

УДК 532.68:535.211

© 2007 г. Б.А. БЕЗУГЛЫЙ, Н.А. ИВАНОВА

## ПРОКАЧКА ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МИКРОКАНАЛ С ПОМОЩЬЮ ПУЗЫРЬКА, ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ПУЧКОМ СВЕТА

Предложен новый способ прокачки жидкости в микроканальном устройстве с использованием воздушного пузырька-поршня, приводимого в движение индуцированной пучком света термокапиллярной силой. Для демонстрации данного способа изготовлена модель микронасоса, состоящего из двух резервуаров, соединенных двумя каналами, где пузырек-поршень в канале перемещали пучком света. Экспериментально оценены скорость прокачки жидкости и ее объем, прокачиваемый за ход поршня. Выполнен сравнительный анализ известных пузырьковых способов прокачки микроколичеств жидкости и предлагаемого способа и отмечены его преимущества.

*Ключевые слова:* пузырьки, двухфазное течение в микроканале, термокапиллярное течение, микронасосы.

За последние годы разработано множество способов прокачки малых количеств жидкости, которые можно разделить на механические [1], электрогидродинамические [2], электрохимические [3] и пузырьковые [4–6].

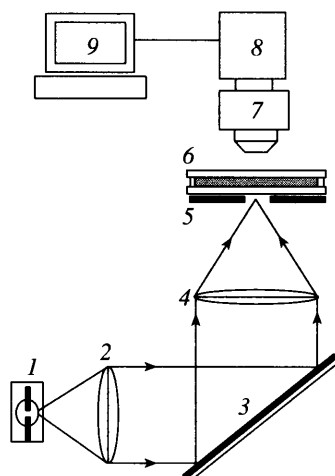
Среди всех способов пузырьковые привлекают тем, что пузырьки легко создаются с помощью микронагревателей, при движении принимают форму канала, не оставляя “застойных” объемов и могут быть использованы для любой жидкости в отличие от способов [2, 3]. Однако у пузырьковых микронасосов есть существенный недостаток – нагрев прокачиваемой жидкости до высокой температуры и сложность ее контроля из-за кондуктивной диссипации тепла в стенках микроканала. Основные рабочие характеристики этих микронасосов [4–6] представлены в таблице.

Чтобы исключить отмеченные недостатки, в [7] предложен новый подход к прокачке жидкости в микроканалах. Суть этого подхода состоит в том, что в качестве поршня используется газовый пузырек, а механизм его движения вызван преобразованием энергии оптического излучения в кинетическую энергию капиллярного движения при тепловом воздействии света на жидкость прилегающую к поверхности пузырька [8, 9].

В настоящей статье приведены результаты экспериментальной апробации предложенного в [7] способа прокачки. Выполнен анализ течения жидкости в канале и дано сравнение технических характеристик исследованного пузырькового насоса с известными аналогами.

**1. Экспериментальная методика.** Для демонстрации прокачки с помощью пузырька, управляемого пучком света, разработана и собрана модель микронасоса с прозрачными для излучения стенками, состоящего из двух резервуаров, соединенных двумя каналами.

Тефлоновую пленку толщиной 50 мкм помещали на смоченную этиловым спиртом стеклянную пластину и разглаживали ватным тампоном, чтобы обеспечить надежное сцепление с пластиной и вытеснить остатки воздуха. После этого в пленке прорезали границы резервуаров и соединяющих их каналов, удаляли вырезанные участки и в полученное микроуглубление пипеткой вносили жидкость. Затем микроуглубление накрывали другой стеклянной пластиной так, что в образуемую замкнутую полость захватывались пузырьки воздуха. Полученный “сэндвич” помещали между кольцевыми дюра-



Фиг. 1. Схема установки: 1 – лампа НВО–100, 2 – коллекторная линза, 3 – поворотное зеркало, 4 – конденсорная линза, 5 – столик микроскопа, 6 – модель микронасоса, 7 – микроскоп, 8 – видеокамера, 9 – компьютер

левыми дисками с резиновыми прокладками и стягивали винтами с целью обеспечения герметичности.

Управляющим пучком света служило фокусируемое в пятно диаметром около 0.6 мм излучение дуговой лампы НВО-100 мощностью в фокальной плоскости около 100 мВт (фиг. 1). В качестве прокачиваемой жидкости использован этанол, окрашенный дибромидом меди, 50-мкм слой которого поглощал около 30% падающего на него излучения для возбуждения термокапиллярного эффекта. При прокачке объем пузырька не изменялся за счет возможного испарения. Наблюдение и запись процесса прокачки выполнены с помощью микроскопа, оснащенного видеокамерой (560 лин/мм, 25 с<sup>-1</sup>), соединенной через тюнер с компьютером для оцифровки видеопотока и его покадровой обработки (фиг. 1).

Перед проведением опытов по прокачке у противоположных по диагонали входов в каналы устанавливали по пузырьку. Для этого модель микронасоса помещали на предметный столик микроскопа так, чтобы излучение лампы фокусировалось в непосредственной близости от одного из пузырьков, а затем пучок света перемещали ко входу одного из каналов. Пузырек под действием термокапиллярных сил двигался за пучком. Другой пузырек аналогичным образом перемещали к противоположному, по диагонали, входу в другой канал. Необходимость использования двух пузырьков обусловлена тем, что между пузырьком и стенками канала имеются зазоры, по которым возможно

Литература	$Q_{\max}$	$p$ , Па	Потребляемая мощность	$S$ , мкм <sup>2</sup>	Примечания
[4]	300 мкл/мин	560	8–12 Вт	$78 \cdot 10^4$	$a-c$
[5]	0.5 нл/мин	800	58 мВт	9	$a, b$
[6]	9.3 нл/мин	44	$\frac{140 \text{ мВт}}{50 \text{ мВт}}$	$1 \cdot 10^4$	$a, b, d$

Здесь  $a$  – паровой пузырек,  $b$  – высокая потребляемая мощность,  $c$  – слабый тепловой отклик,  $d$  – сложность управления,  $S$  – площадь поперечного сечения канала.

перетекание жидкости при движении пузырька, поэтому, используя лишь один пузырек, нельзя оценить эффективность прокачки жидкости. Модель же с двумя пузырьками наглядно демонстрирует прокачку, поскольку один из пузырьков служит поршнем, который приводится в движение пучком света и толкает жидкость, а другой служит индикатором движения проталкиваемой поршнем жидкости.

После установки пузырьков в требуемом положении начинали эксперименты по прокачке. С этой целью пучок света проецировали на границу одного из пузырьков, выбранного в качестве поршня, а затем пучок смещали относительно границы пузырька со скоростями, не превышающими ту пороговую скорость  $u^*$ , при которой происходил отрыв пузырька от пучка света. Механизм движения пузырька вызван действием термокапиллярной силы  $F_T = \sigma_T \nabla T S_b$ , возникающей из-за изменения поверхностного натяжения,  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_0)$ , на границе пузырька за счет нагрева пучком света прилегающей к пузырьку жидкости. Здесь  $\sigma_T$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения,  $\nabla T$  – градиент температуры,  $S_b$  – площадь поперечного сечения пузырька,  $\sigma_0$  и  $T_0$  – начальные значения поверхностного натяжения и температуры. Когда носовая часть пузырька достигала противоположного края канала, ход поршня считали законченным. Затем по измеренной скорости пузырька, известным размерам канала и свойствам жидкости оценивали скорость прокачки, давление и температуру.

**2. Скорость прокачки. Анализ течения в канале.** Пузырек за ход прокачки должен вытеснить столбик жидкости объемом

$$V = (L_c - L_b)lh \quad (2.1)$$

где  $L_c$  – длина канала,  $L_b$  – длина пузырька,  $l$  и  $h$  – ширина и высота канала. При этом скорость прокачки определяется через скорость смещения  $u$  пузырька,

$$Q = uS \quad (2.2)$$

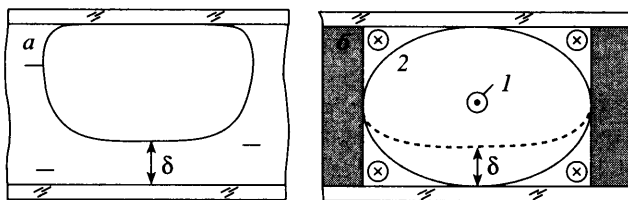
где  $S = lh$  – площадь поперечного сечения канала. Однако, как отмечено выше, при движении пузырька происходит утечка жидкости по зазорам между пузырьком и стенками канала. С учетом этого реальный объем жидкости  $V_p$ , вытесненный за ход прокачки, меньше объема  $V$  жидкости, заполняющей канал.

Проанализируем все возможные пути утечки прокачиваемой жидкости. Во-первых, из-за разницы в плотностях воздуха и жидкости на пузырек действует сила плавучести, прижимающая его к верхней стенке канала, так что между дном пузырька и стенкой канала появляется прослойка жидкости толщиной  $\delta$  (фиг. 2, а). Следовательно, при движении пузырька через канал, по этой прослойке возможна утечка жидкости и в выражениях (2.1) и (2.2) следует учесть эту поправку и вместо высоты  $h$ , записывать  $(h - \delta)$ . Оценим толщину  $\delta$  этой прослойки используя закон Брэтертона [10] в виде

$$\delta = 1.35 \frac{h}{2} (2Ca)^{2/3} \quad (2.3)$$

где  $h$  – высота канала (50 мкм),  $Ca = \mu u / \sigma$  – капиллярное число,  $\mu$  – вязкость жидкости (для этанола  $\mu = 1.19$  мН · с/м<sup>2</sup>, при 20°C),  $\sigma = 22.8$  мН/м, при 20°C. Поскольку значение скорости  $u^*$  пузырька не превышало 0.7 мм/с, оценка верхнего предела величины  $\delta$  дает значение  $\delta \approx 0.05$  мкм. Так как  $\delta \ll h$  и площадь поперечного сечения прослойки составляет лишь около 1% от площади поперечного сечения канала, утечкой жидкости по прослойке можно пренебречь и считать высоту пузырька равной высоте канала.

Во-вторых, в канале прямоугольного сечения пузырек располагается так, что его поверхность образует мениски смачивания по углам канала (фиг. 2, б). Наличие этих угловых зазоров неизбежно приводит к появлению обратного потока жидкости. Учитывая перечисленные выше факты,  $V_p$  и  $Q$  можно выразить через площадь поперечного сече-



Фиг. 2. Иллюстрации, поясняющие пути утечки: *a* – прослойка жидкости под пузырьком (продольное сечение), *b* – угловые зазоры (поперечное сечение); *1* – направление движения пузырька в канале из плоскости листа, *2* – направление потока жидкости по угловым зазором в плоскость листа

ния пузырька  $S_b$ , которую в грубом приближении, при  $\delta \rightarrow 0$ , аппроксимируем площадью эллипса  $S_b = \pi hl/4$ . Итак,

$$V_p = \pi lh(L_c - L_b)/4, \quad Q = \pi uh/4 \quad (2.4)$$

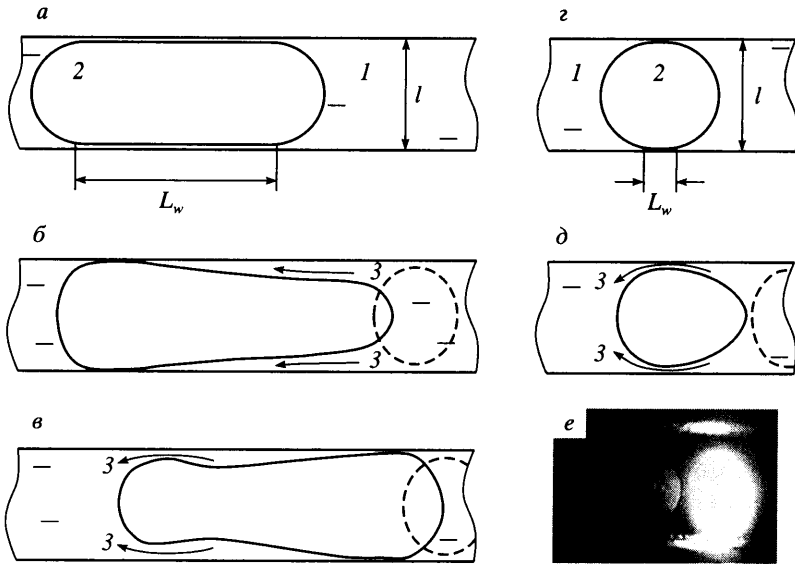
Возможен еще один путь утечки жидкости, а именно иногда появляющийся зазор между бортиками канала и движущимся пузырьком. В ходе опытов выбирали пузырьки такого размера, чтобы они плотно прилегали к бортикам канала и практически не оставляли зазора (см., например, фиг. 3, *a* и *z*). Однако было обнаружено, что при перемещении пузырьков со скоростью, близкой к  $u^*$ , некоторые пузырьки деформируются и их ширина становится меньше ширины канала  $l$ . В результате этого между бортиками канала и пузырьком образуется зазор, через который происходит утечка жидкости, снижая эффективность работы микронасоса. В опытах найдено, что длина линии контакта  $L_w$  поверхности пузырька (фиг. 3) с бортиками канала и скорость перемещения пузырька – это параметры, от которых зависит появление зазора. Так, утечка жидкости по зазору происходит в случае пузырьков с  $L_w > l$  (фиг. 3, *a–в*) и с  $L_w < l$  (фиг. 3, *z* и *д*). Рассмотрим механизм появления зазора в этих ситуациях.

Когда длинный ( $L_w > l$ ) пузырек начинает двигаться за пучком света, его носовая часть вытягивается под действием термокапиллярных сил [9] так, что между ним и бортиками канала появляются зазоры (фиг. 3, *б*), а его кормовая часть цепляется за бортики канала. Затем по мере растягивания пузырька термокапиллярной силой и перетекания жидкости через зазоры происходит отрыв его кормовой части от бортиков канала, и жидкость устремляется за пузырек (фиг. 3, *в*). При этом пузырек изменяет свою форму: носовая часть расширяется, а кормовая немного сужается, затем пузырек восстанавливает форму и снова вытягивается, продолжая движение за пучком.

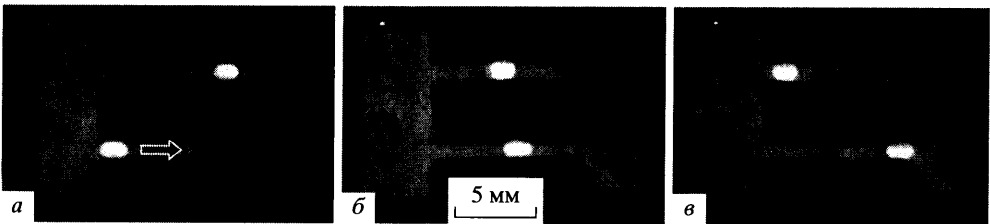
При перемещении же малого ( $L_w < l$ ) пузырька (фиг. 3, *z*) практически с самого начала движения пузырек вытягивается и отрывается от бортиков канала. В результате часть жидкости при движении перетекает по зазору (фиг. 3, *д*).

Таким образом, чтобы предотвратить утечку жидкости по зазорам и повысить эффективность прокачки выбирали пузырек с  $L_w \cong l$ , который перемещали с такой скоростью, чтобы при движении он вытягивался лишь незначительно, и в течение процесса прокачки его кормовая часть находилась в контакте с бортиками канала.

**3. Результаты эксперимента и их обсуждение.** С использованием в качестве поршня пузырек с  $L_w \cong l$  была осуществлена прокачка жидкости, последовательность кадров которой показана на фиг. 4. Процесс прокачки занимал в среднем 15 с при скорости пузырька поршня  $u \cong 0.5$  мм/с. Объем жидкости, прокачиваемой за ход поршня, и скорость прокачки, оцененные по формулам (2.4), составляли 370 нл и 1.4 мкл/мин. Поскольку объем столбика жидкости в канале, рассчитанный по (2.1), равнялся 460 нл, то эффективность хода прокачки, полученная из выражения  $(V_p/V) \times 100\%$ , достигает 80%.



Фиг. 3. Изменение формы пузырька при его движении за пучком (вид сверху). 1 – канал с жидкостью, 2 – пузырек, 3 – обратное течение жидкости. Штриховая линия – проекция пучка света. Направление движения пузырьков слева направо



Фиг. 4. Последовательность кадров процесса прокачки: положение пузырьков перед прокачкой (а), спустя 7 (б) и 15 с (в) после начала прокачки, стрелка – направление движения пузырька-поршня

Для оценки давления прокачки создаваемого пузырьком в канале воспользуемся формулой Пуазейля для трубы произвольного поперечного сечения

$$\Delta p = A\mu u(L_c - L_b)/h^2 \tag{3.1}$$

Здесь  $A$  – поправка на геометрию сечения канала. Поскольку отношение ширины канала ( $l = 1.2 \pm 0.2$  мм) к его высоте велико:  $l/h = 24$ , будем считать его щелевидным и брать  $A = 12$ . Подставляя в (3.1) скорость движения пузырька 0.5 мм/с, длину столбика жидкости  $(L_c - L_b) \cong 7.7$  мм, высоту канала  $h = 50$  мкм, а также вязкость этанола, найдем  $\Delta p \cong 22$  Па.

Из выражения для скорости термокапиллярного движения пузырька в канале произвольной формы [11] получим уравнение для оценки перепада температуры между противоположными полюсами пузырька в виде

$$\Delta T = 6\mu L_b u / |\sigma_T| h \tag{3.2}$$

Подставив в (3.2) известные данные и  $\sigma_T = -0.0832$  мН/(м · К), найдем  $\Delta T \cong 1.3$  К, т.е. прокачиваемая жидкость нагревается всего на 1 К. Это в десятки раз меньше по сравнению с методами прокачки, использующими паровые пузырьки (см. таблицу).

Дальнейшее усовершенствование микронасоса, а именно изготовление каналов с гладкими стенками, улучшение теплоизоляционных свойств материала каналов, подбор длины волны излучения, эффективно поглощаемого прокачиваемой жидкостью, подбор жидкости с большим температурным коэффициентом поверхностного натяжения позволит повысить эффективность работы насоса на основе управляемого пучком света термокапиллярного эффекта.

**Заключение.** Предложенный способ прокачки жидкости имеет следующие преимущества по сравнению с существующими аналогами:

1) использование воздушного пузырька, который находится в момент начала прокачки при температуре жидкости, позволяет осуществлять прокачку при незначительных (менее 10 К) перепадах температуры;

2) пульсации жидкого потока при прокачке отсутствуют. Кроме того, для создания пузырька не требуется подавать мощный импульс, а затем выключать нагреватель, ожидая коллапса пузырька;

3) использование энергии в виде оптического излучения выгодно тем, что излучение доставляется непосредственно в объем жидкости и преобразуется в тепловую энергию за  $\sim 10^{-12}$  с; для подвода энергии не требуются проводники с высокой электропроводностью заданного сечения, площадь которого не может быть сколь угодно малой, как в случае резистивных способов; современные полупроводниковые лазеры, дающие узкие пучки света практически на любой длине волны, предоставляют большие возможности для управления пузырьками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smits J.G.* Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically // *Sensors and Actuators*. 1990. V. A21–23. Pt II. P. 203–206.
2. *Bart S.F., Tavrow L.S., Mehregany M., Lang J.H.* Microfabricated electrohydrodynamic pumps // *Sensors and Actuators*. 1990. V. A21–23. Pt II. P. 193–197.
3. *Zhong C.J.* Low power electrically-driven microfluidic pumping delivery device: US Patent № 6. 458. 256 B1. 2002.
4. *Song Y.J., Zhao T.S.* Modelling and test of thermally – driven phase change non-mechanical micropump // *J. Micromech. Microeng.* 2001. V. 11. P. 713–719.
5. *Jun T.K., Kim C.-J.* Valveless pumping using traversing vapor bubbles in microchannels // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. № 11. P. 5658–5664.
6. *Debar M.J., Liepmann D.* Fabrication and performance testing of steady thermocapillary pump with no moving parts // *Proc. IEEE MEMS–2002. Conf. Las Vegas, 2002.* P. 109–111.
7. *Cho H.J., Ivanova N.A.* A micro fluid pumping device and a pumping method for same: EP Patent application N 1544463 A2 // 2005. Bull. № 25.
8. *Безуглый Б.А.* Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1983. 267 с.
9. *Безуглый Б.А., Иванова Н.А.* Манипуляция газовым пузырьком в ячейке Хеле-Шоу с помощью пучка света // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28. Вып. 19. С. 71–75.
10. *Maruvada S. R., Park C.-W.* Retarded motion of bubbles in Hele-Shaw cells // *Phys. Fluids*. 1996. V. 8. № 12. P. 3229–3233.
11. *Sammarco T.S., Burns M.A.* Thermocapillary pumping of discrete drops in microfabricated analysis devices // *AIChE Journal*. 1999. V. 45. № 2. P. 350–366.