

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ\*



А.Л. Зуев,  
доктор физико-  
математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН



К.Г. Костарев,  
кандидат физико-  
математических наук,  
заведующий лабораторией  
гидродинамической  
устойчивости,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН

Представлены результаты экспериментального изучения нескольких новых гидродинамических эффектов, обусловленных концентрационной неоднородностью растворов поверхностно-активных веществ вблизи поверхности пузырьков и капель. Показано, что наблюдаемые явления существенно отличаются от своих термокапиллярных аналогов. Причины расхождения кроются в наличии адсорбции молекул примеси на межфазной поверхности и в значительной разнице характерных времен диффузии вещества и температуропроводности. Установлен ряд закономерностей описанных явлений, предложено их объяснение.

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что жидкость может придать движение под действием как объемных, так и поверхностных сил. Из объемных наиболее распространенной является сила Архимеда, возникающая при локальном изменении плотности в жидкости, находящейся в гравитационном поле. Под влиянием архимедовой силы объемы жидкости с меньшей – по сравнению с окружающей средой – плотностью всплывают, вытесняя вниз объемы с большей плотностью. Несмотря на простоту механизма движения, структура таких течений и их эволюция сильно зависят от формы полости, занимаемой жидкостью, а также от конфигурации и расположения устройств, действие которых приводит к изменению плотности (в

качестве подобных устройств выступают различного рода нагреватели, источники примеси и т.д.). Соответственно, описанию объемных течений посвящены десятки монографий и тысячи журнальных публикаций. О движении жидкости под воздействием поверхностных (капиллярных) сил известно существенно меньше (такое движение называют также течением Марангони – по имени итальянского ученого, впервые изучавшего его в конце XIX века). Дело в том, что появление этих сил обусловлено локальным изменением поверхностного натяжения, что связано, в основном, с возникновением неоднородного распределения температуры или концентрации вдоль поверхности жидкости. А поскольку формирование

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-01-00221.

градиентов температуры и концентрации на поверхности является, как правило, следствием их изменения в объеме жидкости, то течение Марангони обычно маскируется более интенсивным гравитационным.

В то же время при определенных условиях поверхностные силы могут преобладать над силами Архимеда. Такие условия возникают в тонких горизонтальных слоях и пленках жидкости, вблизи поверхности капель и пузырьков газа в жидкости и, конечно, в невесомости. Не случайно, интерес к изучению поверхностных сил резко возрос после первых космических экспериментов в связи с необходимостью выяснения причин формирования течений и отличия скорости массопереноса от диффузионной [4]. В частности, было сделано предположение, что именно капиллярные силы могут стать основным источником движения жидкости при снижении уровня гравитации. Последовавшие многочисленные технологические и специально подготовленные эксперименты в условиях орбитального полета быстро подтвердили эту гипотезу в отношении термокапиллярных эффектов, вызванных изменением температуры жидкости [19].

Менее изученной оказалась роль концентрационно-капиллярного механизма в развитии массопереноса в жидкости. С одной стороны, существует формальная схожесть источников термо- и concentra-

ционно-капиллярного движения – в обоих случаях это пространственная неоднородность поверхностного натяжения. С другой стороны, создавать на поверхности жидкости градиенты концентрации, поддерживать их и измерять намного сложнее, чем градиенты температуры. В результате к настоящему времени экспериментально исследованы в основном «тепловые» версии капиллярных течений.

Однако одного подобия источников движения часто недостаточно для адекватного описания поведения жидкой смеси, имеющей межфазную границу (поверхность контакта «жидкость-жидкость», «жидкость-газ»). Причин для этого две. В качестве первой выступает тот факт, что характерные времена диффузии примеси превышают времена диффузии тепла в сотни и даже тысячи раз. В итоге, концентрационные неоднородности в жидкостях существуют значительно дольше тепловых, а продолжительность и интенсивность действия капиллярных сил на границе раздела фаз многократно возрастает. Второй причиной служит адсорбция (сосредоточение) примеси на поверхности жидкости – эффект, отсутствующий в тепловом случае. Влияние обоих указанных факторов приводит к значительному отклонению в развитии ряда гидродинамических явлений, предсказать которое на основе аналогии с «тепловой» версией нельзя. Описанию двух таких явлений и посвящена настоящая статья.

## КОНЦЕНТРАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫЙ ДРЕЙФ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА

Действие сил Марангони на свободной поверхности жидкости вызывает ее движение в направлении возрастания поверхностного натяжения. Поверхность увлекает за собой прилежащие к ней слои жидкости. В результате если свободная поверхность принадлежит пузырьку, то он начинает вытесняться в направлении, противоположном течению жидкости. Такая способность пузырьков газа самопроизвольно перемещаться в жидкости в направлении уменьшения величины поверхностного натяжения получила название

капиллярного дрейфа [3].

Хотя явление капиллярного дрейфа теоретически было предсказано уже довольно давно [22], процесс его экспериментального подтверждения затянулся на долгие годы даже для случая неоднородно нагретой жидкости. Причиной этого стали трудности отделения капиллярной составляющей движения пузырька от гравитационной, связанной как с его архимедовым всплытием, так и с конвективным течением окружающей жидкости. Точки над «i» в конечном итоге поставили опы-

ты в условиях максимального подавления влияния гравитации, в том числе в невесомости. Было показано, что в однородном градиенте температуры скорость термокапиллярного дрейфа пузырька, за исключением начального участка движения, остается постоянной и определяется его диаметром, величиной градиента температуры и физико-химическими свойствами окружающей жидкости [2, 20]. В то же время результаты аналогичного эксперимента с пузырьками в неоднородном поле концентрации оказались другими [5, 9, 15].

Для изучения концентрационно-капиллярного дрейфа пузырька в наземных условиях необходимо в первую очередь подавить его всплытие под действием архимедовой силы, что можно сделать, поместив пузырек в горизонтальный слой жидкости, ограниченный сверху твердой стенкой. Соприкасаясь с ней, пузырек оказывается способным перемещаться только вдоль слоя. Однако в этом случае для движения пузырька в жидкой смеси необходимо создать достаточно долго существующий горизонтальный градиент концентрации, что с физической точки зрения довольно сложно, поскольку изменение соотношения компонентов смеси, как правило, влечет за собой изменение ее плотности. Возникновение горизонтальных градиентов плотности приводит жидкость в адвективное движение до тех пор, пока в ней не установится устойчиво стратифицированный вертикальный перепад плотности или же жидкость полностью не перемешается до однородного состояния. Кроме того, чтобы локальное изменение состава бинарной смеси привело к появлению концентрационных сил Марангони, один из ее компонентов должен быть поверхностно-активным веществом (ПАВ) по отношению к другому,

т.е. его молекулы должны преимущественно накапливаться на свободной поверхности данной жидкой смеси.

С учетом этих требований в качестве ПАВ в наших опытах был выбран метиловый спирт, обладающий низкой вязкостью и малым значением поверхностного натяжения (физико-химические свойства используемых жидкостей приведены в таблице). Его плотность близка к плотности воды, игравшей роль второго компонента бинарного раствора.

Экспериментальная кювета представляла собой прямоугольную ячейку Хелешоу в форме тонкого (толщиной ~ 1 мм) слоя между двумя плоско-параллельными стеклами. Для создания продольного градиента концентрации в ней использовалась следующая методика. Вначале кювета устанавливалась вертикально и до половины объема заполнялась раствором, после чего сверху доливался более легкий чистый спирт. Через 10–20 с в кювете благодаря силе тяжести устанавливалось распределение концентрации в виде двух расположенных друг под другом областей исходных жидкостей с узкой зоной диффузионного перехода между ними. Затем кювета переводилась в горизонтальное положение. При этом возникал сравнительно большой продольный перепад плотности, вновь приводивший систему жидкостей в движение. Интенсивность этого течения быстро уменьшалась со временем в силу малой толщины слоя и активного перемешивания спирта и его раствора во встречных потоках. В результате через несколько минут в центре кюветы формировалась протяженная область небольшого, но однородного продольного градиента концентрации, который существовал в течение долгого времени (рис. 1). Отметим, что при увеличении толщины слоя в два раза возникнове-

Физико-химические свойства используемых жидкостей [3, 14]

Вещество, 20°C	Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Вязкость	Поверхностное натяжение, 10 <sup>-3</sup> Н/м	Показатель преломления
Вода	0,9982	1,00	72,58	1,3330
Метиловый спирт	0,7917	0,60	22,51	1,3286
Изопропиловый спирт	0,7856	2,37	21,22	1,3616
Кислота уксусная	1,0498	1,22	26,36	1,3719
Хлорбензол	1,1062	0,80	33,50	1,5241

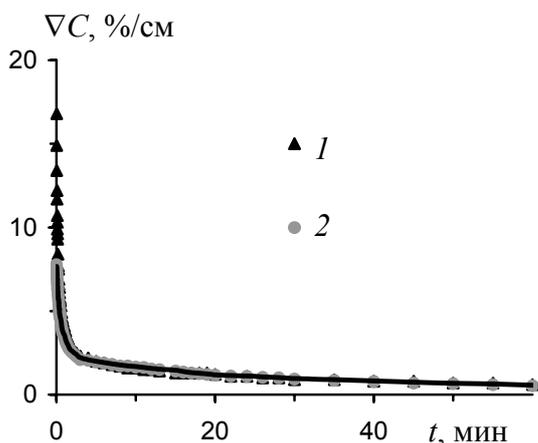


Рис. 1. Зависимость продольного градиента концентрации метилового спирта в центре кюветы от времени. Начальная концентрация спирта в растворе ( $C_0$ , %) 90 (1), 80 (2)

ния продольного градиента концентрации уже не наблюдалось, а происходило очень быстрое восстановление двухслойной стратификации системы жидкостей по плотности.

Для измерения величины градиента концентрации ПАВ в опытах использовался интерферометр Физо, рабочей ячейкой которого служила сама экспериментальная кювета. В изотермическом случае интерферометр позволял визуализировать неоднородности концентрации в растворе в виде системы изолиний, представлявших собой полосы равного оптического пути. Если состав смеси изменялся только поперек зондирующего светового потока, как в нашем случае при наблюдении сверху, то каждую интерференционную полосу можно было отождествить с определенной величиной концентрации ПАВ, используя концентрационную зависимость показателя преломления. Так, для слоя толщиной 1,2 мм переход от одной интерференционной полосы к другой соответствовал в среднем изменению концентрации спирта в воде на 0,3 %.

В слой раствора с созданным горизонтальным градиентом концентрации с помощью медицинского шприца вносился пузырек воздуха, принимавший форму плоского диска с диаметром  $D$ , равным 5–15 мм. Как только пузырек отделялся от иглы, он сразу начинал перемещаться в сторону большей концентрации спирта. Одновременная видеорегистра-

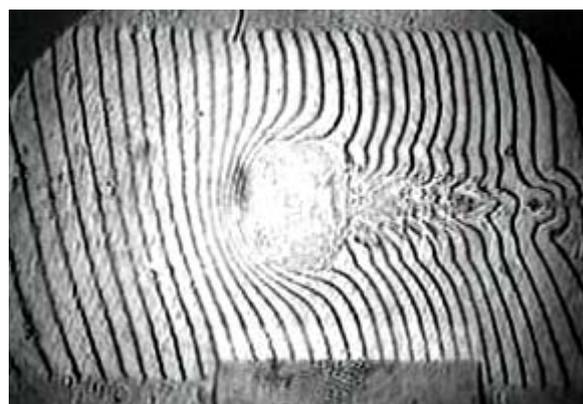


Рис. 2. Интерферограмма поля концентрации спирта вокруг пузырька во время его движения. Вид сверху. Прямоугольник ниже пузырька – маркер длиной 3,0 см

ция концентрационного поля и положения в нем пузырька позволила определить градиент концентрации, диаметр пузырька и скорость его движения в различные моменты времени. Типичная интерференционная картина приведена на рис. 2. Опыты показали, что, как и в случае термокапиллярного дрейфа [2], максимальная скорость концентрационного движения прямо пропорциональна градиенту поверхностного натяжения и диаметру пузырька. Результаты опытов с пузырьками разных размеров при различных значениях градиента концентрации  $\nabla C$  приведены на сводном графике (рис. 3), где по оси ординат отложена максимальная скорость  $u$  дрейфа, отнесенная к диаметру пузырька.

Вместе с тем эксперимент выявил и существенное различие между концентрационно-капиллярным и термокапил-

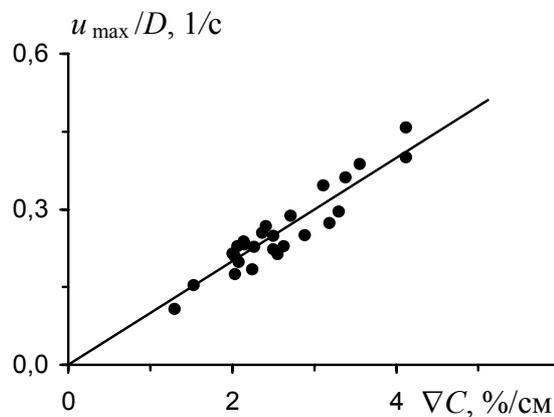


Рис. 3. Зависимость скорости капиллярного дрейфа, отнесенной к диаметру пузырька, от градиента концентрации метанола

лярным механизмами движения. Так, если в однородном градиенте температуры пузырек дрейфовал с постоянной, не зависящей от времени скоростью, то при движении в концентрационном поле скорость пузырька монотонно уменьшалась до нуля в течение 40–60 с. Это происходило несмотря даже на то, что в растворе, окружавшем пузырек, все еще сохранялся значительный градиент концентрации. При этом новый пузырек, внесенный рядом с уже остановившимся, сразу начал перемещаться. Типичная зависимость скорости движения от времени приведена на рис. 4. При вариации размера пузырька ситуация качественно не изменялась, хотя время дрейфа и длина пройденного пути возрастали с увеличением диаметра.

Для объяснения уменьшения скорости можно предположить, что в процессе движения пузырька происходит насыщение его поверхности спиртом за счет адсорбции из раствора. Объемная диффузия ПАВ оказывается неспособной полностью противодействовать адсорбции в создании однородного распределения концентрации на свободной поверхности. Как результат, поверхностное натяжение на всей границе пузырька достаточно быстро становится одинаковым независимо от величины градиента концентрации во внешней жидкости и, таким образом, причина движения пузырька исчезает. Отсюда следует, что и в других случаях при наличии растворенного в жидкости ПАВ действие концентрационно-капиллярных эффектов может наблюдаться только в течение ограниченного времени, определяемого скоростью адсорбционно-

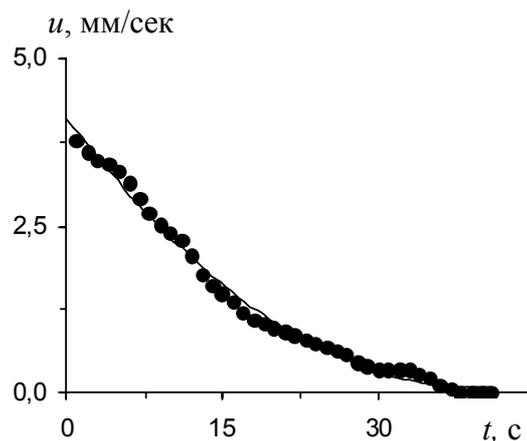


Рис. 4. Зависимость скорости движения пузырька от времени;  $\nabla C = 2,5 \text{ \%}/\text{см}$ ,  $D = 7 \text{ мм}$

го процесса.

Обнаруженное нами действие адсорбции позволяет объяснить известный факт, что в жидкостях, содержащих примеси ПАВ, в частности в высококонцентрированных водных растворах органических жидкостей, термокапиллярная конвекция обычно не наблюдается [12]. Так, например, в экспериментах [15] по изучению термокапиллярного дрейфа в растворах метанола уже незначительная добавка воды (~ 10 %) к чистому спирту приводила к прекращению движения пузырьков при наличии градиента температуры. Причина, скорее всего, кроется в компенсации тепловой неоднородности поверхностного натяжения перераспределением ПАВ на поверхности пузырька. А поскольку характерные диффузионные времена значительно превышают времена тепловые, то, как и в чисто концентрационном случае, основание для движения жидкости – неоднородность поверхностного натяжения – исчезает.

## КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

Исследование структуры концентрационного поля вблизи неподвижного пузырька, помещенного в неоднородный раствор ПАВ, привело к обнаружению еще одного интересного явления – установления длительных колебательных режимов массообмена в жидких смесях, устойчиво стратифицированных по концентрации [6–8, 10, 11, 16–18].

Как показали эксперименты, причи-

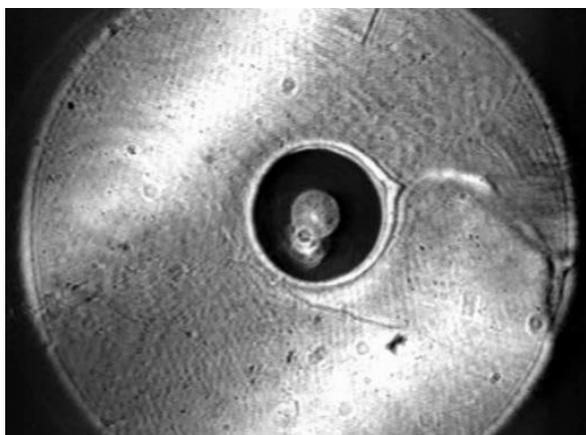
ной возникновения осциллирующего движения в исследуемой ситуации явилось взаимодействие трех механизмов массопереноса – гравитационного, капиллярного и диффузионного, обладающих существенно разными характерными временами (которые определяются как времена диссипации возмущений, порождающих перенос примеси, и являются обратно пропорциональными, соответственно, ко-

эффицентам кинематической вязкости  $\nu$  и диффузии  $D_c$ , при этом  $\nu/D_c \sim 1000$ ). Отметим, что в «тепловом» варианте задачи о движении вблизи неподвижных пузырьков и капель развивается только стационарное течение [8, 21] (соотношение коэффициентов вязкости и температуропроводности, как правило, не превышает одного порядка).

Впервые установление колебательных режимов концентрационной конвекции было экспериментально обнаружено вокруг неподвижных пузырьков воздуха, заключенных в тонкий жидкий горизонтальный слой с вертикальным градиентом поверхностного натяжения [6, 16]. В качестве слоя в опытах использовалась прямоугольная полость высотой около 2,6 мм, заполненная двухслойной системой смешивающихся жидкостей, одна из которых являлась поверхностно-активной по отношению к другой (метанол – вода, уксусная кислота – вода). Верхней и нижней стенками полости служили плоскопараллельные стекла, что позволяло с помощью интерферометра визуализировать распределение концентрации ПАВ в жидкости в горизонтальной плоскости (как и в случае концентрационного дрейфа). Были выявлены периодические кратковременные интенсивные возмущения поля концентрации вокруг пузырька (рис. 5). Период этих колебаний составлял от нескольких секунд до десятков минут и зависел от времени, начального перепада

концентрации ПАВ, свойств жидкостей, толщины слоя и диаметра пузырька. По мере уменьшения вертикального градиента концентрации колебания происходили все реже, а затем внезапно прекращались. Было высказано предположение, что причина наблюдаемой интенсификации массопереноса заключается в регулярных выбросах в окружающий раствор излишков ПАВ, накапливаемых вблизи одного из полюсов пузырька вследствие концентрационно-капиллярного течения по его поверхности. Однако саму структуру возмущений в такой задаче с трехмерной геометрией экспериментально изучить не представлялось возможным.

С целью выяснения причин возникновения колебаний исследование динамики поля концентрации ПАВ и структуры конвективного движения вокруг пузырька было продолжено в тонком вертикально ориентированном слое стратифицированной жидкости [7, 8, 10, 17]. Для этого экспериментальная кювета устанавливалась вертикально на своей узкой грани, а наблюдение осуществлялось сбоку со стороны широких граней. Кювета заполнялась водными растворами уксусной кислоты или изопропилового спирта с устойчивой вертикальной стратификацией концентрации ПАВ (уксусная кислота тяжелее воды, изопропиловый спирт, напротив, легче). В жидкость помещался пузырек воздуха объемом 20–30 мкл, который принимал форму короткого горизонтального цилиндра диаметром 4–6 мм



а



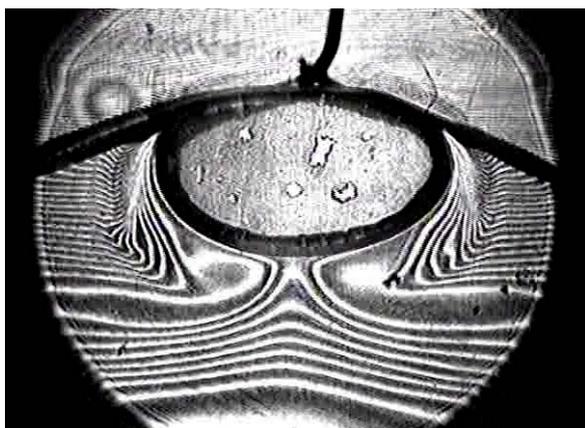
б

Рис. 5. Интерферограммы поля концентрации вокруг пузырька воздуха в горизонтальном слое водного раствора изопропилового спирта. Толщина слоя 2,6 мм, перепад концентрации  $\Delta C = 20\%$ , диаметр пузырька  $D = 5,0$  мм, время с начала очередного цикла автоколебательного режима  $t$ , с: 0 (а), 2 (б)

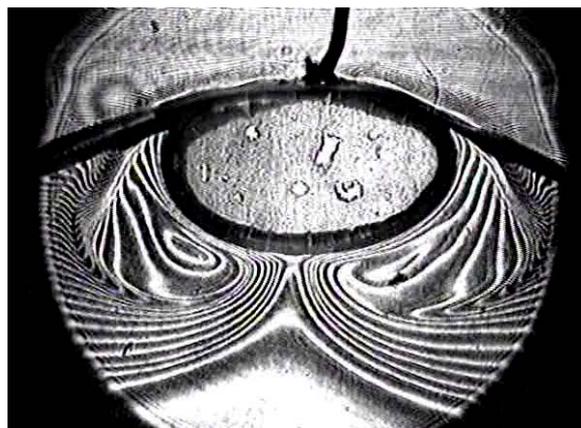
со свободной боковой поверхностью. От всплытия под действием силы Архимеда пузырек удерживала специальная проволочная рамка, не препятствовавшая развитию конвекции Марангони. Благодаря малой толщине слоя возникавшие в жидкости течения и распределения концентрации (усредненные поперек слоя) оказывались двухмерными, что и позволило исследовать их структуру и эволюцию интерференционным методом.

На рис. 6 приведена типичная серия интерферограмм, описывающая изменение поля концентрации уксусной кислоты в течение цикла интенсификации массообмена вблизи пузырька. В приведенном случае поверхностные силы направлены к верхнему полюсу пузырька. Под их действием раствор, насыщенный ПАВ, из нижней приполярной области устремлялся вверх, окружая тонким слоем весь пу-

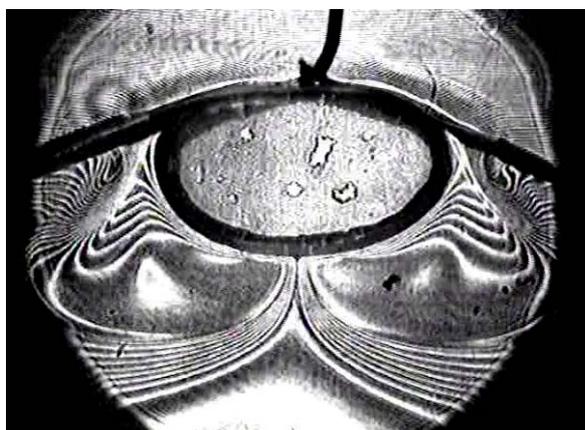
зырек (рис. 6, а). Возникновение этого слоя оказалось характерной чертой концентрационно-капиллярной конвекции, отличающей ее от термокапиллярного течения. Из-за больших характерных времен диффузии избыток ПАВ, переносимый по поверхности пузырька, не успевал раствориться в окружающей жидкости. В результате раствор с высоким содержанием ПАВ накапливался вблизи верхнего полюса в виде своеобразной «шапки», а сформировавшийся вокруг пузырька слой с однородной концентрацией устранял перепад концентрации ПАВ между полюсами, являвшийся источником движения Марангони. Как только восходящее капиллярное движение по поверхности пузырька прекращалось, динамическое равновесие концентрационной «шапки», более тяжелой, чем окружающая ее жидкость, нарушалось, и



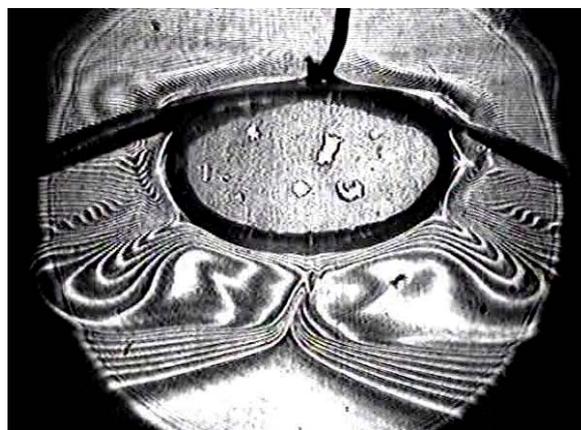
а



б



в



г

Рис. 6. Интерферограммы поля концентрации вблизи пузырька воздуха в вертикальном слое водного раствора уксусной кислоты. Перепад концентрации кислоты между полюсами пузырька  $\Delta C = 22\%$ ; вертикальный диаметр пузырька  $D = 3,0$  мм, время с начала цикла колебаний  $t$ , с: 0 (а), 2,25 (б), 4,5 (в), 8,25 (г).

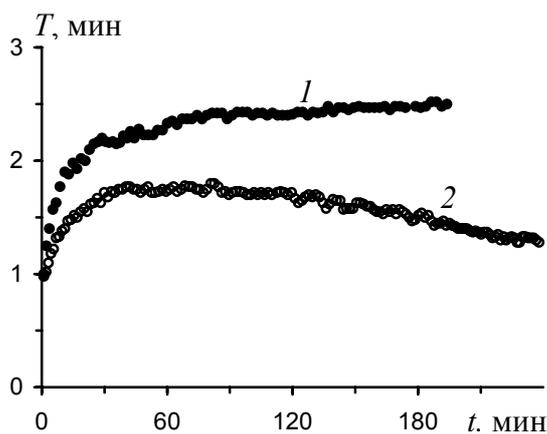


Рис. 7. Зависимость периода колебаний концентрационного поля вокруг пузырька от времени: 1 – изопропиловый спирт, 2 – уксусная кислота

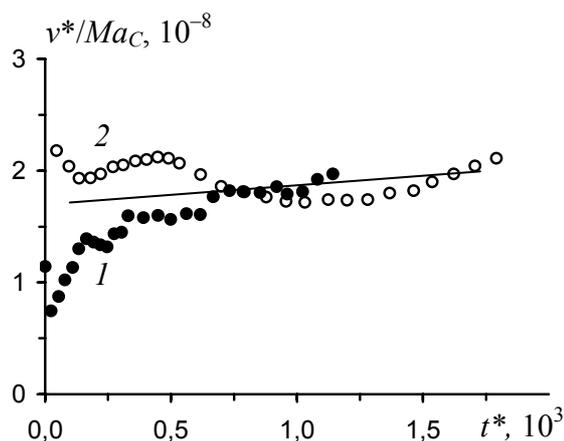


Рис. 8. Зависимость частоты колебаний, отнесенной к концентрационному числу Марангони, от времени. 1 – изопропиловый спирт, 2 – уксусная кислота. Прямая линия построена методом наименьших квадратов

струи концентрированного раствора уксусной кислоты под действием архимедовой силы начинали опускаться вниз справа и слева от пузырька (рис. 6, б).

Это движение, в свою очередь, вызывало появление под пузырьком струи, направленной вверх и приносившей на его поверхность раствор с высокой концентрацией ПАВ. Восстановление перепада концентрации ПАВ между полюсами пузырька вновь приводило в действие капиллярные силы, которые резко ускоряли восходящее течение. В результате у боковой поверхности цилиндрического пузырька возникало интенсивное конвективное движение в виде двух симметричных вихрей. Развиваясь, вихревые ячейки захватывали все больший объем жидкости с высокой концентрацией ПАВ (рис. 6, в). Благодаря этому средняя плотность раствора в ячейках повышалась и они смещались вниз, отсекая в итоге от нижнего полюса пузырька струю ПАВ, подпитывающую движение (рис. 6, г). Как только это происходило, конвекция прекращалась так же быстро, как и возникла. Весь процесс развития и затухания

интенсивного концентрационно-капиллярного движения вокруг пузырька занимал не более 30 с. Затем, под действием силы тяжести, вертикальная стратификация раствора постепенно восстанавливалась, приближаясь к первоначальному виду, приведенному на рис. 6, а. Через некоторое время весь процесс повторялся. Период наблюдаемых автоколебаний в системе составлял около 1–2 мин, время же, в течение которого наблюдались колебания, достигало нескольких часов, ограничиваясь только временем существования градиента концентрации ПАВ в кювете (рис. 7).

В ходе эксперимента были изучены временные зависимости периода осцилляций для различных значений средней концентрации раствора, градиента концентрации ПАВ и диффузионных чисел Марангони и Грасгофа. Показано, что отношение безразмерной частоты колебаний к числу Марангони не зависит от времени и хорошо совпадает в опытах, проведенных с растворами разных жидкостей и даже противоположными направлениями градиента концентрации (рис. 8).

## КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ

Описанные осцилляции концентрационного течения экспериментально наблюдались не только вблизи свободной по-

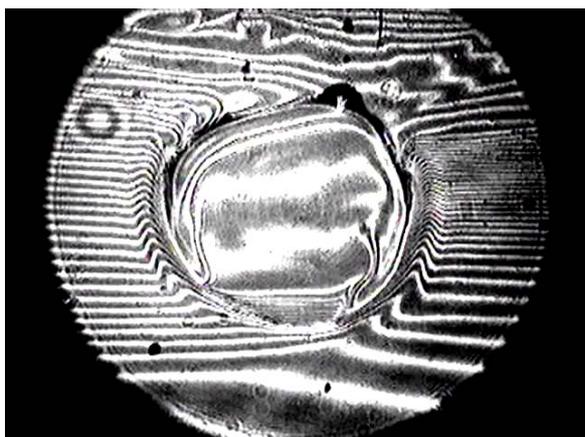
верхности бинарных растворов, но и для межфазной границы, созданной двумя взаимно нерастворимыми жидкостями,

при диффузии сквозь нее ПАВ.

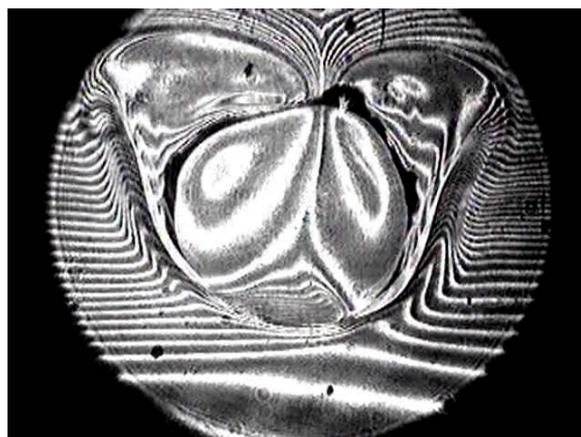
На рис. 9 представлена серия интерферограмм, описывающая эволюцию распределения компонентов жидкой смеси в течение одного из циклов колебательного режима вблизи капли хлорбензола. Капля находится в вертикальном слое, заполненном стратифицированным раствором изопропилового спирта в воде [11, 18]. Вода и хлорбензол практически не растворимы друг в друге, в то время как спирт полностью растворим в обеих жидкостях, являясь для них поверхностно-активным веществом [14]. Отсутствие взаимной растворимости базовых жидкостей позволяет легко расшифровывать полученные интерферограммы. Так, переход от одной интерференционной полосы к другой соответствовал изменению концентрации спирта на 0,27 % в воде и на 0,1 % в хлорбензоле.

Проницаемость межфазной границы для ПАВ создает определенное своеобразие для развития движения в системе жидкостей. В частности, большая часть поверхности капли находится в постоянном движении – вследствие поглощения спирта каплей на межфазной границе все время поддерживается градиент концентрации ПАВ, обеспечивающий действие капиллярных сил (рис. 9, а). В то же время часть поверхности капли вблизи ее нижнего полюса остается неподвижной. Внутри капли к этой части примыкает застойная зона, образованная хлорбензолом с низким содержанием спирта и находящаяся в химическом равновесии (равенстве химических потенциалов) со слоями раствора, которые окружают нижний полюс.

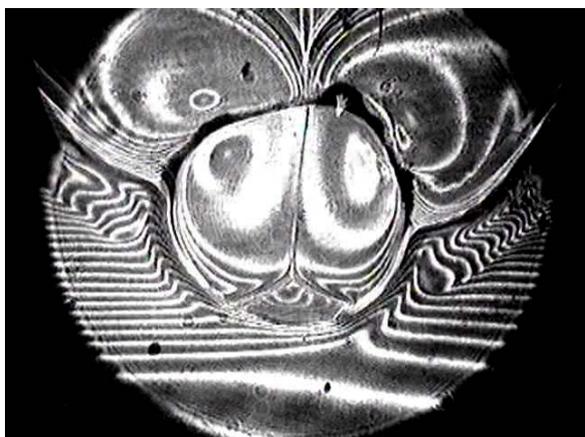
На рис. 9, б представлено начало цикла. Хорошо видно, что источником дви-



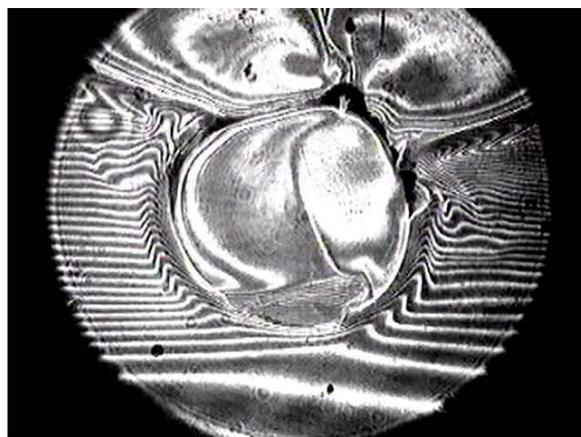
а



б



в



г

Рис. 9. Интерферограммы поля концентрации внутри и вблизи капли хлорбензола, поглощающей изопропиловый спирт из его водного раствора. Перепад концентрации спирта между полюсами капли  $\Delta C = 8 \%$ , диаметр капли  $D = 6,0$  мм; время с начала первого цикла колебаний  $t$ , с: 0 (а), 3 (б), 18 (в), 40 (г)

жения поверхности является поток раствора с высоким содержанием спирта из области, лежащей над каплей. Его приход на межфазную границу порождает значительные перепады концентрации, усиливая капиллярное движение. При этом основная масса спирта, увлекаемого капиллярной конвекцией, не поглощается каплей, а возвращается в объем окружающего раствора, где всплывает, будучи легче прилежащих слоев.

Отрыв потока спирта от поверхности капли происходит в области, где действие капиллярных сил начинает уравниваться действием силы Архимеда, возрастающей по мере продвижения ПАВ вниз. Внутри капли к этой области примыкает динамическая граница застойной зоны.

Спирт, проникающий в каплю, также сначала увлекается вниз движением межфазной границы, затем поворачивает вдоль верхнего края застойной зоны и всплывает вверх, формируя интенсивное двухъячеистое течение с выраженным конвективным факелом вдоль вертикального диаметра капли. Двухъячеистое движение формируется и снаружи капли. Как и в случае с пузырьком, возникшие ячейки, захватывая раствор с высокой концентрацией ПАВ, становятся легче и всплывают (рис. 9, в), отсекая от капли питающий поток спирта (рис. 9, з). В результате течение вдоль поверхности замедляется почти до полной остановки. Одновременно внутри капли начинается всплытие вверх раствора хлорбензола с достаточно высоким содержанием спирта, который

до этих пор удерживался крупномасштабным течением «в карманах» вблизи застойной зоны (см. рис. 9, в). Если к этому моменту капля уже достигла насыщения поверхностно-активным веществом (т.е. с начала опыта прошло несколько циклов), то всплывающий спирт оказывается излишним и капля сбрасывает его в окружающий раствор для достижения с ним химического равновесия. Далее гравитация восстанавливает вертикальное распределение ПАВ вблизи границы капли, и цикл повторяется.

На рис. 10 приведено изменение периода цикла интенсификации течения вблизи капли, поглощающей ПАВ, в зависимости от времени с момента установления колебательного режима массообмена. Увеличение периода со временем, как показывают измерения, связано с уменьшением градиента концентрации ПАВ в окружающем растворе за счет диффузии и конвективного перемешивания, вызванного капиллярным течением по поверхности капли (размер жидкой области, приведенной в движение этим течением, в несколько раз превышает диаметр капли). Изменение градиента концентрации ПАВ во внешней жидкости снижает не только интенсивность действия капиллярных сил, но и количество ПАВ, проникающего в каплю. На рис. 11 приведена зависимость отношения максимальных перепадов концентрации спирта внутри и вне капли от времени. Как видно из рисунка, это отношение остается практически постоянным на протяжении всего периода наблюдения (~3 часов), несмотря на очень сложный вид течений.

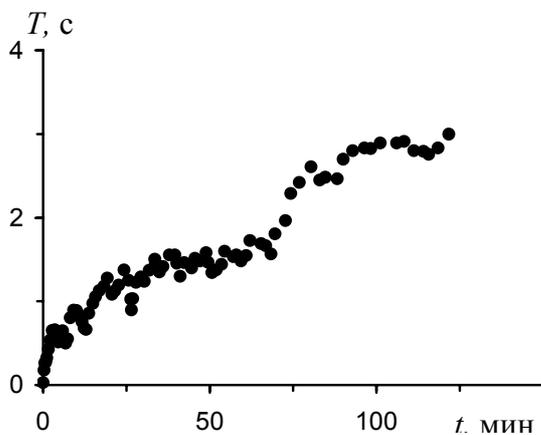


Рис. 10. Зависимость периода интенсификации течения вблизи капли в стратифицированном растворе ПАВ от времени

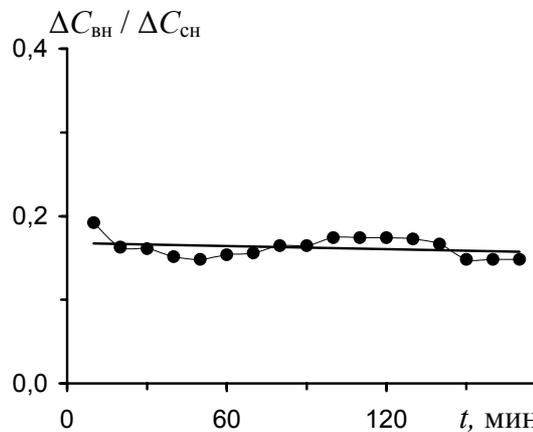


Рис. 11. Изменение отношения перепадов концентрации ПАВ внутри и снаружи капли с течением времени

## ВЫВОДЫ

Экспериментальное подтверждение возможности концентрационного дрейфа пузырьков газа, обнаружение и описание развития колебательных режимов течения вблизи неподвижных газовых и жидких включений в неоднородных растворах ПАВ позволяет объяснить особенности массообмена и формирования структуры материалов в ряде технологических экспериментов в условиях микрогравитации, предсказать поведение сложных систем жидкостей и многофазных сред в тонких каналах и слоях, а также в полостях со сложной геометрией. Полученные данные могут быть использованы для разработки как пассивных систем гомогенизации жидкостей, так и установок для разделения жидких смесей; для оптимизации режимов их работы, при создании мини-систем охлаждения и теплообмена, при подготовке технологических экспериментов в области материаловедения на борту орбитальных станций и других космических аппаратов.

Помимо перечисленных направлений приложения достигнутых результатов, можно привести еще одно, достаточно неожиданное. Связано оно с гипотезой происхождения жизни на нашей планете. Опубликованная А.И. Опариным впервые в начале 30-х годов прошлого столетия, эта гипотеза включает несколько основных моментов, одним из которых является предположение, что низкомолекулярные органические вещества и аминокислоты могли образовывать «питательный бульон» в воде, на основе которого в дальнейшем возникали белковые соединения [13].

Узким местом гипотезы является необходимость достижения высокой концентрации органических веществ для преобладания реакции синтеза над реакцией рекомбинации. В частности, расче-

ты показывают, что средняя концентрация «питательного бульона» должна значительно превышать существующую в настоящее время в мировом океане. Противоречие можно снять, если «включить» механизм повышения локальной концентрации, на роль которого могут претендовать капли органических жидкостей в неоднородных растворах ПАВ. Большое количество этих жидкостей имеют ограниченную растворимость в воде и поэтому могут образовать отдельную фазу при частичном испарении их водных растворов в мелких водоемах. Одновременно испарение может создать в таких водоемах градиент концентрации вещества, представляющего собой ПАВ. Возникающее вокруг капель течение приносит к ним растворенные вещества, которые они поглощают, причем концентрация веществ в капле может превосходить их концентрацию в окружающей жидкости (пропорционально соотношению коэффициентов распределения растворимого компонента в системе двух жидкостей). Дальнейшее увеличение температуры приводит к полному испарению жидкости и формированию концентрированного осадка из аминокислот и других веществ на месте капель с частичной деструкцией органических молекул, что создает условия для последующего синтеза веществ с более высоким молекулярным весом, включая белковоподобные.

Таким образом, использование знаний о развитии интенсивной концентрационной конвекции Марангони вблизи капель позволяет «перекинуть мостик» между экспериментальным подтверждением возможности образования аминокислот в неживой природе и результатами опытов по синтезу высокомолекулярных аминокислот.

## Библиографический список

1. Братухин Ю.К. Термокапиллярный дрейф капельки вязкой жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 5. – С. 156–161.
2. Братухин Ю.К., Зуев А.Л. Термокапиллярный дрейф пузырька воздуха в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1984. – № 3. – С. 62–67.

3. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
4. Гидромеханика невесомости / под ред. *А.Д. Мышкиса*. М.: Наука, 1976. – 504 с.
5. *Зуев А.Л., Костарев К.Г., Шмыров А.В.* Концентрационно-капиллярный дрейф пузырьков воздуха в неоднородных растворах жидкостей // Термо- и концентрационно-капиллярные эффекты в сложных системах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С.77–89.
6. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Концентрационно-капиллярная конвекция вблизи поверхности пузырька в горизонтальном слое неоднородного раствора жидкостей // Конвективные течения. – Вып.1. – Пермь: ПГПУ, 2003. – С.123–139.
7. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Осцилляция конвективного течения вокруг пузырька воздуха в вертикально стратифицированном растворе поверхностно-активного вещества // Журнал экспериментальной и технической физики. – 2006. – Т. 130. – № 2. – С. 363–370.
8. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Тепловая и концентрационная конвекция Марангони вокруг пузырька воздуха в жидкости // Гидродинамика. – Вып. 14. – Пермь: ПГУ, 2004. – С. 88–99.
9. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Экспериментальное обнаружение концентрационно-капиллярного дрейфа пузырьков воздуха в неоднородных растворах жидкостей // Доклады РАН. – 2004. – Т. 399. – №4. – С. 490–493.
10. Конвективные автоколебания вблизи поверхности пузырька воздуха в горизонтальном прямоугольном канале / *Р.В. Бирих* [и др.] // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – №4. – С.30–38.
11. *Костарев К.Г., Писаревская Н.Н.* Экспериментальное изучение массообмена между каплей и раствором ПАВ // Конвективные течения. – Вып.2. – Пермь: ПГПУ, 2005. – С. 216–232.
12. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматлит, 1959. – 699 с.
13. От молекулы до человека /под ред. *Н.П. Наумова*. М.: Просвещение, 1973. – 480 с.
14. Справочник химика / под ред. *Б.П. Никольского*. – Т. 3. – Л.: Химия, 1962. – 1008 с.
15. Experimental study of Marangoni bubble migration in normal gravity / *Yu.K. Bratukhin* [et al.] // Int. J. Experiments in Fluids, 2005. – Vol. 38. – № 5. – P. 594–605.
16. *Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A.* Oscillatory Marangoni convection around the air bubble in a vertical surfactant stratification // J. Comptes Rendus Mecanique. – 2004. – Vol. 332. – № 1. – P.1–7.
17. *Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A.* Thermal and concentrational Marangoni convection at liquid/air bubble interface // ASME J. Applied Mech. – 2006. – Vol. 73. – № 1. – P. 66–71.
18. Oscillatory Marangoni convection around bubbles and drops in heterogeneous solutions of surfactants / *K.G. Kostarev* [et al.] // Int. J. Microgravity Science and Technology. – 2007. – Vol. 19. – № 2. – P. 12–17.
19. Physics of fluids in microgravity / ed. *R.Monti, Taylor & Francis*. – London – New York, 2001.
20. *Subramanian R.S., Balasubramaniam R.* The motion of bubbles and drops in reduced gravity. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 358 p.
21. *Raake D., Siekmann J., Chun C.-H.* Temperature and velocity fields due to surface tension driven flow // Experiments in Fluids. – 1989. – Vol. 7. – P. 164–172.
22. *Young N.O., Goldstein J.S., Block M.J.* The motion of bubbles in a vertical temperature gradient // J. Fluid Mech. – 1959. – № 6. – P. 350–356.