимические микролаборатории, использующие капли жидкости в качестве микрореакторов и транспортных средств для реагентов, обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению с их аналогами, основанными на использовании неразрывного течения в микроканалах [1,2]. Однако для эффективной работы этих микролабораторий необходимо создавать капли со строго контролируемыми размерами, формой или объемом. Разрабатываемые в настоящее время прецизионные методы дозирования основаны на

применении оптических пучков для управления капиллярными течениями, формирующими дискретные порции жидкости [3–9].

Ряд работ [5–9] посвящен изучению процесса создания капли жидкости при действии концентрационно-капиллярного (КК) течения [5], управляемого тепловым действием света. Этот процесс состоит в том, что при нагреве пучком света слоя раствора тензоактивного вещества в летучем растворителе начинается термокапиллярное растекание раствора из зоны облучения, сопровождающееся испарением растворителя. Испарение же ведет к повышению концентрации тензоактивного вещества, повышающего поверхностное натяжение раствора в зоне нагрева. В результате термокапиллярное растекание сменяется КК-стягиванием раствора в зону нагрева, которое формирует обособленную каплю [5].

В [7] установлено, что при формировании капли в тонком слое раствора, поглощающего излучение лазера, скорость роста капли и ее форма зависят от мощности пучка и концентрации тензоактивной компоненты. В [8,9] показано, что при создании капли в смачивающей пленке раствора под газовым пузырьком, зажатым в тонкой ячейке с прозрачными стенками, скорость роста капли повышается с уменьшением начального диаметра пузырька. Влияние последнего определяется не только расстоянием границы раствора до области формирования капли, но и толщиной смачивающей пленки, которая увеличивается с уменьшением начального диаметра пузырька. Однако в данных опытах роль толщины пленки может маскироваться усилением процессов тепломассопереноса, вызванным повышением температуры раствора за счет роста поглощаемой мощности излучения с увеличением толщины пленки при уменьшении начального диаметра пузырька.

В данной работе предпринята попытка оценить влияние толщины h слоя раствора на кинетику роста капли при следующих условиях: поглощаемая слоем мощность $P_a(h)$ лазерного излучения не изменяется с толщиной слоя: $P_a(h) = \text{const}$; величина поглощаемой мощности увеличивается с ростом h слоя: $P_a(h) \neq \text{const}$.

Источником излучения служил полупроводниковый лазер ($16 \pm 0.2 \text{ mW}$, 659 nm). Наблюдение за ростом диаметра D капли вели через микроскоп, оснащенный видеокамерой (560 линий, 25 кадров в секунду), соединенной через TV тюнер с компьютером для оцифровки видеопотока. Зависимость диаметра капли от времени $D(t)$ строили по полученной последовательности кадров путем измерения D капли на каждом кадре. Толщину слоя раствора в пластиковой чашке Петри

(диаметр 4 см) выставляли при помощи отрезков, калиброванных по диаметру проволочек [5]. Измерение кинетики роста D капли проводили для следующих толщин слоев: 100 ± 20 , 150 ± 30 и $300 \pm 30 \mu\text{m}$. В качестве исследуемой жидкости использовали раствор этанола в воде при концентрации около 55% (w/w), который был подкрашен бриллиантовым зеленым для обеспечения поглощения излучения лазера.

Случай $P_a(h) = \text{const}$. Для выполнения условия $P_a(h) = \text{const}$ поступали следующим образом. Маточный окрашенный раствор разбавляли неокрашенным раствором той же концентрации, подбирая такие пропорции, при которых мощность излучения лазера, поглощаемая слоями разной (от 100 до 300 μm) толщины, была постоянной и равной $P_a(h = 100 \mu\text{m})$ слоя маточного раствора с $h = 100 \mu\text{m}$. Методика контроля $P_a(h)$ для слоев разной толщины была следующей. На пластинку из оргстекла помещали две калиброванные проволочки на расстоянии около 2 см друг от друга, затем тестируемый раствор добавляли на пластинку между проволочек и накрывали второй пластинкой. На заполненную таким образом ячейку направляли пучок лазера и с помощью измерителя мощности (Nova Ophir) детектировали прошедшую мощность излучения. Затем вычисляли величину мощности, поглощаемой слоем раствора, по формуле: $P_a(h) = P_{t0} - P_{t1}$, где P_{t0} — мощность излучения лазера, прошедшая через пустую ячейку, а P_{t1} — мощность, прошедшая через ячейку со слоем раствора, толщина которого задается диаметром проволочек.

На рис. 1 даны временные зависимости роста диаметра $D(t)$ капли в слоях разной толщины. Обнаружено, что в слое толщиной около 300 μm формирование капли не происходило даже при длительных, более 3 min, временах облучения. Однако в зоне падения пучка лазера на слой был заметен холмик. Это говорит о том, что в зоне нагрева действует КК-градиент, стягивающий жидкость в холмик [5], но величина этого градиента недостаточна для обособления холмика от раствора и появления капли. В слое толщиной около 100 μm формирование обособленной капли происходило через 2–3 s от начала облучения, а в слое 150 μm это время увеличивалось незначительно, до 4–5 s.

На рис. 1 видно, что при $P_a(h) = \text{const}$ в более тонком слое (около 100 μm) рост капли заметно медленнее, чем в более толстом слое. По-видимому, это связано с тем, что толщина смачивающей пленки между каплей и раствором, по которой происходит приток жидкости

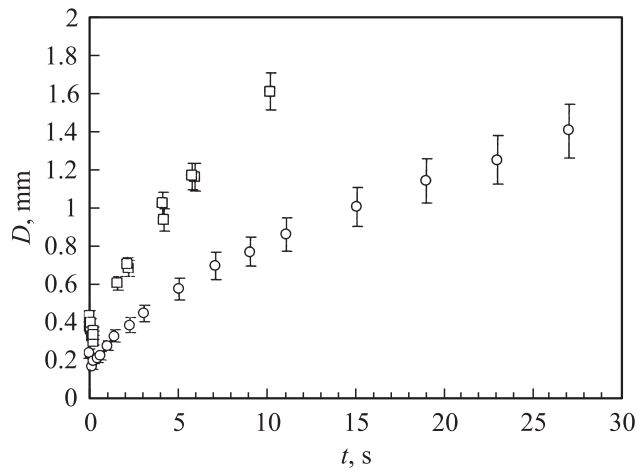


Рис. 1. Эволюция диаметра капли водно-этанольного раствора с концентрацией 55% в слоях толщиной: ○ — $100 \mu\text{m}$; □ — $150 \mu\text{m}$, при $P_a(h) = \text{const}$.

в каплю, слишком мала и, следовательно, потери на вязкое трение увеличиваются, приводят к понижению скорости притока раствора в каплю КК-течением.

В ходе опытов замечено, что капля в пучке растет лишь ограниченное время, а затем становится неустойчивой и уходит из пучка. Такое поведение капли наблюдалось ранее с другими растворами и источниками излучения [5–9]. Предположительный механизм неустойчивости описан в [7]. Из-за высокой скорости роста капли в слое раствора с $h = 150 \mu\text{m}$ (рис. 1) время ее устойчивого нахождения в зоне проекции пучка лазера оказалось почти в 3 раза меньше, по сравнению с более тонким $h = 100 \mu\text{m}$ слоем.

На основе полученных данных можно заключить, что при $P_a(h) = \text{const}$ с повышением толщины слоя раствора время формирования обособленной капли увеличивается, а время роста диаметра капли до максимально возможного значения, определяемого критериями устойчивости, уменьшается.

Случай $P_a(h) \neq \text{const}$. Предварительно найдено, что при увеличении толщины от 100 до $300 \mu\text{m}$ слоя маточного окрашенного (неразбавленного) раствора величина $P_a(h)$ возросла лишь в 1.3 раза.

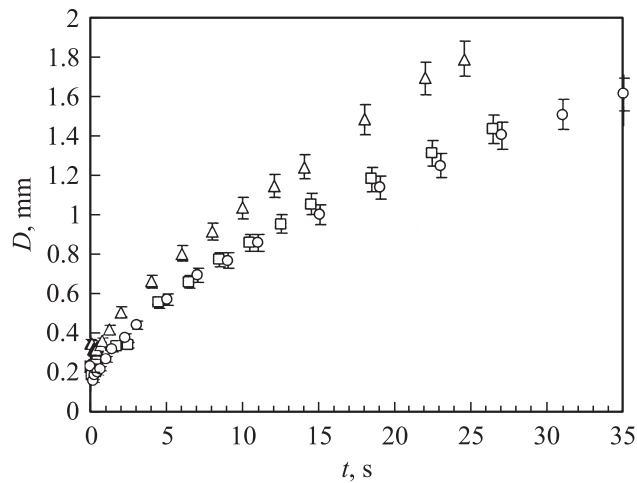


Рис. 2. Эволюция диаметра капли водно-этанольного раствора концентрацией 55% в слоях толщиной: \circ — $100\ \mu\text{m}$; \square — $150\ \mu\text{m}$ и Δ — $300\ \mu\text{m}$ при $P_a(h) \neq \text{const}$.

На рис. 2 показаны временные зависимости диаметра $D(t)$ капли в слоях толщиной 100, 150 и около $300\ \mu\text{m}$ при условии, что поглощаемая мощность $P_a(h)$ растет с толщиной слоя. Как и предполагалось выше, незначительное увеличение поглощаемой слоем мощности при изменении его толщины заметно влияет на процесс роста капли. В этом случае даже в слое с $h = 300\ \mu\text{m}$ формирование обособленной капли происходило уже через 50 s после начала облучения.

Видно, что в слое с $h = 150\ \mu\text{m}$ скорость роста D капли уменьшилась по сравнению со случаем $P_a(h) = \text{const}$ и кривая $D(t)$ на рис. 2 практически совпадает с таковой для слоя толщиной $100\ \mu\text{m}$. Кроме этого, в слое $150\ \mu\text{m}$ наблюдался эффект прожигания капли [5,7], вызванный повышением температуры в ее центральной части. Отметим также, что время формирования капли в слое с $h = 150\ \mu\text{m}$ уменьшилось до 1–3 s по сравнению с предыдущим случаем. Отмеченное выше снижение скорости роста D капли может быть обусловлено усилением парового оттока растворителя из капли за счет ее значительного нагрева. Кроме этого, возможен нагрев пленки смачивания вблизи капли, который

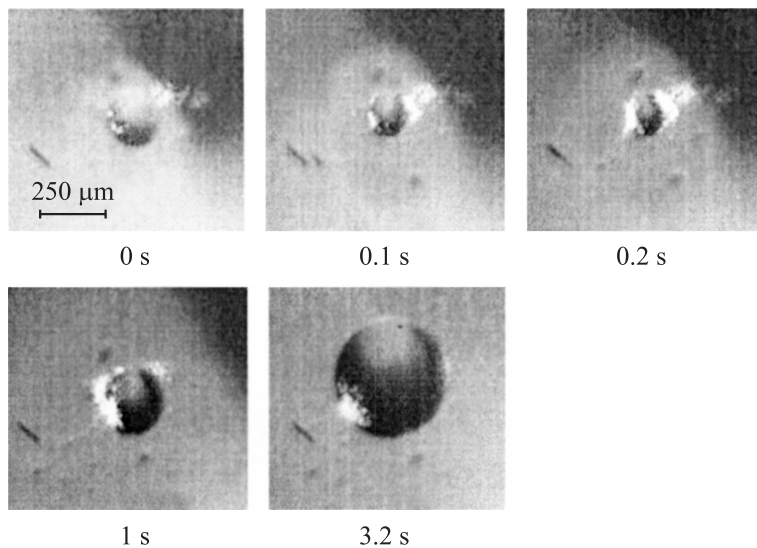


Рис. 3. Фотографии изменения диаметра капли в слое раствора с $h = 150 \mu\text{m}$. Время облучения 3.2 s. Первый кадр соответствует моменту отделения капли от раствора.

приводит к утончению или пересыханию этой пленки из-за испарения, в результате чего скорость притока раствора в каплю снижается. Эти факторы препятствуют быстрому увеличению D капли.

Несмотря на количественные различия, кинетика роста капли при $P_a(h) \neq \text{const}$ на начальном этапе имеет такой же характер, как и при условии $P_a(h) = \text{const}$, а именно: кратковременное ($\approx 0.2 \text{ s}$) уменьшение D капли после ее обособления от раствора, сменяется его ростом (начальный участок на рис. 1 и 2). На рис. 3 приведена последовательность кадров, соответствующая первым 3 s от момента появления капли. Это обусловлено тем, что в момент обособления капли от раствора она оказывается окруженной лишь тонкой пленкой смачивания (рис. 3), из-за чего КК-приток раствора в каплю резко снижается. В результате этого паровой отток растворителя из капли превышает приток раствора по пленке смачивания, и отделившаяся от раствора капля начинает уменьшаться. Однако такой процесс длится

недолго, поскольку вместе с испарением растворителя концентрация воды в капле увеличивается, что ведет к повышению величины концентрационного градиента поверхностного натяжения и, как следствие, к усилению питающего каплю КК-течения.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (РНП.2.1.1.2109).

Список литературы

- [1] *Mukhopadhyay R.* // *Anal. Chem.* 2006. N 78. P. 1401–1404.
- [2] *Shia-Yen Teh, Lin R., Lung-Hsin Hung, Lee A.P.* // *Lab Chip.* 2008. P. 198–220.
- [3] *Chiou P.-Y., Chang Z., Wu M.C.* // *J. Microelectromech. Syst.* 2008. V. 17. P. 133–138.
- [4] *Varoud C.N., Vincent M.R.S., Delville J.-P.* // *Lab Chip.* 2007. N 7. P. 1029–1033.
- [5] *Безуглый Б.А.* Канд. дис. М.: МГУ, 1983. 270 с.
- [6] *Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Тарасов О.А.* Патент РФ № 2267092. // *Б.И.* 2005. № 36.
- [7] *Иванова Н.А., Безуглый Б.А.* // *Колл. журнал.* 2007. Т. 69. № 6. С. 784–790.
- [8] *Иванова Н.А., Безуглый Б.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2005. Т. 31. В. 15. С. 76–79.
- [9] *Безуглый Б.А., Иванова Н.А.* // *Изв. РАН. МЖГ.* 2006. № 2. С. 122–130.