

На правах рукописи

ИВАНОВА Наталья Анатольевна

КАПИЛЛЯРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ И КАПЕЛЬ,
УПРАВЛЯЕМЫЕ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЕТА

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень - 2004

Работа выполнена на кафедре радиофизики Тюменского государственного университета в лаборатории "Жидкостные микрогравитационные технологии"

**Научный
руководитель:**

кандидат физико-математических наук,
доцент
Безуглый Борис Антонович

**Официальные
оппоненты:**

доктор физико-математических наук,
профессор
Кутушев Анвар Гумерович

доктор физико-математических наук,
профессор
Ролдугин Вячеслав Иванович

**Ведущая
организация:**

Институт гидродинамики им. М.А.
Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск

Защита состоится 23 декабря 2004 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 217 Физического факультета ТюмГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан 23 ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент



Татосов А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение движения микроколичеств жидкости (пузырьков и капель) под влиянием внешних полей является важной задачей в физико-химической технологии и в космическом материаловедении. За последнее десятилетие, в связи с развитием микрофлюидики – новой междисциплинарной области науки и техники, данная проблема приобрела еще большую актуальность. Через понимание механизмов взаимодействия капиллярных объектов с внешней средой и полями, микрофлюидика ставит целью разработать не только способы создания движения пузырьков и капель, но и манипуляции ими (изменение формы, деление, слияние и т.п.).

Одним из немногих направлений, удовлетворяющих поставленным требованиям, можно считать направление, основанное на явлении фотоиндуцированной концентрационнокапиллярной (ФКК) конвекции, открытом Б.А. Безуглым в 1975 г. [1]. Суть ФКК состоит в том, что капиллярное движение микроколичеств жидкости вызывается путем локального тепло- и массопереноса через поверхность раздела фаз, управляемого тепловым действием пучка света.

Несмотря на то, что ФКК уже стала основой уникальных технологий, таких как термотензография [1,2] и бесконтактное разделение смесей на компоненты [3,4], возможность ее применения в микрофлюидике для создания методов манипуляции пузырьками и каплями до недавнего времени не была использована исследователями. Это связано с отсутствием данных о механизмах взаимодействия пучка света с указанными капиллярными объектами.

В данной работе изучены капиллярные механизмы движения пузырьков за пучком света и впереди него, а также кинетика роста капель в газовых пузырьках находящихся в ячейке Хеле-Шоу под действием ФКК конвекции. Продемонстрированы такие манипуляции с пузырьками как изменение формы и деление пучком света.

Предложена и экспериментально доказана возможность использования термокапиллярного (ТК) движения газового пузырька, управляемого тепловым действием света для разработки метода прокачки жидкости в микрофлюидных устройствах. Исследованы оптические свойства аномальной капли, сформированной под действием КК сил управляемых пучком света, с целью их применения в адаптивной оптике и оптоэлектронике. В частности, на основе аномальной капли разработана варифокальная микролинза самоцентрирующаяся в центр управляющего ею пучка.

Цель работы – исследовать движение пузырьков и капель и эволюцию капель в пузырьках под действием капиллярных сил, индуцированных пучком света; подтвердить возможность применения в микрофлюидных устройствах пузырьков и капель, размер, форма и положение которых управляется тепловым действием пучка света.

Научная новизна.

1) Впервые детально изучены ТК и КК механизмы движения пузырьков управляемых пучком света в ячейке Хеле-Шоу.

2) Предложен и использован новый подход к определению скоростей ТК и КК течений на границе пузырька, основанный на принципе аддитивности статической и динамической кривизны поверхности раздела фаз [5].

3) Продемонстрировано использование индуцированного и управляемого пучком света ТК механизма движения пузырька для прокачки жидкости в микроканалах.

4) Изучены оптические свойства аномальной капли управляемой КК силами, индуцированными пучком света.

Практическая ценность. Предложен новый подход к определению скорости ТК и КК течений. Показана возможность таких манипуляций с пузырьками как изменение их формы и деление пучком света. ТК механизм движения пузырька за пучком света применен для создания действующей модели пузырькового микронасоса. Оптические свойства аномальной капли использованы для разработки адаптивной микролинзы, самоцентрирующейся в пучке света.

Достоверность полученных результатов основана на тщательной разработке методик экспериментов и подтверждается их воспроизводимостью.

На защиту выносятся:

1) Результаты экспериментального исследования ТК и КК механизмов движения пузырьков управляемых тепловым действием пучка света в ячейке Хеле-Шоу.

2) Подход к определению скорости ТК и КК течения на границе пузырька, основанный на принципе аддитивности статической и динамической кривизны.

3) Практические применения пузырьков и капель управляемых ТК и КК силами, вызванными тепловым действием пучка света в микрофлюидике и адаптивной оптике.

Апробация работы. Результаты исследований обсуждались на научных семинарах лаборатории «Жидкостные микрогравитационные технологии» Тюменского госуниверситета и лаборатории MEMS Samsung Advanced Institute of Technologies (Южная Корея, 2002-2003); доложены на Международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века». Москва, октябрь 1998; Третьем Международном Аэрокосмическом конгрессе, Москва, август 2000; First Conference of The International Marangoni Association. Гиссен, Германия, сентябрь 2001; XII Международной конференции «Поверхностные силы», Звенигород, июнь-июль 2002; International Marangoni Association Congress, Брюссель, Бельгия, июль 2004.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 4 статьи в академических журналах и 2 патента РФ.

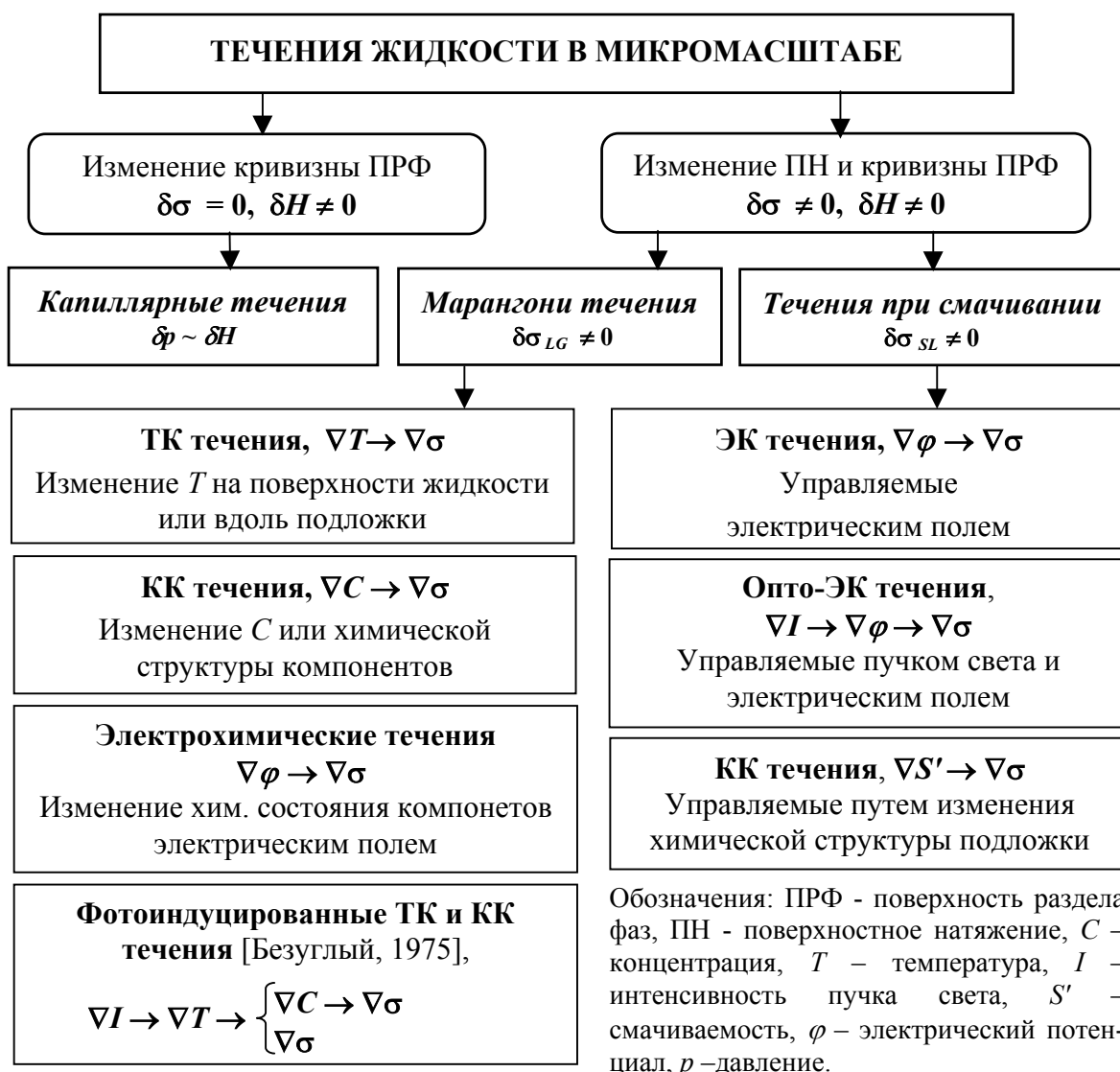
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка литературы. Полный объем работы 154 стр., включая 84 рис. и 14 табл. Библиография содержит 214 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, перечислены защищаемые положения, приведена аннотация содержания по главам.

В первой главе обобщены литературные данные о феноменологических представлениях о ПН и его зависимости от физико-химических свойств жидкости. Дано описание явления ФКК конвекции. На основе критического обзора литературы по способам создания движения капиллярных объектов и управления ими в микрофлюидике, предложена классификация типов течения и указано место нового подхода, развиваемого в данной работе. Классификация позволяет выделить два, сложившиеся к настоящему времени направления в микрофлюидике, и имеет методическое значение, позволяя выбирать оптимальный способ для решения практических задач.

Во второй главе представлены результаты исследования фотоиндуцированного ТК движения пузырьков в ячейке Хеле-Шоу. Детально



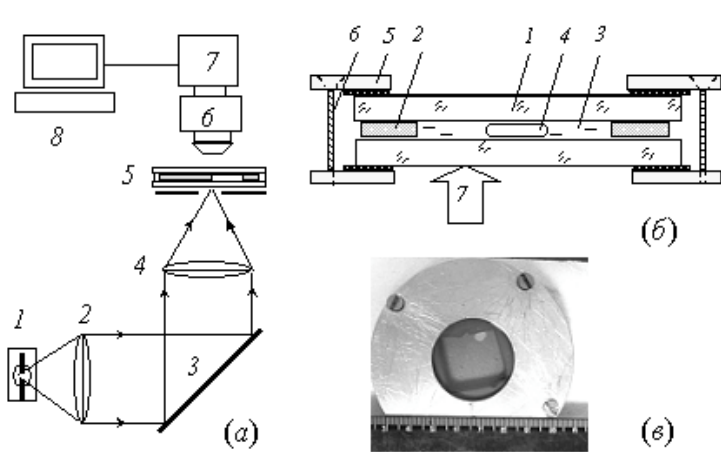


Рис. 1. (а) Установка: 1 - источник света (ДРШ-100); 2, 3, 4 - оптическая система для фокусировки пучка (его диаметр в фокусе 0.6 мм, полная мощность 200 мВт), 5 - ячейка Хеле-Шоу, 6 - микроскоп, 7 - видеокамера 8 - компьютер для цифровой обработки результатов. (б) Сечение ячейки: 1 - кварцевая пластина, 2 - прокладка, 3 - полость с жидкостью, 4 - пузырек, 5 - диски, 6 - прижимные винты, 7 - пучок света спроецированный в ячейку. (в) - Фото ячейки сверху.

изучен механизм ТК движения пузырька за пучком света. Предложен новый подход к оценке скорости ТК течения на облучаемой поверхности пузырька.

Схема установки и ячейка Хеле-Шоу показаны на Рис. 1. Пузырьки создавали следующим образом: на одну из пластин 1, Рис. 1(б), помещали тефлоновую пленку 2 толщиной (10, 50 или 70 мкм) с прорезанными в ней отверстиями (2×2 см), получая, таким образом, микрорезурвуар, в который пипеткой вносили несколько капель жидкости 3. Накрывали второй пластиной и помещали всю конструкцию между кольцевыми дисками, которые стягивали винтами, (б-в). Как правило, жидкость распределялась так, что в ячейке оставался один или несколько воздушных пузырьков 4 различного диаметра, окруженных со всех сторон жидкостью. За критерий величины пузырька приняли отношение его диаметра к диаметру пучка света, $D/d = D^*$. При $D^* \leq 1$ пузырек считали малым, а при $D^* \geq 1$ - большим. Рабочими жидкостями служили поглощающие излучение растворы ТАВ¹⁾: CuBr_2 и I_2 в этаноле, ацетоне и в бутаноле, а также спиртоводные смеси (10:1), окрашенные родамином G или фуксином. Концентрацию растворов подбирали так, чтобы обеспечить достаточное для возбуждения ТК эффекта поглощение излучения, около 20% мощности пучка. Ячейку помещали на столике микроскопа так, чтобы граница какого-либо пузырька оказалась в области проекции пучка или на расстоянии порядка его диаметра, Рис. 1. В ходе экспериментов ячейку перемещали по предметному столику в произвольном направлении относительно пучка²⁾ с максимально возможной скоростью, когда наблюдается движение пузырька, чтобы исключить испарение растворителя. При этом пузырек двигался в противоположном направлении, стремясь к пучку света.

Механизм ТК движения пузырька за пучком света

Основываясь на экспериментальных данных, а также на анализе результатов исследований ТК деформации тонкого слоя жидкости вызванной пучком света

¹⁾ ТАВ - малолетучая компонента раствора с ростом концентрации которой, поверхностное натяжение раствора растет [1].

²⁾ Для удобства, далее будем говорить о смещении пучка относительно ячейки.

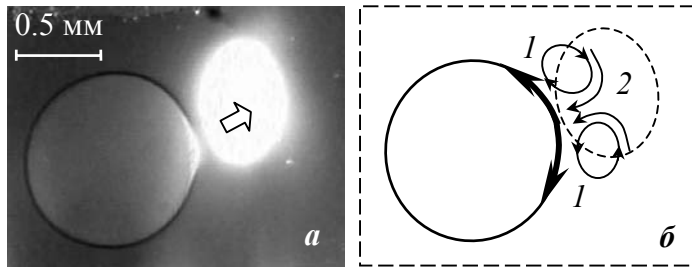


Рис. 2. а) Пузырек, движущийся за пучком света в ячейке $h = 50$ мкм, с раствором CuBr_2 в этаноле. Стрелка – направление движения. б) Схема 1 – ТК течения на ПРФ и в объеме жидкости, 2 – проекция пучка света.

[6,7], установлен следующий механизм ТК движения пузырька в ячейке Хелешоу за пучком света. При нагреве пучком света жидкости, прилегающей к ПРФ, происходит локальное уменьшение ПН, что приводит к появлению касательных напряжений, которые создают ТК течения жидкости по ПРФ, направленные к ее холодным участкам Рис. 2б. Из-за вязкости жидкости, ТК течения вызывают ее унос из области нагрева, что приводит к локальной деформации равновесной ПРФ, с дополнительной кривизной H_{dyn} , Рис. 2а. Эта деформированная ПРФ создает избыточное капиллярное давление в пузырьке, связанное с H_{dyn} соотношением $P_\sigma = \sigma \cdot H_{dyn}$. Область с отрицательным давлением, возникающая под деформированной ПРФ, вызывает возвратные потоки, порождая на ней два согласованных конвективных вихря, Рис. 2б, действующих как мотор, приводящий ПРФ в движение. Опыт с трассерными частицами показал существование ТК вихрей в жидкости у облучаемой ПРФ, Рис. 3.

Найдено, что частота вращения вихрей, f , и их размер зависят от расстояния центра проекции светового пучка до границы пузырька, Рис. 3. За размер ТК вихря, w , принят диаметр кольцевой линии тока, прилегающей непосредственно к ПРФ и ограниченной областью светового пятна, Рис. 3а. Установлены обратные пропорциональности частоты вращения вихря и кривизны ПРФ от размера вихря, $f \propto 1/w$ и $H \propto 1/w$. При удалении центра пучка на расстояние более его диаметра, вихри затухают, а кривизна ПРФ стремится к кривизне пузырька в состоянии покоя, $H \rightarrow H_s$.

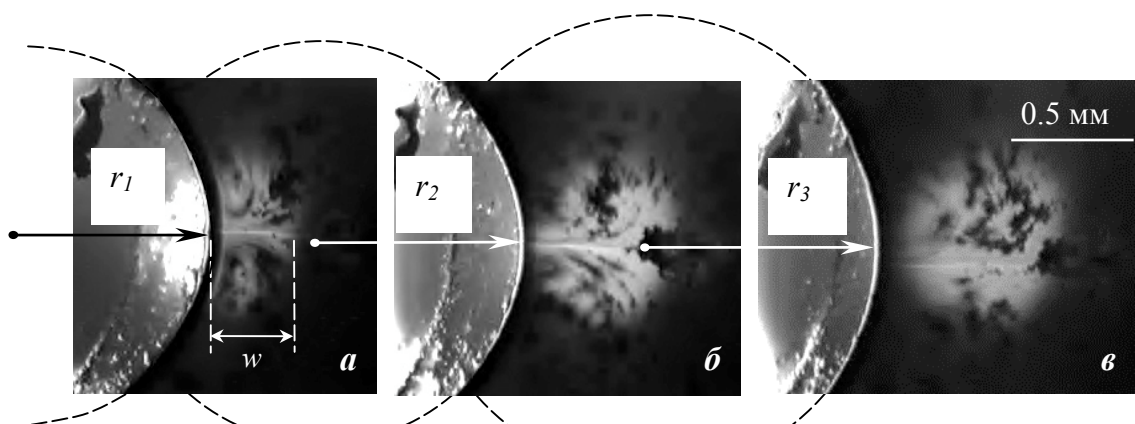


Рис. 3. Форма ТК вихря: а) Центр пучка находится вблизи ПРФ, частота вращения $f > 10 \text{ с}^{-1}$, б) на расстоянии около своего радиуса, $f \approx 4 \div 6 \text{ с}^{-1}$, и в) немногим более радиуса, $f \sim 1 \text{ с}^{-1}$. Слой раствора CuBr_2 в ацетоне с $h = 50$ мкм.

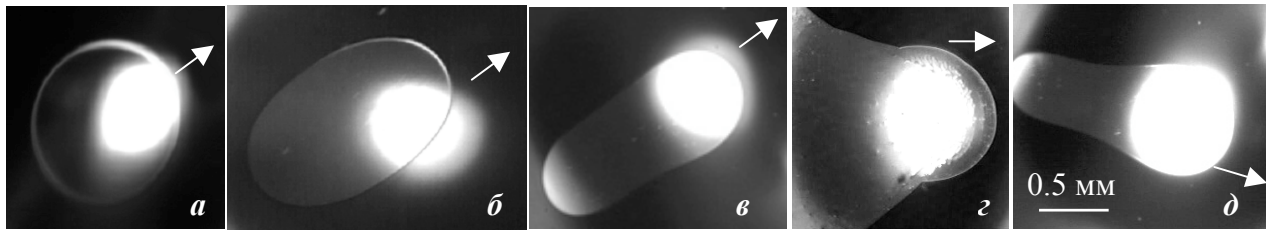


Рис. 4. Формы пузырьков. *a)* и *б)* Круглый пузырек и овал наблюдаются в бутаноле и этаноле; *в)* удлинённый овал – в этаноле, ацетоне; *г)* длинная «псевдоподия» в спиртоводной смеси и *д)* короткая «псевдоподия» в этаноле, ацетоне. Стрелки – направление движения пучка. Масштаб для всех кадров указан на кадре *д*.

Определение скорости ТК течения на ПРФ

Новый подход к определению скорости на ПРФ u_s , основан на условии равенства капиллярного давления в пузырьке, создаваемого локальной кривизной ПРФ и динамического давления, создаваемого ТК течениями,

$$\sigma H_{dyn} = \rho u_s^2 / 2 \quad \text{откуда} \quad u_s = \sqrt{2\sigma H_{dyn} / \rho} \quad (2.1)$$

Здесь H_{dyn} , согласно свойству аддитивности кривизн доказанному в [5], связана с суммарной кривизной облучаемой ПРФ H при движении пузырька, и кривизной пузырька в состоянии покоя H_s , соотношением $H_{dyn} = H - H_s$.

Для измерения H разработана методика «подстройки окружности»: предполагая, что деформированная ПРФ представляет собой участок некой окружности, достраивали эту окружность на кадрах и измеряли ее радиус кривизны, как показано на Рис. 3. Оценки скорости ТК течения, полученные по формуле (2.1), для пузырьков в слоях изучаемых жидкостей, толщинами 10 и 50 мкм, даны в Табл. 1. Разница между значениями u_s , полученными по (2.1) и оцененными из баланса потоков (при визуализации вихрей), составляет не более 20%, что говорит о достоверности предложенного подхода.

Таблица 1.

Толщина слоя (мкм)	u_s , мм/с ($1.3 \leq D^* \leq 1.6$, поглощаемая мощность 30мВт)			
	Ацетон	Этанол	Бутанол	Спиртоводная смесь
10	350	270	340	–
50	250	160	180	140

Форма и скорость больших пузырьков

Форма пузырьков с $D^* \geq 1$ при перемещении их пучком света с максимальной скоростью заметно искажается. Обнаружено пять устойчивых форм пузырьков в зависимости от свойств жидкости, Рис. 4. Значительную деформацию испытывают пузырьки в жидкостях с высоким температурным коэффициентом ПН, σ'_T . Предложена классификация пузырьков по форме в системе координат относительной скорости u_i / u_b и диаметра D^* , Рис. 5, где

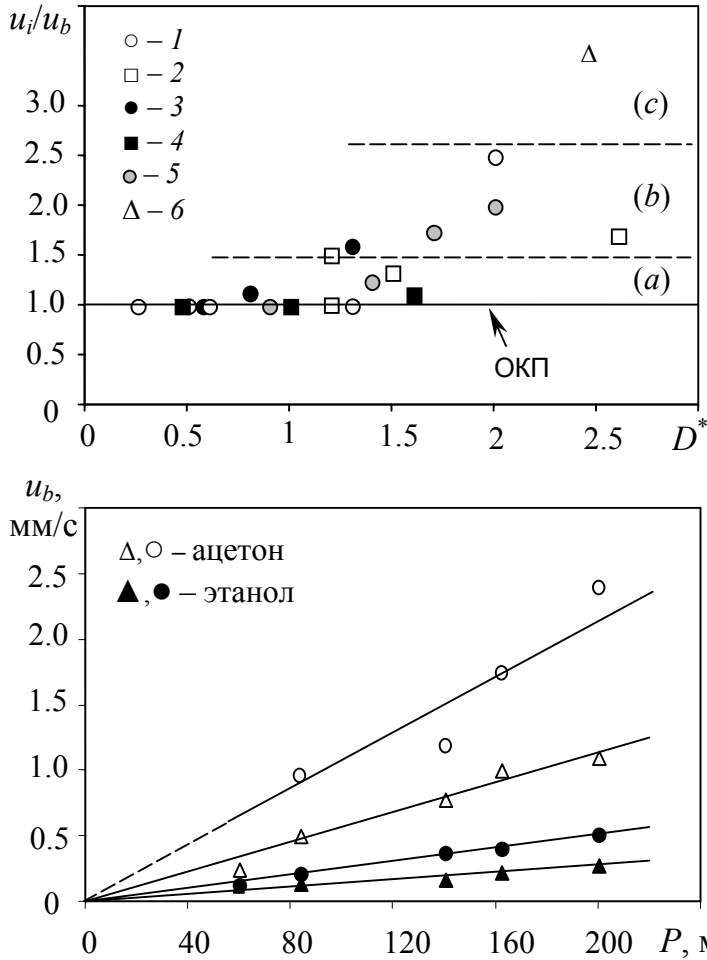


Рис. 5. Зависимость u_i/u_b от D^* для разных жидкостей и толщин слоев. 1, 2 – этанол, слой толщиной 10 и 50 мкм; 3, 4 – бутанол, 10 и 50 мкм; 5 ацетон, 10 мкм; 6 – спиртоводная смесь окрашенная родамином, 50 мкм. Область (a) – пузырьки с незначительной деформацией или с короткими «псевдоподиями», (b) – овалы, удлинённые овалы и «змейки», (c) – пузырьки с длинными «псевдоподиями».

Рис. 6. Зависимость скорости пузырьков от мощности пучка в слоях ацетона и этанола толщиной 50 мкм. Диаметры пузырьков: $\blacktriangle, \triangle$ – 0.5 мм; \circ, \bullet – 1.5 мм.

u_i – скорость облучаемой ПРФ, а u_b – скорость «центра массы» пузырька. На совокупности полученных результатов выделено четыре области со значениями u_i/u_b , характеризующими различные формы пузырьков, Рис. 5.

При $u_i/u_b = 1$ (так называемая ось круглых пузырьков (ОКП)) пузырьки разного диаметра независимо от вязкости жидкости, имеют круглую или почти круглую форму. Большие пузырьки сохраняют круглую форму, если находятся в толстых слоях, $h > 10$ мкм. В небольшом диапазоне $1 < u_i/u_b \leq 1.5$ находятся пузырьки с незначительной деформацией (область a). Наибольшую деформацию испытывают пузырьки с $D^* \geq 1$, для которых $u_i/u_b > 1.5$ (области b и c).

С увеличением мощности пучка P , скорость «центра массы» пузырька возрастает линейно для разных жидкостей и размеров пузырьков, Рис. 6. Скорость малых пузырьков в жидкостях с высоким значением отношения σ'_T/μ (0.35 м·К/с – ацетон) достигает более высоких значений, чем пузырьков в жидкости с меньшим σ'_T/μ (0.07 м·К/с – этанол). При этом значения u_b в ацетоне почти в 5 раз превосходят ее значения для этанола. Пользуясь полученной зависимостью $u_b \propto \sigma'_T/\mu$, можно подбирать жидкости для более эффективной ТК манипуляции пузырьками.

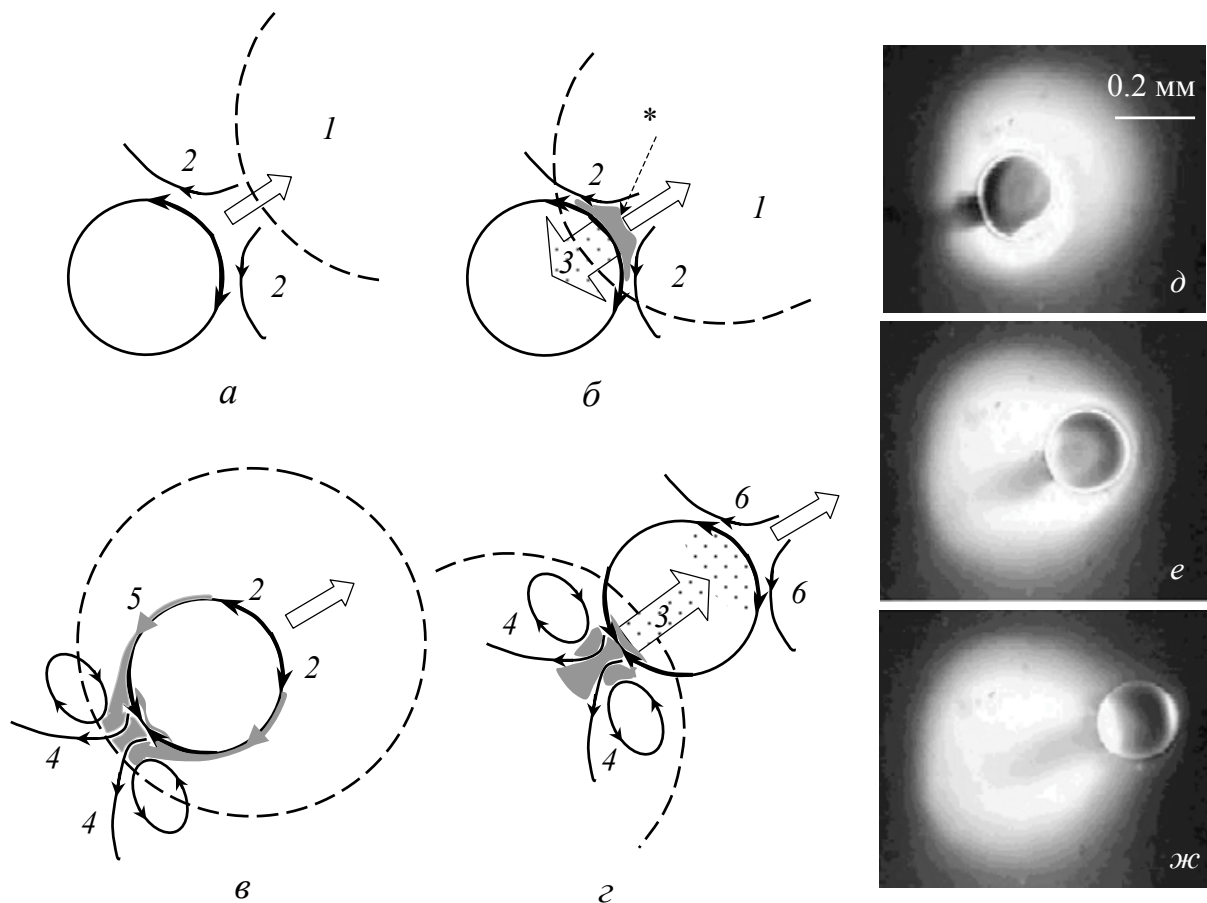


Рис. 7. Схема механизма движения малого пузырька. 1 – проекция пучка света, 2 – ТК силы и течения, 3 – паровой поток растворителя, 4 – КК силы и течения, 5 – течение ТАВ с ведущей ПРФ, вызванное ускоренным ТК движением пузырька, 6 – отрицательные КК силы и течения, * – область с повышенным содержанием ТАВ. (д – ж) – кадры эксперимента в слое насыщенного раствора йода в этаноле толщиной 10 мкм. Интервал между кадрами 2 с. Скорость пузырька около 0.2 мм/с.

В третьей главе представлены результаты исследования КК движения пузырьков перед пучком света. Изучен механизм такого движения пузырька перед пучком света. С использованием нового подхода (см. гл. 2) оценена скорость КК течения на облучаемой ПРФ. Показана возможность деления пузырька КК вихрями, управляемыми пучком света.

Движение пузырьков под действием КК сил наблюдается при условии, $\sigma'_C \Delta C > \sigma'_T \Delta T$, которое в данной работе обеспечивали уменьшением скорости смещения пучка, что приводило к усилению испарению растворителя с ПРФ и росту концентрации ТАВ, C_{ts} .

Движение малых пузырьков под действием КК сил

Впервые обнаружено и исследовано движение пузырьков с $D^* \leq 1$ перед пучком света, предложен и экспериментально подтвержден его механизм. Малый пузырек, двигаясь за счет ТК сил в пучок, Рис. 7а, с ускорением пересекает границу пучка и на его ведущей ПРФ начинается испарение растворителя, что ведет к увеличению C_{ts} , (б). В этот момент перепад C_{ts} , на ведущей ПРФ еще недостаточен, чтобы преодолеть резко возросший перепад T , и пузырек под действием ТК сил, продолжает ускоренное движение в

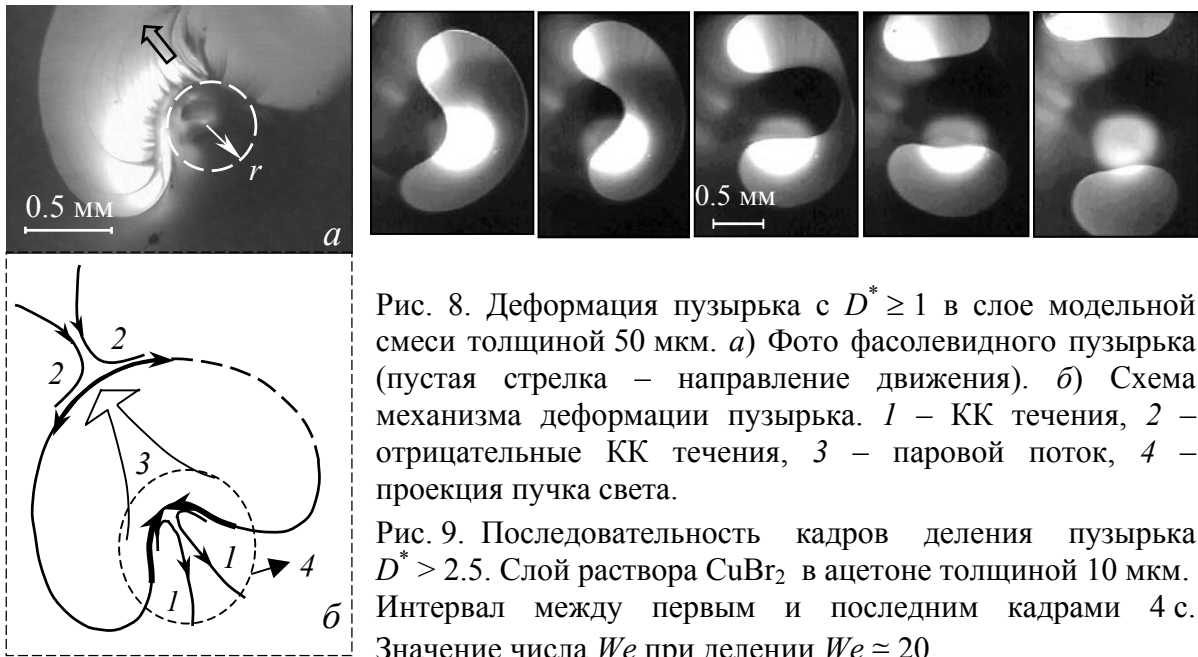


Рис. 8. Деформация пузырька с $D^* \geq 1$ в слое модельной смеси толщиной 50 мкм. а) Фото фасолевидного пузырька (пустая стрелка – направление движения). б) Схема механизма деформации пузырька. 1 – КК течения, 2 – отрицательные КК течения, 3 – паровой поток, 4 – проекция пучка света.

Рис. 9. Последовательность кадров деления пузырька $D^* > 2.5$. Слой раствора CuBr_2 в ацетоне толщиной 10 мкм. Интервал между первым и последним кадрами 4 с. Значение числа We при делении $We \cong 20$.

нагретую область. ТАВ, накопившееся на ведущей ПРФ, сносится течением вдоль боковой поверхности пузырька к его кормовой ПРФ, (в). Когда вся поверхность пузырька оказывается в пучке света, Т поверхности пузырька выравнивается и ТК течения затухают. Пузырек продолжает движение только за счет КК сил, вызванных повышенным содержанием ТАВ на кормовой ПРФ. Как только ведущая ПРФ выходит за границу нагретой области, с кормовой ПРФ вновь начинается испарение летучего растворителя и его конденсация на холодной ведущей ПРФ, (з). В этом случае, на кормовой ПРФ, за счет роста C_{ts} , усиливаются толкающие КК силы, а на ведущей ПРФ, благодаря конденсации растворителя с меньшим значением ПН, чем у раствора, возникают тянущие отрицательные КК силы, (д). Эти силы ускоряют движение пузырька и удерживают его при движении перед пучком. На Рис. 7 (д–ж) показаны кадры, подтверждающие КК механизм движения пузырька. Темный след за пузырьком – область с повышенной C_{ts} .

Деформация больших пузырьков

Изучение деформации больших пузырьков выполняли в слое модельной смеси (раствор фуксина в этаноле) : вода (10:1), толщиной 50 мкм. В случае больших пузырьков КК силы, действующие на облучаемой ПРФ, ведут к ее деформации. Пузырьки с $1 \leq D^* \leq 1.3$ принимают форму овала, вытянутого в направлении движения, а пузырьки с $D^* > 1.5$ принимают «фасолевидную» форму; их облучаемая ПРФ прогибается внутрь в виде мыса, Рис. 8.

Для определения скорости КК течения использовали формулу (2.1), а локальную кривизну вычисляли из выражения $H_{dyn} = -H - H_s$. В случае пузырьков, деформированных КК силами, окружность подстраивали, как показано на Рис. 8а (штриховой круг). Оценки скорости КК течения, $u_s^{(sc)}$, на

Таблица 2.

D^*	1.3	1.4	1.5	2.0	2.5
$u_s^{(sc)}$, (мм/с)	–	523	546	670	710
$u_s^{(tc)}$, (мм/с)	128	144	154	–	176
$u_s^{(sc)}/u_s^{(tc)}$	–	4	4	–	5

границе пузырьков для модельной смеси, а также сделанные для сравнения оценки скорости ТК течения, $u_s^{(tc)}$, приведены в Табл. 2.

Оказалось, что $u_s^{(sc)}$ в 4 – 5 раз превышает $u_s^{(tc)}$, что качественно согласуется с результатами измерения скоростей ТК и КК течений в работах по выращивании кристаллов из расплавов, где значения КК скоростей в несколько раз превышают скорости ТК течения.

Деление пузырька пучком света

Деформация и деление пузырьков играют важную роль в физико-химических процессах, где требуется увеличение площади межфазной поверхности.

Замечательной особенностью КК механизма управления пузырьками, по сравнению с ТК механизмом, оказалась возможность деления пузырьков. Этот эффект впервые обнаружен автором в насыщенном растворе CuBr_2 в ацетоне для пузырьков с $D^* \geq 2$. На Рис. 9 показаны кадры процесса деления пузырька пучком света. С увеличением кривизны мыса скорость испарения растворителя с его поверхности растет, а конвективное перемешивание с окружающим раствором из-за удлинения мыса затрудняется. Это приводит к лавинообразному росту C_{ts} и, следовательно, к увеличению скоростного напора КК течения, которое продвигает мыс до встречи с противоположной ПРФ и, после их соединения, пузырек оказывается разделенным на две части. При этом выгодным процесс разрыва будет, в том случае, когда размеры дочерних пузырьков равны.

Эффект деления пузырьков воспроизводится в насыщенных растворах I_2 и CuBr_2 в ацетоне, реже в насыщенных растворах фуксина в этаноле с водой; но не наблюдался в разбавленных (слабо поглощающих) растворах. Установлены следующие параметры, которые влияют на процесс деления пузырька: концентрация ТАВ, увеличение которой ведет к росту скорости КК течения, давление насыщенных паров, высокое значение которого способствуют испарению растворителя, а также размер пузырька, с ростом которого препятствующее деформации лапласово давление, $p_l = \sigma/r$, уменьшается.

Кинетика роста капли в пузырьках под действием пучка света

Выбор для исследования системы капля/пузырек, обусловлен ее ценным свойством – газ пузырька служит защитной оболочкой для находящейся в нем

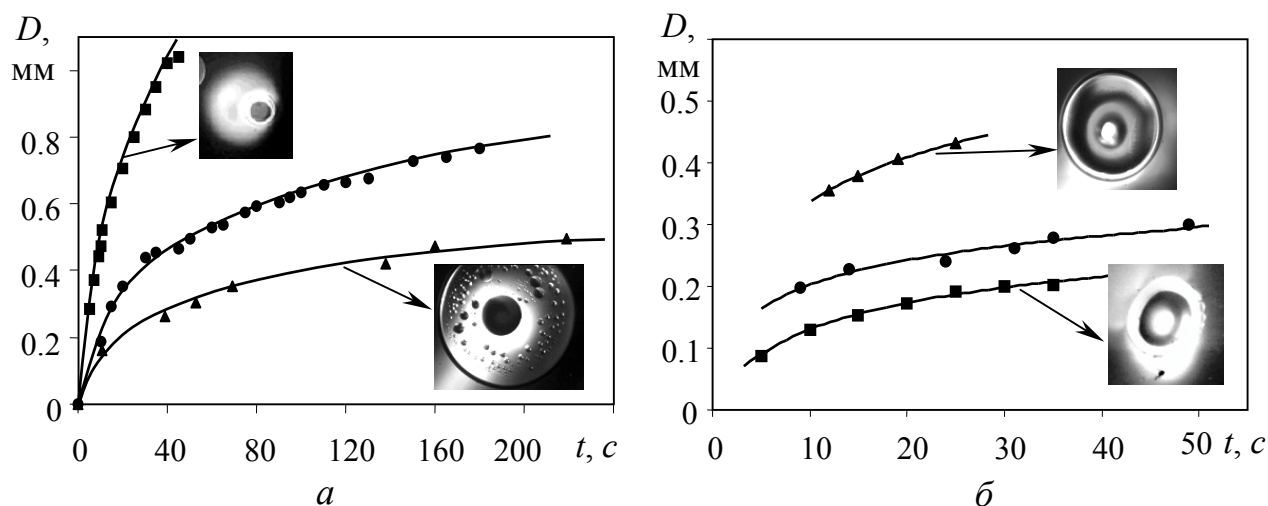


Рис. 10. Кинетика роста капли в пузырьках различного диаметра. (а) Раствор йода в этаноле, диаметры пузырьков: ■ – 190 мкм; ● – 360 мкм; ▲ – 600 мкм. (б) Смесь (раствор родамина G в этаноле) : вода (10 : 1), пузырьки: ■ – 180 мкм, ● – 210 мкм ▲ – 600 мкм.

капли, что необходимо в ряде микрофлюидных процессов. Скорость роста капли является важной характеристикой, которая определяет быстродействие микрофлюидных систем.

Исследование кинетики роста капли проводили в слоях раствора йода в этаноле и смеси (раствор родамин G в этаноле) : вода, на установке показанной на Рис. 1. Пучок света фокусировали на пленку смачивания между стеклом и пузырьком. Нагрев пленки из-за поглощения излучения, сопровождается испарением растворителя и, как следствие, ростом ПН в зоне облучения, которое вызывает КК течение жидкости, формирующее каплю. На Рис. 10 представлены зависимости диаметра капли в пузырьках разного размера от времени с начала облучения. В растворе йода в этаноле Рис. 10а, в пузырьке большего диаметра капля растет медленнее, чем в пузырьке малого диаметра, а в спиртоводной смеси наоборот, капля растет быстрее, Рис. 10б.

На скорость роста капли, помимо мощности пучка и концентрации ТАВ в растворе, влияет геометрия системы, а именно: толщина пленки смачивания и близость капли к границе раствора, что определяется размерами пузырька.

В малом пузырьке пленка смачивания толще и граница раствора ближе, чем в большом, что способствует притоку жидкости в каплю. Здесь имеет место ламинарный режим формирования капли, Рис. 10а. В большом пузырьке пленка смачивания тоньше, чем в малом, и кроме того с ее поверхности происходит испарение растворителя, из-за чего она становится неустойчивой и дробится на струйки и капельки. При таком режиме течения скорость роста капли замедляется.

В спиртоводной смеси наблюдается преимущественно валиковый режим течения. Диаметр такой капли определяли как разницу между внешним и внутренним диаметром валика. В малом пузырьке на внутренней поверхности валика действуют отрицательные КК силы, которые препятствуют росту капли, обусловленному КК течением жидкости с периферии пузырька. Этот вывод подтверждается характерным увеличением внутреннего диаметра валика со

временем. Появление отрицательных КК течений связано, с конденсацией растворителя в центральной области пузырька, поскольку из-за отсутствия поглощающего свет красителя она холоднее, чем его периферия. В больших же пузырьках растворитель конденсируется преимущественно на холодную периферию пузырька, в силу ее удаленности от светового пятна. Конденсация растворителя в этом случае приводит к усилению КК течений формирующих каплю и скорость ее роста увеличивается. Это наглядно проявляется в уменьшении внутреннего диаметра валика со временем облучения пузырька.

В четвертой главе показана возможность практического применения пузырьков и капель, управляемых тепловым действием света в микрофлюидных устройствах.

Предложен и экспериментально апробирован способ прокачки жидкости через микроканалы с помощью пузырька, управляемого пучком света. Схема действующей модели пузырькового микронасоса показана на Рис. 11а. По методике, описанной во второй главе, в микрорезервуаре создавали два пузырька, с целью наглядно показать прокачку жидкости. Один из пузырьков служит поршнем, который приводится в движение пучком света, и толкает перед собой жидкость, а другой – индикатором движения жидкости, поскольку приводится в движение жидкостью проталкиваемой поршнем (б-г). В Табл. 3 сравниваются основные характеристики пузырькового микронасоса управляемого свето-индуцированным ТК эффектом с характеристиками других пузырьковых микронасосов. Преимущества предложенного способа прокачки по сравнению с существующими, следующие: 1) Использование холодного пузырька позволяет работать при перепадах температуры менее 10К, что важно для биологических применений; 2) Потребляемая мощность почти в 100 раз меньше, чем в известных методах; 3) В процессе прокачки возможна быстрая смена направления движения пузырька; 4) Используя каналы с гладкими стенками из материалов с хорошей теплоизоляцией, и подбирая излучение хорошо поглощаемое прокачиваемой жидкостью, можно существенно повысить скорость прокачки.

Показано, что аномальную каплю можно использовать в качестве адаптивной микролинзы. Изменение фокусного расстояния необходимо для многих оптических систем: проекционной и компьютерной техники, систем оптической связи и медицинской диагностики. Механическое решение в таких системах создает проблемы для проектировщика из-за высокой потребляемой мощности, медленного срабатывания, высокой цены и низкой надежности движущихся частей. Эти проблемы побудили разработчиков искать альтернативные подходы к созданию адаптивных оптических элементов. В данной работе предложен подход, который основан на использовании оптических и динамических свойств аномальной капли для создания ВСМ – варифокальной микролинзы самоцентрирующейся в пучок света.

Схема экспериментальной установки та же, что на Рис.1. Каплю диаметром около 130 мкм создавали под действием ФКК в растворе йода в этаноле с концентрацией 7г/л, который микропипеткой вносили в кювету. Для

предотвращения конденсации паров на верхней пластине кюветы, на ее внешнюю поверхность было нанесено прозрачное проводящее покрытие, служившее в качестве нагревателя. Мощность управляющего излучения изменяли в диапазоне от 48 до 200 мВт с помощью нейтральных светофильтров, осуществляя дискретное управление формой капли. Контрольную сетку с квадратными ячейками, которая служила объектом для построения изображения, помещали под предметным столиком микроскопа, на котором находилась кювета с каплей. Фокусное расстояние рассчитывали по формуле $F = l_i \cdot l_0 / (l_i + l_m)$, где l_0 – расстояние между предметом и микролинзой (каплей), l_m – длина стороны сетки (0.4 мм) l_i – размер изображения сетки, построенной с помощью микролинзы.

Оптические и динамические свойства капли

На Рис. 12 показана зависимость фокусного расстояния F капли от мощности управляющего излучения. Увеличение фокусного расстояния от 0.7 до 6 мм при ослаблении мощности управляющего излучения от 200 до 48 мВт обусловлено тем, что ПН капли уменьшается, приводя к растеканию капли и увеличению ее диаметра от 130 до 330 мкм. Вследствие роста диаметра капли увеличивался и радиус ее кривизны, который связан с фокусным расстоянием. При мощности пучка меньше 48 мВт, центростремительное течение жидкости почти прекращалось, капля не удерживалась в пучке, уходила из него и растекалась.

Время отслеживания капель пучка света, при его резком смещении на расстояние, равное диаметру капли, было менее 1 с при $P = 200$ мВт, и возрастало до 6 с, при ослаблении P до 80 мВт. Время полной перестройки формы капли, при изменении P в 1.5 раза составляло около 3 с, а при ослаблении пучка в более чем 3 раза – не превышало 10 с.

Дальнейшая миниатюризация капли, как выяснилось в экспериментах, оказалась неэффективной. Так, для капли с начальным диаметром 80 мкм, изменение фокусного расстояния составило лишь $F_{\max} / F_{\min} \cong 2.2$, а минимальная P , при которой капля еще удерживалась в пучке, оказалась более 80 мВт.

Разрешающая способность ВСМ, оцененная с помощью миры, оказалась 16 штрихов/мм Рис. 12а. Судя по фотографиям сетки (б), изображение имеет незначительные aberrации (бочкообразная дисторсия) вносимые мениском смачивания, поскольку искажение поля наблюдаются лишь по периметру ВСМ. Эти искажения можно исключить, если использовать в качестве подложки, прозрачные для излучения, гидрофобные материалы, на которых краевой угол смачивания для капли оказывается $\theta \geq 90^\circ$.

Преимущества ВСМ на основе аномальной капли по сравнению с существующими жидкими микролинзами показаны в Табл. 4. По ряду характеристик, таких как диапазон перестройки фокусного расстояния, бесконтактный способ управления им, размер капли, а также способность отслеживать пространственное смещение пучка света, ВСМ на основе аномальной капли, не имеет аналогов.

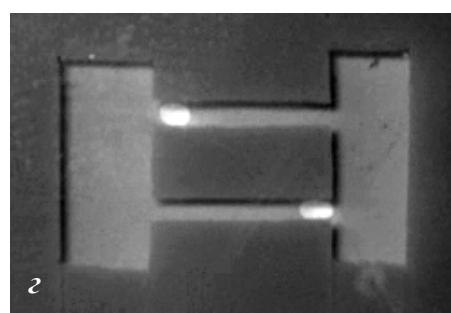
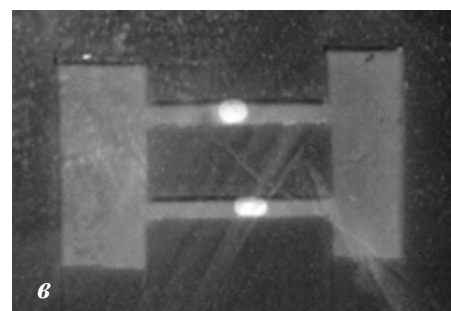
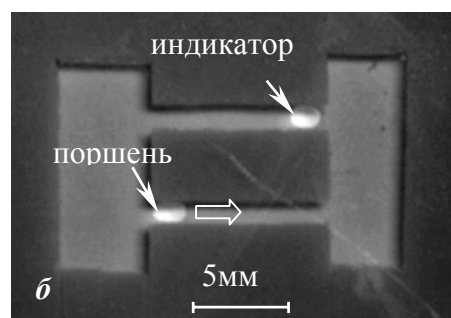
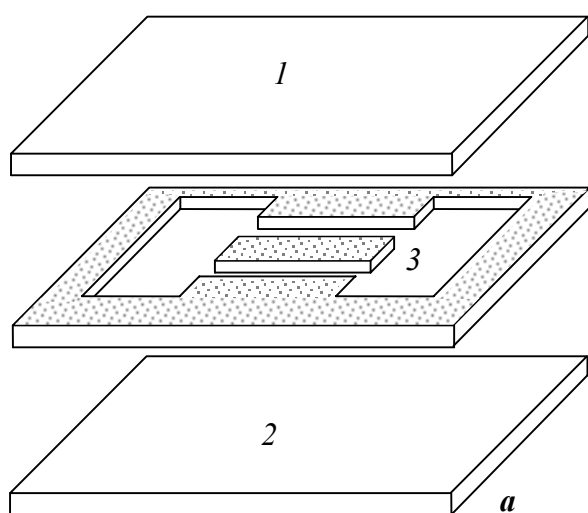


Рис.11 а) Схема пузырькового насоса: 1 и 2 – прозрачные пластины, 3 – прокладка толщиной 50 мкм с прорезанными в ней резервуарами и каналами. Жидкость: раствор CuBr_2 в этаноле, поглощаемая $P < 30$ мВт. б - г) Последовательность кадров процесса прокачки: б) Положение пузырьков перед прокачкой. Пустая стрелка – направление движения пузырька-поршня. в) и г) положение пузырьков спустя 7 и 15 с после начала прокачки.

Таблица 3.

Разработчики	Q_{\max}	p , Па	Потребляемая мощность	Диаметр канала (мкм)	Недостатки
Y.J. Song ¹ 2001	300 мкл/мин	560	8–12 Вт	1000	a,b,d
C.-J. Kim ² 1998	0.5 нл/мин	800	58 мВт	3.4	a–c
DeBar, A. Pisano ³ 2003	9.3 нл/мин	44	140 мВт/50 мВт создание пузырька/ ТК движение	100	c,e
N. Ivanova ⁴ 2003	2.5 мкл/мин	33	< 30 мВт	97	–

а) паровой пузырек, б) высокая потребляемая мощность, с) малая скорость прокачки, d) слабый тепловой отклик, е) сложность управления.

Y.J. Song, T.S. Zhao. // J. Micromech. Microeng, **11**, 713–719, 2001. 2) M.J. DeBar, D. Liepmann. // IEEE, 2002, P.109–111. 3) T.K. Jun, C.-J. Kim. // J. Applied Physics. **83**(11), 5658-5664, 1998. 4) N. Ivanova, Cho Hye Jung заявка на изобретение J 2003090541, РК – 200309 – 004 – 1, SAIT, Южная Корея, 2003

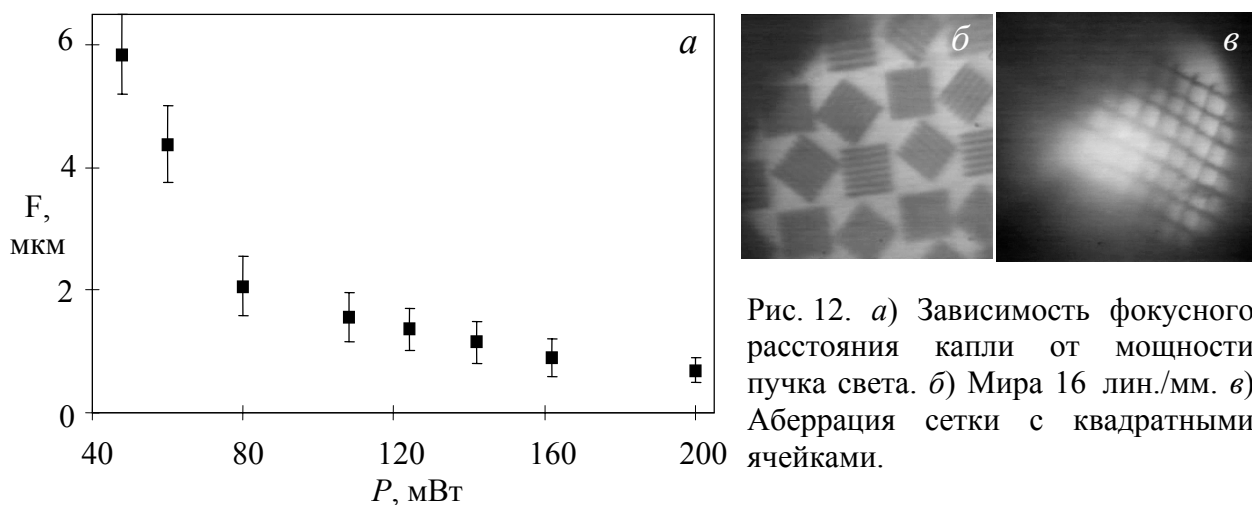


Рис. 12. а) Зависимость фокусного расстояния капли от мощности пучка света. б) Мира 16 лин./мм. в) Аберрация сетки с квадратными ячейками.

Таблица 4.

Микролинза (материал)	Диаметр	F_{max}/F_{min}	Время адаптац.	Принцип управления F.	Недостатки // преимущества
Пористое стекло ¹ (1997)	2 – 8 мм	150 / 40 = 3.7 (мм)	> 2 мин.	Δn линзы ресорбцией адсорбат.	Большая управляющая мощность (>2 Вт), инерционность перестройки F. //
Фоторезист погруженный в ЖК ² (1997)	100 мкм	560 / 380 = 1.5 (мкм)	от 1 мин. до 1 с.	Δn электрич. напряжением	Инерционность перестройки F, сложность изготовления. //
ВСМ ³ (йод/этанол) (1998)	100 мкм $n = 1.36$	6 / 0.7 = 8.6 (мм)	< 1 с.	ΔH КК силами	// Широкий F_{max}/F_{min} Отслеживание пучка, самоцентрирование.
Tunable liquid microlens ⁴ (2003)	(объем 6 мкл) ~1 мм	4.3 / 3.8 = 1.1	5мс	ΔH ЭК эффектом	Малый F_{max}/F_{min} . Контакт электрода с телом микролинзы. //

Δn – изменение показателя преломления, ΔH – изменение кривизны поверхности.

1) Commander *et.al.*// FOS Topical Digest Meetings Microlens Arrays, 5, 72-76, 1995. 2) Клим О., Мешковский И. // Оптика и Спектр. **82**(1), 51-54, 1997; 3) Bezuglyi B. Shapelenok S, Ivanova N.A. // Optics and Spectr., **87**(1), pp. 160-162, 1999; 4) Krupenkine T., *et.al.*// Appl. Phys. Letters. **82**(3), pp.316–318, 2003.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Выявлены механизмы движения пузырьков в ячейке Хеле-Шоу, основанные на действии ТК и КК сил на ПРФ, управляемых тепловым действием света. Разработан подход к измерению скоростей ТК и КК течений на облучаемой ПРФ, основанный на принципе аддитивности ее статической и динамической кривизны. Найдено, что при поглощаемой мощности пучка около 30 мВт, скорость ТК течения для пузырьков размерами $1 \leq D^* \leq 2.5$, находящихся в слоях толщинами 10, 50 и 70 мкм, достигает более 300 мм/с, а скорость КК течения в 3-5 раз превышает ее величину. При этом скорость «центра массы» пузырька не превышает 10 мм/с и пропорциональна отношению σ'_T/μ .

2) Обнаружено пять устойчивых форм пузырьков при их ТК движении и три устойчивые формы при КК движении. Установлены безразмерные параметры, определяющие форму пузырька: отношение диаметров пузырька и светового пятна и отношение скорости облучаемой ПРФ к скорости «центра массы» пузырька.

3) Проанализировано влияние сил вязкости и сил ПН на форму пузырьков при ТК механизме движения и установлено, что рост капиллярного числа $Ca = \mu u_s/\sigma$ ведет, помимо уменьшения скорости пузырька, к его деформации.

4) Показана возможность деления пузырька КК вихрями индуцированными пучком света на два дочерних пузырька. Установлено, что деление возможно для размеров пузырьков начиная с $D^* \geq 2$ при поглощаемой мощности не менее 30 мВт для исследованных жидкостей.

5) Исследована кинетика роста аномальной капли в пузырьках разного размера. Дано качественное объяснение этих зависимостей, состоящее в том, что скорость роста капли в пузырьке зависит от толщины пленки смачивания и близости границы раствора, а также от режима течения формирующего каплю.

6) Предложен и исследован новый подход к разработке методов прокачки жидкости в микроканалах, который основан на использовании ТК механизма движения воздушного пузырька за пучком света. Показаны его существенные преимущества: низкая потребляемая мощность (< 30 мВт), гибкость процесса прокачки и низкая температура прокачки ($\Delta T \cong 10$ К), что позволяет использовать подход в микрофлюидике имеющей дело с биологическими жидкостями.

7) Исследованы оптические и динамические свойства аномальной капли с целью использования ее как адаптивной микролинзы. Продемонстрированы ее уникальные свойства: 10-кратный диапазон перестройки фокусного расстояния, бесконтактное управление не только фокусным расстоянием, но и пространственным положением микролинзы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Безуглый Б.А., Шепеленок С.В., Иванова Н.А. Оптические свойства аномальной капли // Письма в ЖТФ. – 1998. – том 24. – № 24. – С. 61–64.
2. Безуглый Б.А., Шепеленок С.В., Иванова Н.А. Оптические свойства аномальной капли. // Передовые технологии на пороге XXI века: международная конференция. Тезисы. Ч. 2. – Москва, НИЦ "Инженер", 1998 – С. 486–488.
3. Безуглый Б.А., Шепеленок С.В., Иванова Н.А. Жидкая линза в качестве адаптивного оптического элемента // Оптика и Спектроскопия. – 1999. – том 98. – № 1. – С.173–175.
4. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Шепеленок С.В., Иванова Н.А. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция. – Отчет о НИР депонированный в ВИНТИ, № госрегистрации 01.99.00 04786, инв. № 0299.00 05481, 1999. – 40 с.
5. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Шепеленок С.В. Новый физический эффект – фотоиндуцированная концентрационнокапиллярная конвекция в учебном эксперименте. // 5-ая международная конференция "Физика в системе современного образования" (ФССО-99): Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, РГПУ, 1999. – С. 13–14.
6. Лазерная диагностика жидкостей. Методические указания к лабораторным работам / Б.А. Безуглый, Н.А. Иванова, О.А. Тарасов, А.А. Федорец. – Тюмень: Издательство ТюмГУ, 1999. – 50 с.
7. Безуглый Б.А., Иванова Н.А. Явления переноса и безразмерные комплексы. // Вестник Тюменского государственного университета. – 2000. – № 3. – С. 47–60.
8. Безуглый Б.А., Иванова Н.А. Создание движения жидкости и управление им в условиях микрогравитации. // Третий Международный аэрокосмический конгресс (IAC'2000): Труды. CD ISBN 5-89354-064-6. – Москва, СИП РИА, 2000 – 4 с.
9. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Зуева А.Ю. Термокапиллярная деформация тонкого слоя жидкости вызванная пучком лазера // ПМТФ. – 2001. – том 3. – № 42. – С.130–134.
10. Bezuglyi B.A., Fedorets A.A., Ivanova N.A. Application of the photoinduced capillary phenomena in liquid microgravity technologies // First Conference of the International Marangoni Association. – Giessen, Germany, Sept. 12-16, 2001. Abstracts, 80-81 (2001).
11. Bezuglyi B.A., Fedorets A.A., Ivanova N.A., Tarasov O.A. Photoinduced capillary effect in the MOMLS-technologies // First Conference of the International Marangoni Association. – Giessen, Germany, Sept. 12-16, 2001. Abstracts, 82-83 (2001).
12. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Федорец А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование фотоиндуцированной капиллярной конвекции. – Отчет о НИР депонированный в ВИНТИ, № госрегистрации 02.200.1 06846, инв. № 01. 2001103608, 2001. – 31 с.
13. Безуглый Б.А., Иванова Н.А. Манипуляция газовым пузырьком в ячейке Хеле-Шоу с помощью пучка света. // Письма в ЖТФ. – 2002. – том 28. – № 19. – С. 71-75.
14. Ivanova N.A., Bezuglyi B.A. Photoinduced Capillary Motion of Drops and Bubbles. // In Proc. of Sixth Microgravity Fluid Physics and Transport Phenomena Conference. NASA/CP-2002-211212/Vol. 2. Aug. 14-16, 2002, USA, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, p. 496, 2002.
15. Безуглый Б.А., Иванова Н.А. Управляемое тепловым действием света капиллярное движение пузырьков и капель в ячейке Хеле-Шоу // Труды IX межотраслевого научного и методического семинара "Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника". Выпуск I, Тюмень, ТюмГУ, 2002 – С. 34-8.
16. Патент РФ № 2191055. Способ разделения и дозирования компонентов бинарных смесей. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Чаппаров Ф.Х. – Бюл. №29 // Изобретения – 2001.
17. Патент РФ № 2190655. Класс рабочих жидкостей для тепловых трубок. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. – Бюл. № 28 // Изобретения – 2002.

18. Bezuglyi B.A., Ivanova N.A. Light-induced capillary motion of drops and bubbles // XII International Conference "Surface forces". Abstracts. – Moscow, Russia, July 2002 – P.135.
19. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А., Зуева А.Ю. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция – новое капиллярное явление. – Отчет по гранту РФФИ № 01-01-652-а. // URL: <http://library.intra.ru>. – 2002.
20. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения // II Российская конференция по космическому материаловедению: Тезисы докладов. Калуга, 3-6 июня 2003. – Изд-во "Манускрипт", Калуга, – с. 45.
21. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – № 6. – С. 82-85.
22. Ivanova N.A., Bezuglyi B.A. Formation and transportation of droplets in multiphase microsystems driven by local heating // International Marangoni Association Congress 2004. – Brussels, Belgium, July 14-17, 2004. – Université Libre de Bruxelles, Faculty of Applied Sciences, Microgravity Research Center. – Abstracts, p. 40. (2004).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглый Б. А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Москва, МГУ, 1985.
2. Безуглый Б.А., Галашин Е.А. // Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. – 1982. – том. 27.– №. 1. – С.69-71
3. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Криндач Д.П., Майоров В.С. // Письма в ЖТФ. – 1976. – том. 2. №. 18. – С. 832-8388.
4. Edmonstone B.D., Matar O.K. // J. Coll. and Interface Science. – 2004.– Vol. 274. – 183-199.
5. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. // Коллоидный журнал. – 2001.– N 6. – С. 735–741.
6. Федорец А. А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Тюмень, ТюмГУ, 2002.
7. Тарасов О. А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Тюмень, ТюмГУ, 2004.

Соискатель

Иванова Н.А.