

03;07

## Создание капель жидкости в пузырьках с использованием механизма капиллярной конвекции, управляемой пучком света

© Н.А. Иванова, Б.А. Безуглый

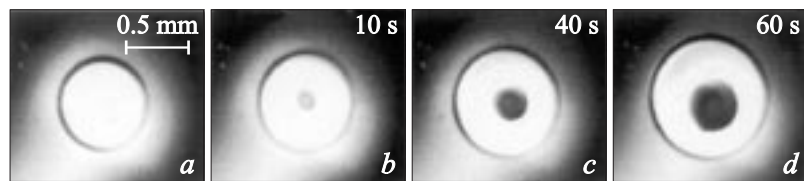
Тюменский государственный университет  
E-mail: nivanova@utmn.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2005 г.

Предложен новый подход к созданию капель жидкости для микрофлюидных устройств. Капля объемом несколько десятков нанолитров формируется тепловым действием пучка света на смачивающую пленку в воздушном пузырьке, расположенном в тонком слое жидкости между двумя пластинами. Изучена кинетика роста капель в пузырьках разного диаметра и оценены характерные объемы капель.

Дозирование микроколичеств жидкости в виде капель, которые могут содержать исследуемые биологические и химические вещества, является важным процессом в биохимических и микрофлюидных устройствах [1]. Основная часть исследований в этом направлении связана с изучением механизмов формирования капель под действием градиента давления, например, путем инъекций порций газа через гидрофобные отверстия в стенке микроканала с прокачиваемой через него дозируемой жидкостью [2,3] либо под действием капиллярных сил, управляемых электрическими полями [4].

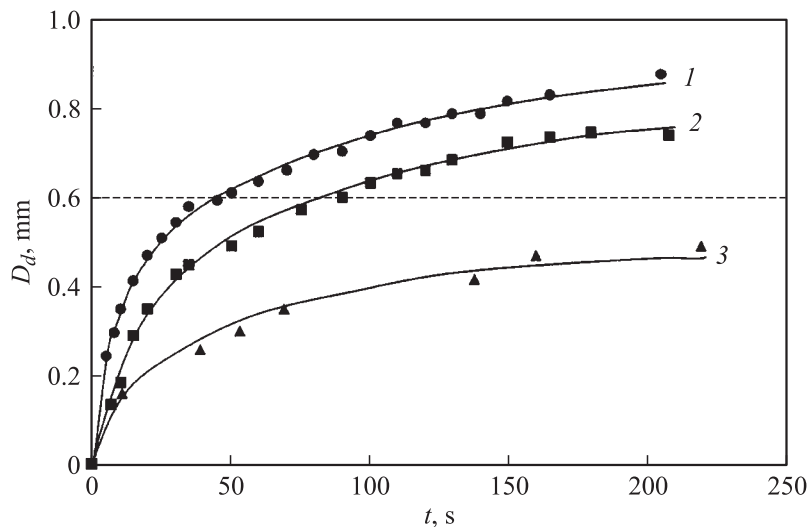
В данной работе предлагается подход к дозированию сверхмалых объемов жидкости и концентрированию в них исследуемых веществ, основанный на явлении концентрационно-капиллярной (КК) конвекции, управляемой тепловым действием пучка света [5]. КК конвекция наблюдается в тонких слоях многокомпонентных жидкостей, поглощающих оптическое излучение, в состав которых входит малолетучее тензоактивное вещество (ТАВ), при выполнении условия  $|\sigma_T|\nabla T < \sigma_C \nabla C$ , где  $\sigma_T < 0$  и  $\sigma_C > 0$  — тепловой и концентрационный коэффициенты поверхностного натяжения (ПН);  $\nabla T$  — градиент температуры,



**Рис. 1.** Появление и рост капли в пузырьке с  $D_0 \cong 0.7$  мм, расположенном в ячейке с  $h \cong 50 \mu\text{m}$ , заполненной раствором йода в этаноле (вид сверху). Первый кадр — включение пучка света; в верхнем правом углу указан масштаб.

а  $\nabla C$  — градиент концентрации ТАВ. В качестве модели микрофлюидного устройства выбрана ячейка Хеле–Шоу с зазором толщиной  $h = 10.0 \pm 0.1$  и  $50.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ , заполняемым рабочей жидкостью. В опытах использовали насыщенный при  $20^\circ\text{C}$  раствор йода в 96%-м этиловом спирте, в котором ТА веществом служила вода. Газовые пузырьки в ячейке создавали по методике, описанной в [6], так, что между стенками ячейки и поверхностью пузырька оставалась смачивающая пленка толщиной  $\delta \ll h$ . Пузырек в ячейке необходим по двум причинам: наличие свободной межфазной границы позволяет использовать силы ПН для создания течения жидкости; газ пузырька предотвращает дисперсию реагентов из капли в окружающий раствор [7].

Экспериментальная установка подробно описана в [6]. На поглощающую излучение пленку под пузырьком фокусируется пучок света (рис. 1, *a*) от ртутной лампы в пятно диаметром  $d = 0.6 \pm 0.1$  мм и мощностью  $P \cong 100$  мВт. Нагрев пленки жидкости сопровождается испарением летучей компоненты с объемной скоростью  $Q_e \propto P_a / \rho L_e$  (где  $P_a$  — поглощаемая мощность,  $\rho$  — плотность жидкости,  $L_e$  — скрытая теплота парообразования) и ростом концентрации ТАВ в зоне проекции пучка света на пленку, вследствие чего возникает радиальный  $\nabla C$  ТАВ. Этот  $\nabla C$  приводит к появлению градиента ПН  $\nabla \sigma = \sigma_c \nabla C$  на поверхности пленки, и, как результат, наблюдается центростремительное КК течение  $Q_f$  жидкости в центр пучка и формирование обособленной капли [5] (рис. 1, *b*). В процессе облучения приток  $Q_f$  окружающей пузырек жидкости за счет  $\nabla \sigma$ , который поддерживается испарением  $Q_e$  летучей компоненты из капли так, что  $Q_e < Q_f$ , увеличивает ее объем  $V_d$  и концентрацию ТАВ в ней. Это сопровождается ростом видимых диаметров капли  $D_d$  и пузырька  $D_b$  и увеличением оптической плотности капли (рис. 1, *b–d*). Если жидкость в ячейке



**Рис. 2.** Изменение видимого диаметра капли с течением времени с момента начала облучения в пузырьках диаметрами: 1 — 0.4 mm, 2 — 0.6 mm и 3 — более 1 mm. Штрих-линией показан диаметр пучка света.

является буферным раствором, несущим биоклетки, крупные молекулы и т.п. с характерными размерами меньше, чем  $\delta$ , то эти включения будут сноситься КК течением в центр пучка и аккумулироваться в капле. Считая, в грубом приближении, пузырек цилиндром высотой  $h$ , его объем перед началом облучения запишем в виде  $V_b(0) = \pi D_0^2 h / 4$ , где  $D_0$  — диаметр пузырька в  $t = 0$ , а в произвольный момент времени (с каплей внутри) как  $V_b(t) = \pi D_b^2 h / 4$  или  $V_b(t) = V_b(0) + V_d(t)$ . Откуда объем капли можно представить соотношением  $V_d(t) = \pi h (D_b^2 - D_0^2) / 4$ , согласно которому максимально достижимые объемы капель, оцененные для слоев толщинами 10 и 50  $\mu\text{m}$  и пузырьков диаметрами  $d/2 \leq D_0 \leq 2d$ , не превышают нескольких десятков нанолитров за время облучения  $t = 1 \div 5$  min. Например, объемы капель на кадрах рис. 1, b, d составляют около 5 и 20 nl, что соответствует типичным объемам капель-микрореакторов для реагентов и микрореакторов, используемых в биохимическом анализе [7,8].

Скорость роста капель определяет быстродействие микрофлюидной системы. В нашей задаче при неизменных подводимой  $P$  пучка и  $h$  слоя

скорость роста капли будет зависеть от величины  $D_0$  и, следовательно,  $h_0$ . На рис. 2 приведены графики  $D_d(t)$  в пузырьках для трех значений  $D_0$ . Быстрый рост капли в пузырьке малого диаметра  $D_0 \leq d$  обусловлен тем, что смачивающая пленка под ним толще, а граница раствора к капле ближе, чем для пузырька с  $D_0 > d$ , что способствует притоку жидкости в каплю. В пузырьках с  $D_0 = 0.4 \div 0.8$  мм капля, появляясь в центре пузырька, быстро, за  $t \leq 1$  мин, увеличивается в диаметре благодаря притоку жидкости с периферии пузырька и перекрывает область проекции пучка света. Затем скорость ее роста снижается, и за время  $t > 1$  мин ее диаметр увеличивается менее чем на 25% (рис. 2, кривые 1 и 2), что связано с ростом потока в паровую фазу  $Q_e \rightarrow Q_f$  за счет возросшей  $P_a$  и площади поверхности, с которой происходит испарение. В пузырьках с  $D_0 > d$  капля растет медленнее из-за пересыхания утонченной пленки в зоне облучения и достигает значения  $D_d = d$  в течение более 5 мин (рис. 2, кривая 3). При длительном облучении капли наблюдается ее стационарное состояние  $D_d = \text{const}$ , что связано с наступлением динамического равновесия потоков  $Q_e = Q_f$  пара и жидкости. Этот эффект впервые обнаружен в газовых пузырьках с  $D_0 > 5$  мм [5].

Явление КК конвекции, управляемой пучком света, позволяет бесконтактно создавать капли требуемого объема и контролировать содержание в них исследуемых веществ, что представляет собой уникальный инструмент для манипуляции жидкими объектами в микромасштабе.

Работа поддержана грантом РФФИ 04–01–00493.

## Список литературы

- [1] *Jensen K., Lee A.* // Lab on a Chip. 2004. N 4. P. 31–32.
- [2] *Nisisako T., Torii T., Higuchi T.* // Proc in SICE. 2002. Aug, 5–7. Osaka. P. 1262–1264.
- [3] *Handique K., Gogoi B., Burns M., Mastrangelo C.* // US patent 6130098, 2000.
- [4] *Cho S.K., Moon H., Kim C.-J.* // J. Microelectromech. Systems. 2003. V. 12. N 1. P. 70–80.
- [5] *Безуглый Б.А.* Канд. дис. М.: МГУ, 1983. 270 с.
- [6] *Безуглый Б.А., Иванова Н.А.* // Письма в ЖТФ. 2002. В. 20. С. 19–24.
- [7] *Snyder L., Levine J., Stroy R., Conetta A.* // Anal. Chem. 1976. N 48. P. 942.
- [8] *Mingyan He, Chenhang Sun, Daniel Chiu.* // Anal. Chem. 2004. N 76. P. 1222–1227.