

03;07;12

## Манипуляция газовым пузырьком в ячейке Хеле–Шоу с помощью пучка света

© Б.А. Безуглый, Н.А. Иванова

Тюменский государственный университет

E-mail: bezuglyi@utmn.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2002 г.

Исследовано взаимодействие пузырька в поглощающем растворе тензоактивного вещества в легколетучем растворителе с пучком света. Впервые продемонстрированы такие типы манипуляции пузырьками пучком света, как деление больших пузырьков и перемещение малых с использованием концентрационно-капиллярного механизма.

Известно, что газовый пузырек в жидкости с градиентом температуры  $\nabla T$  перемещается в горячую область даже против силы плавучести [1]. Это движение, называемое термокапиллярным (ТК) [2], вызвано разностью в поверхностном натяжении  $\sigma$  между противоположными полюсами пузырька, через которые проходит ось, коллинеарная с  $\nabla T$ , заданным в объеме жидкости.

Движение пузырьков в микроканалах или ячейках, индуцированное продольным  $\nabla T$ , который создают путем кондуктивного подвода тепла, активно изучается с точки зрения применения в современных микрофлюидных и MEMS устройствах [3–5]. В [6] впервые показана возможность манипуляции газовым пузырьком с помощью пучка света.

Поскольку в работе [6] изучение движения пузырьков за пучком света не являлось основной задачей, то данная работа посвящена детальному исследованию механизмов этого эффекта и развитию предложенной ранее методики.

Экспериментальная установка представляла собой модернизированный микроскоп МУФ-1, где в качестве точечного источника света использовали лампу ДРШ-100 с оптической системой для фокусировки пучка. Диаметр перетяжки пучка в его фокусе был равен  $d = 0.60 \pm 0.05$  mm, а полная мощность пучка  $P = 200$  mW. Исследу-

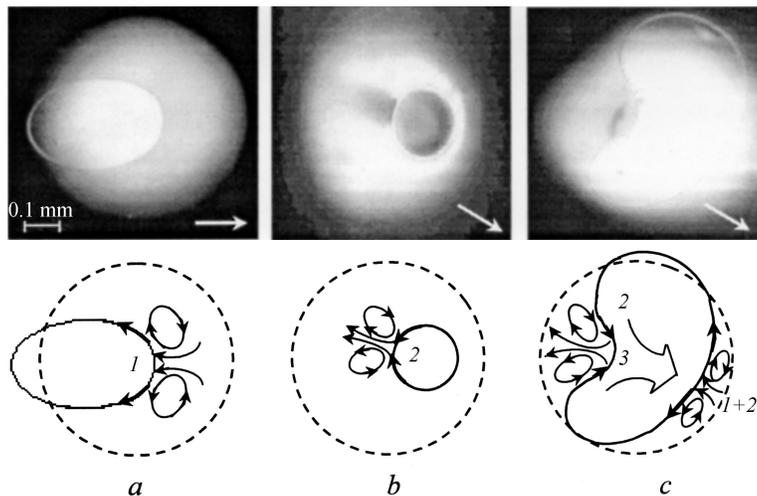
емая жидкость находилась в сборной кювете типа ячейки Хеле–Шоу, которую помещали на предметный столик микроскопа.

С целью получения численной информации о размерах пузырьков и скорости их движения, а также времени деления фасолевидного пузырька, микроскоп был оснащен видеокамерой (25 pictures/s, 560 lines/mm), соединенной через TV тюнер Capture 98 w/VCR с компьютером.

Ячейка Хеле–Шоу состояла из двух кварцевых пластин, разделенных тефлоновой  $10\ \mu\text{m}$  прокладкой с вырезанным в ней прямоугольным каналом  $2 \times 4\ \text{cm}$ , в который пипеткой вносили несколько капель жидкости. В качестве исследуемой жидкости использовали раствор поглощающего излучение нелетучего или малолетучего тензоактивного вещества (ТАВ) в легколетучем растворителе, как например насыщенный при  $20^\circ\text{C}$  раствор  $\text{CuBr}_2$  или  $\text{I}_2$  в 96%-ном этиловом спирте или ацетоне. Поглощение  $10\ \mu\text{m}$  жидкого слоя для этих растворов было близко к 90%. Заполненную раствором ячейку помещали между двумя кольцевыми прижимными дисками и стягивали винтами. Как правило, раствор распределялся так, что в канале оставалось несколько газовых пузырьков различного диаметра. Критерием величины пузырька принято отношение его диаметра к диаметру светового пятна,  $D/d = D^*$ . При  $D^* \leq 1$  пузырек считали малым, а при  $D^* \geq 1$  — большим.

Ячейку размещали так, чтобы какой-либо из пузырьков оказался в области светового пятна. Далее, когда ее перемещали в произвольном направлении относительно пучка,<sup>1</sup> то пузырек следовал за пучком и межфазная граница (МФГ) в его носовой части находилась в области светового пятна. За счет нагрева на МФГ происходили два конкурирующих процесса: понижение поверхностного натяжения и его повышение вследствие испарения растворителя. При скорости пучка выше некоторого критического значения  $v^*$ , когда испарение с МФГ незначительно, механизм движения пузырька обусловлен лишь действием ТК сил. В этом случае поверхностные течения вдоль МФГ увлекают соседние слои жидкости и в точке стагнации возникает отрицательное давление, которое формирует возвратные потоки жидкости. Таким образом, в носовой части пузырька возникают два конвективных вихря (рис. 1, а). Значение  $v^*$  составляло  $0.5\text{--}1\ \text{mm/s}$  для раствора  $\text{CuBr}_2$  в этаноле и около  $1\ \text{cm/s}$  для раствора  $\text{I}_2$  в ацетоне.

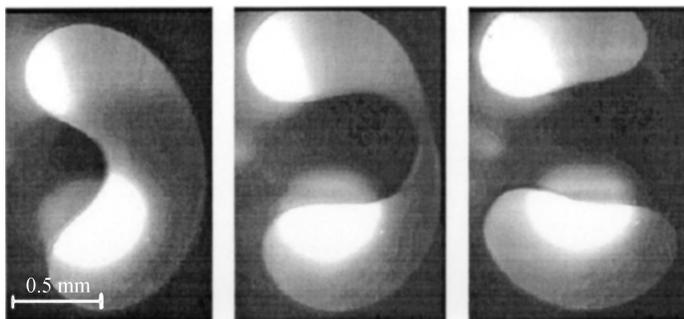
<sup>1</sup> В дальнейшем будем говорить просто о смещении пучка света относительно ячейки.



**Рис. 1.** ТК и КК механизмы перемещения пузырьков с помощью пучка света. Стрелкой показано направление движения пучка света. *a* — движение пузырька вызвано действием только ТК сил (1) — раствор йода в ацетоне; *b* — движение только за счет КК сил (2) —  $\text{CuBr}_2$  в этаноле; *c* — одновременное действие на пузырек КК и ТК сил — йод в этаноле; 3 — пар.

Из-за вязкого трения пузырек с  $D^* \geq 1$  при движении деформируется и принимает овальную форму (рис. 1, *a*). В опытах с раствором  $\text{CuBr}_2$  в этаноле, при скорости пучка выше  $0.7 \text{ mm/s}$  пузырек деформировался так сильно, что отношение его продольного диаметра к поперечному достигало 5. В случае малого пузырька деформация его формы не наблюдалась.

При  $v < v^*$  малый пузырек движется впереди пучка света. Столь необычное поведение объясняется включением в облучаемой зоне концентрационно-капиллярного (КК) механизма, связанного с ростом концентрации  $C$  ТАВ за счет испарения растворителя, т.е. выполнением условия  $\sigma'_c \nabla C > |\sigma'_T| \nabla T$ , где  $\sigma'_c$  и  $\sigma'_T$  — концентрационный и температурный коэффициенты  $\sigma$ . При этом вблизи МФГ появляются два согласованных капиллярных вихря (рис. 1, *b*), поля скоростей которых генерируются встречными касательными напряжениями вдоль



**Рис. 2.** Стадии деления фасолевидного пузырька пучком света. Интервал между кадрами 0.5 s. Раствор  $\text{CuBr}_2$  в ацетоне.

МФГ, направленными в область максимальной интенсивности пучка. Доказательством действия КК механизма является отчетливый след повышенной концентрации ТАВ за пузырьком (рис. 1, *b*). При  $D^* = 0.4$  скорость пузырька в растворе  $I_2$  в этаноле достигала 0.3 mm/s.

В случае больших пузырьков, где кривизна поверхности мала, скоростной напор  $P_i = \rho v_s^2/2$  поверхностного КК течения может превысить капиллярное давление  $P_c = \sigma/r$  пузырька и тогда МФГ в облучаемом участке прогибается внутрь в виде мыса и пузырек принимает вид фасолины (рис. 1, *c*). Здесь  $\rho$  — плотность жидкости,  $v_s$  — скорость течения на МФГ, а  $r$  — радиус кривизны мыса. Течения с диаметрально противоположной стороны пузырька вызваны конденсацией растворителя на холодной МФГ, что понижает ее поверхностное натяжение как вследствие разбавления раствора, так и за счет повышения его температуры.

С увеличением кривизны мыса скорость испарения растворителя с его поверхности возрастает, а конвективное перемешивание с маточным раствором из-за удлинения мыса затрудняется, что приводит к лавинообразному росту концентрации ТАВ и, следовательно, к росту  $\sigma$  в носовой части. Таким образом, вызванный увеличением градиента концентрации рост скоростного напора КК течения продвигает мыс до встречи с противоположной стенкой пузырька и после их соединения пузырек оказывается разделенным на две части (рис. 2).

Рассмотренные типы манипуляции газовыми пузырьками с помощью пучка света могут найти применение при разработке бесклапанных микронасосов [4], микровентилей и ТК оптических переключателей [7].

Работа поддержана грантом РФФМ № 01–01–652а.

Авторы признательны О.А. Тарасову за полезные дискуссии и Ф.Х. Чаппарову за техническую помощь.

## Список литературы

- [1] *Young N.O., Goldstein J.S., Block M.J.* // J. Fluid. Mech. 1959. V. 6(3). P. 350–356.
- [2] *Федосов А.И.* // ЖФХ. 1956. V. 3(2). С. 366–373.
- [3] *Hasan M., Balasubramaniam R.* // J. Thermophys. Heat Transfer. 1989. V. 3. P. 87.
- [4] *Jun T.K., Kim C.-J.* // J. Applied Physics. 1998. V. 83(11). P. 5658–5664.
- [5] *Mazouchi A., Homsy G.M.* // Phys. Fluids. 2000. V. 12. P. 542–549.
- [6] *Безуглый Б.А.* Канд. дис. М.: МГУ, 1983. 270 с.
- [7] *Sato M. et al.* // Hitachi Cable Review. 2001. N 20. P. 19–24.