

УДК 532.62, 532.612.4, 532.22
PACS 47.10.ab, 83.10.Gr, 06.20.Jr, 47.55.P-pf, 47.32.C

Механизмы формирования вихревых структур на границе раздела жидкость-газ в присутствии адсорбционного слоя

А. И. Шмырова, А. В. Шмыров

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Ак. Королёва, 1
email: lutsik@icmm.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования по формированию неустойчивости однородного (вдоль поперечной потоку координате) течения, генерируемого точечным нагревом поверхности и локальным воздействием паров ацетона. Показано, что формирование вихрей на поверхности вызвано взаимодействием течения с адсорбированной на плоской межфазной границе раздела плёнкой поверхностно-активного вещества. Доказано, что малое значение поверхностной сдвиговой вязкости пленки является одним из определяющих условий для формирования вихрей. Показана возможность использования безразмерного параметра упругости для описания поведения системы в 3D геометрии. Предложен возможный механизм зарождения вихрей. Представлены результаты визуализации поверхностного течения при обтекании однородным потоком твердой сферы.

Ключевые слова: устойчивость течения; поверхностно-активное вещество; поверхностное натяжение; обтекание объектов ламинарным потоком.

Поступила в редакцию 25.04.2020; принята к опубликованию 12.05.2020

Mechanisms of formation vortex structures at the liquid-gas interface with an adsorption layer

A. I. Shmyrova, A. V. Shmyrov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
Acad. Korolev St. 1, 614013, Perm
email: lutsik@icmm.ru

Experimental results of a homogeneous (along the coordinate transverse to the stream) flow instability during the interaction with a film of surfactant adsorbed at the flat interface are presented. The flow was formed at a point-like heat by radiation and a source of surfactants (acetone drops). It is proved that a small value of the film shear viscosity is one of the requirements for the vortices formation process. The possibility to use the dimensionless parameter (the elasticity number) to describe the system behavior in 3D geometry is shown. A potential mechanism for the vortices origin is proposed. The results of the visualization of the water surface uniform flow around a solid sphere are presented.

Keywords: stability of the flow; surfactant; surface tension; object is streamlined by a homogeneous flux.

Received 25.04.2020; accepted 12.05.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-31-38

1. Введение

В настоящее время многофазные среды являются чрезвычайно популярным объектом научных исследований. Такие системы находят широкое применение в различных технологических процессах (производство эмульсий и пен), в химических и биохимических технологиях (контроль процессов эмульгирования и смачивания, повышение стабильности коллоидных сред и т.д.), в биологии и медицине. Несмотря на это их использование затруднено тем, что при наличии межфазной поверхности и молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) под действием адсорбционно-десорбционных процессов на границе раздела формируется мономолекулярная плёнка. Образующийся адсорбированный слой при этом обладает отличными от объемных реологическими характеристиками: поверхностной дилатационной и сдвиговой упругостью, поверхностной дилатационной и сдвиговой вязкостью [3]. При наличии в системе конвективных течений различной природы ситуация еще более усложняется, так как существует взаимно-обратная связь между полями скорости жидкости и концентрации ПАВ на межфазной границе. Последнее приводит к возникновению разнообразных эффектов, изучение которых, с одной стороны, связано с серьёзными трудностями, а с другой, открывает множество новых технологических возможностей.

Данная работа направлена на экспериментальное изучение условий возникновения вторичных движений жидкости в конвективных системах с границей раздела, содержащей адсорбированную плёнку поверхностно-активного вещества (ПАВ). Подобная плёнка формируется и удерживается в динамически равновесном состоянии благодаря поверхностным течениям, вызванным внешним набегающим потоком либо созданным перепадом поверхностного натяжения за счет градиента температуры или концентрации другого ПАВ [4–7].

Описание поведения жидкости в таких системах требует одновременного решения связанных уравнений для объемной и поверхностной фаз. Задача оказалась настолько сложной, что аналитические решения на данный момент получены лишь для частного случая плоской геометрии течения и нерастворимого сурфактанта [2, 6]. Численный эксперимент позволит внести ясность в природу неустойчивости однородного течения в области, занятой плёнкой ПАВ. Однако в большинстве моделей закладывается сохранение исходной (осевой) симметрии, в связи с чем при решении задачи течение также оказывается осесимметричным [1].

В большинстве экспериментов в области плёнки наблюдается установившийся режим течения с азимутальной периодичностью [4–7]. Последнее заставляет усомниться в правомерности общепри-

нятой практики – ограничиваться при численном исследовании подобных задач осесимметричной постановкой.

Ранее экспериментально было показано, что наличие связанного с поверхностью объема и сдвиговая подвижность границы раздела являются необходимыми условиями для развития гидродинамической неустойчивости [4, 7]. Её формирование обусловлено особенностями взаимодействия однородного (вдоль поперечной потоку координате) течения с адсорбированным на межфазной границе слоем ПАВ. В случае же тщательной очистки поверхности в системе наблюдалось устойчивое осесимметричное радиальное течение.

В известных экспериментальных работах генерация течения, как правило, организуется путем локализованной подачи слабого раствора спирта (этанола) на границу раздела из объемной или поверхностной фазы. Такой источник, сложный по своей природе, поскольку кроме гидродинамического механизма движение жидкости индуцируется за счет капиллярных сил. В работе [7] было показано, что отсутствие конвекции Марангони кардинально не влияет на структуры поверхностного течения. В экспериментах на границе раздела также наблюдались вихри в области занятой пленкой ПАВ. Объемное течение в работе [7] формировалось путем прокачивания через тонкий зазор между источником и поверхностью базовой жидкости (воды).

Изучение взаимодействия термокапиллярного течения с пленками нерастворимого ПАВ ранее проводилось в более простой постановке плоской геометрии [6]. Использование в экспериментах ячейки Хеле-Шоу приводит к блокированию вихревого движения поверхности и упрощению структур формирующегося течения. В исследовании для описания состояния поверхности был использован безразмерный параметр упругости $E = \Delta\sigma_T / \Delta\sigma_L$ (*elasticity number* в англоязычной литературе), введенный Хомси [2]. В задаче с концентрационной неоднородностью E примет вид: $E = \Delta\sigma_T / \Delta\sigma_C$. Данный параметр позволяет предсказать положение границы между чистой поверхностью и застойной зоной в зависимости от мощности источника и характеристик поверхностной фазы. В работах [6, 7] было показано, что для корректного описания системы кроме поверхностных сил необходимо также учитывать давление со стороны объемного течения. Представляется, что в случае 3D геометрии также существует возможность описать поведение системы, используя данный параметр.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию устойчивости радиального осесимметричного течения жидкости на плоской поверхности воды, генерируемого точечным нагревом границы раздела излучением и локальным воздействием паров ацетона. Использование такого рода источников позволяет избежать попа-

дания в систему случайных примесей, загрязняющих исследуемую поверхность. Варьирование сил, приводящих жидкость в движение, поможет подробнее изучить наблюдаемую неустойчивость в виде вихрей и приблизиться к пониманию природы ее возникновения.

Также в работе приведено описание экспериментальной установки, позволяющей визуализировать течения на поверхности газового или жидкого включения при движении объекта в среде, содержащей молекулы ПАВ. Данная задача вызывает большой интерес ввиду распространенности её в различных технологических процессах.

Технические сложности проведения натурального эксперимента по визуализации структур на поверхности пузырька газа и схожесть задачи с задачей о взаимодействии осесимметричного течения от точечного источника с плёнкой ПАВ на плоской поверхности позволяет перейти ко второй и, всесторонне изучив механизмы формирования вторичных структур на плоской поверхности, дать оценку критическим параметрам в первой.

2. Методика эксперимента

2.1. Исследование структур поверхностного и объёмного течений в системе с плоской границей раздела

Исследование устойчивости радиального осесимметричного течения жидкости на плоской поверхности воды от локализованных источников разного типа осуществлялось на установке, фото которой приведено на рис. 1. Эксперименты проводились в стеклянной ячейке 1, заполненной высокоочищенной водой. Для очистки воды использовался трехступенчатый фильтр Aquarhog с обратным осмосом, который позволяет удалить бактерии, вирусы, соли жесткости, нитраты, нитриты и механические примеси размером до 5 Å, и бидистиллятор с функцией деионизации Cydon. На выходе вода обладала удельной электропроводностью менее 0.1 мкСм/см при pH 5.6–6.0. Поскольку значение удельной электрической проводимости воды коррелирует с содержанием в ней примесей, то степень чистоты, используемой в эксперименте жидкости, можно оценивать по данной характеристике. Для справки, удельная электропроводность водопроводной воды составляет 3.6 мСм/см; дистиллированной – 63 мкСм/см [9].

Для визуализации поверхностного течения на границу раздела наносились частицы прокаленного талька, что исключало суммирование поверхностных структур со структурами, формирующимися в приповерхностной области. Для визуализации объёмного течения в систему добавлялись предварительно очищенные полые посеребрённые стеклянные сферы. Применение метода лазерного ножа позволяло проводить визуализа-

цию течения жидкости в вертикальной плоскости и в горизонтальных срезах, расположенных на различной глубине ячейки. Трековые снимки фиксировались видеокамерой 2, сопряженной с РС.

Термокапиллярный бестелесный источник (рис. 1, а) реализован путем точечного нагрева поверхности галогеновой лампы 3, излучение от которой фокусировалось на границе раздела жидкость/газ с помощью системы линз 4. Возможность одновременной съемки трековых снимков и визуализации температуры тепловизором является одной из главных преимуществ данного источника. Последнее позволяет по восстановленным термограммам оценить градиенты

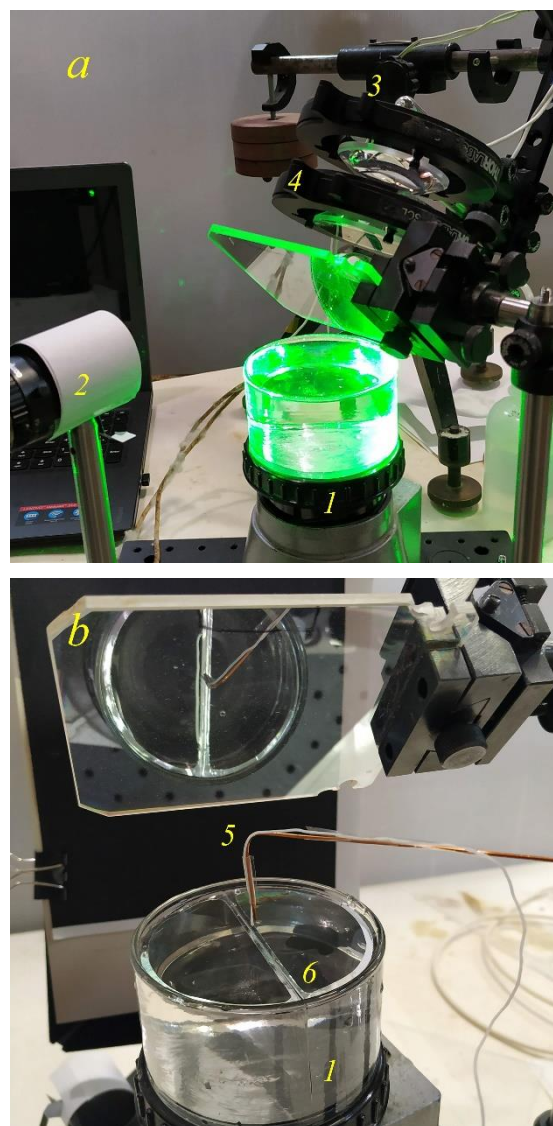


Рис. 1. Фото экспериментальной установки: а – точечный бестелесный источник тепла; б – бесконтактный источник ПАВ. 1 – рабочая ячейка, 2 – видеокамера, 3 – галогеновая лампа, 4 – система линз, 5 – подводящая трубка, 6 – разделяющая маска

температуры, формирующиеся на поверхности, и с высокой точностью рассчитать значения касательных напряжений, возникающих на границе раздела.

В экспериментах с бесконтактным источником ПАВ (рис. 1, *b*) течение генерировалось парами высоколетучего вещества с малым значением поверхностного натяжения – ацетоном. Для этого над поверхностью воды на конце тонкой трубки 5 подвешивалась капля. Испаряясь, пары ацетона локально понижают поверхностное натяжение, обуславливая развитие на границе раздела конвекции Марангони. Изменение объема капли при испарении компенсировалось с помощью шприцевого насоса путем подкачки ацетона через подводящую трубку 5.

Использование паров позволяет генерировать течение только силами поверхностной природы, чего, в свою очередь, не удастся достичь при использовании теплового источника. При нагреве жидкости кроме термокапиллярной конвекции в системе неизбежно формируется термогравитационное течение, которое также вносит свой вклад в движение поверхности.

Перед нанесением ПАВ и распылением талька поверхность жидкости очищалась с помощью аспиратора. После процедуры очистки на границу раздела с помощью дозирующей пипетки наносилось известное количество раствора олеиновой или стеариновой кислоты в гексане. Растекаясь, после испарения гексана молекулы нерастворимого в воде ПАВ создавали на поверхности пленку известной концентрации. Данные вещества на порядок отличаются друг от друга поверхностной сдвиговой вязкостью, что, в свою очередь, может также оказать влияние на формирование вихревых структур в области сжатой пленки [8]. Использование в некоторых экспериментах специальной разделительной маски 6 позволяло одновременно нанести на поверхность воды молекулы стеариновой и олеиновой кислот.

2.2. Визуализация течения вокруг обтекаемой ламинарным потоком твердой сферы

По нашему мнению, при наличии в системе молекул ПАВ вторичное вихревое течение должно наблюдаться не только на плоской поверхности, но и при более сложной геометрии, например, на поверхности движущихся в потоке пузырьков газа и капельных включений. Для доказательства данной гипотезы вторая часть исследования была посвящена разработке экспериментальной установки, позволяющей визуализировать течения на поверхности объекта, обтекаемого однородным потоком жидкости (рис. 2). В работе роль такого объекта выполняла твердая сфера 1 диаметром 3 мм, закрепленная на тонком капилляре 2 (диаметр ка-

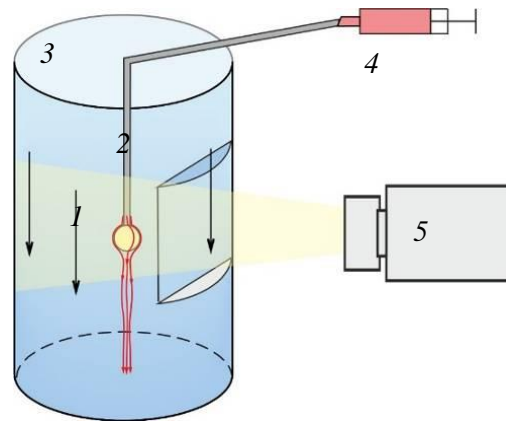


Рис. 2. Схема установки для визуализации течения вокруг обтекаемой ламинарным потоком твердой сферы: 1 – сфера, 2 – капилляр, 3 – внешний цилиндр, 4 – насос для подачи красителя, 5 – видеокамера

пилляра 0.8 мм). Конструкция помещалась в цилиндр 3 диаметром 30 мм, внутри которого организовывалось ламинарное течение жидкости.

Визуализация структур течения на поверхности сферы осуществлялась классическим методом подкрашивания струй. Для его реализации в капилляре по периметру вблизи сферы был сделан ряд отверстий, через которые во время эксперимента насосом 4 подавался водный раствор гексацианоферрата калия. Гексацианоферрат калия является интенсивным неорганическим красителем, который не проявляет поверхностно-активных свойств и при добавлении в воду не загрязняет фиксируемую поверхность. Формирующиеся струи фиксировались через стенку цилиндра 3 видеокамерой 5. Изменение скорости ламинарного течения в цилиндре позволяло варьировать число Рейнольдса.

3. Результаты

3.1. Структуры течения в системе с плоской границей раздела

Проведенные исследования показали, что в случае чистой поверхности независимо от природы источника в системе регистрировалось наблюдаемое ранее радиальное растекание жидкости [4, 6]. Устойчивость осесимметричного течения сохранялась при всех параметрах, реализуемых в эксперименте.

Эксперименты, проведенные с тепловым источником неоднородности, показали, что нанесение на границу раздела жирных кислот приводит к потере устойчивости радиального течения и формированию вихревых структур при любой заселенности межфазной поверхности молекулами ПАВ (рис. 3). При наличии адсорбированной пленки с концентрацией, меньше критической, на

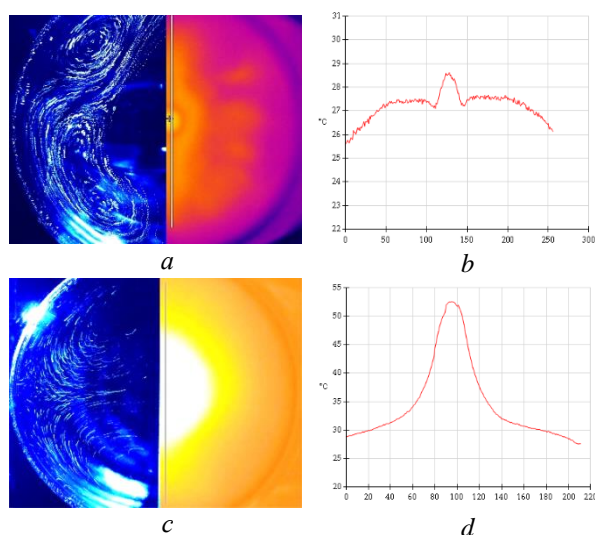


Рис. 3. Структуры поверхностного течения (a, c): левая часть снимка – трековая картина, правая – поле температуры, и термограммы (b, d), полученные при точечном нагреве поверхности: $E < 1$ (a, b), $E > 1$ (c, d)

границе раздела совместно с вихревым визуализировалось осесимметричное радиальное течение, которое локализовывалось вблизи теплового пятна (рис. 3, a левая часть снимка с трековыми структурами). В случае, когда концентрация пленки ПАВ превышала некоторое критическое значение, на поверхности наблюдалось только вихревое течение (рис. 3, c, левая часть снимка с трековыми структурами). При этом вихри на поверхности визуализировались только после развития достаточно интенсивного термогравитационного течения.

В экспериментах на слоях жидкости глубиной 1–3 мм было обнаружено, что в отсутствие развитого объемного течения, движение на поверхности не формируется.

Описанные сценарии поведения системы позволяют сделать вывод, что по характеру взаимодействия с пленками ПАВ тепловой источник аналогичен жидкости путем подачи раствора ПАВ или жидкости основы [4, 6]. Последнее достаточно очевидно, так как во всех экспериментах с источниками указанных типов под пленкой ПАВ независимо от природы сил, приводящих жидкость в движение, формируется интенсивное объемное течение.

Как уже отмечалось ранее, для механизмов, генерирующих течение, кроме источника тепловой неоднородности, определение касательных напряжений на границе раздела является достаточно сложной технической задачей. Использование тепловизора с одновременной съемкой трековых структур позволяет визуализировать поля темпера-

туры (рис. 3, a, c правая часть снимков) и сопоставлять их с линиями тока. Кроме того, из поля температуры по восстановленным термограммам (рис. 3, b, d) можно оценить градиенты температуры как в области сжатой пленки, так и в зоне с радиальным течением. Последнее дает возможность с высокой точностью рассчитать значения поверхностных сил и определить значение параметра E для каждого конкретного случая.

Используя параметры эксперимента, в работе была проведена оценка числа упругости. Расчеты показали, что в ситуации, когда на поверхности отсутствует радиальное течение, параметр E , равный $\Delta\sigma_r/\Delta\sigma_T$, имеет значение >1 . В случае, когда на границе раздела формируется радиальное течение, E принимает значение <1 . При этом если по перепаду температуры оценить поверхностное давление, оказываемое на пленку со стороны источника, и встречное ему давление, возникающее в пленке, то окажется, что эти величины всегда равны друг другу. Схожесть наблюдаемых структур поверхностного течения для различных источников позволяет утверждать, что условие возникновения внутренней зоны одинаково: $E < 1$.

При исследовании устойчивости поверхностного течения, генерируемого бесконтактным источником ПАВ, было обнаружено, что в случае, когда в системе отсутствует радиальное течение на поверхности ($E > 1$), движение на границе раздела, занятой пленкой ПАВ, равно как и в объеме, не наблюдается. Во всех остальных ситуациях ($E < 1$) структура течения была аналогична той, что фиксировалась ранее в экспериментах с источниками другого типа.

Последнее вместе с результатом, полученным на тонких слоях жидкости для теплового источника, еще раз доказывает тот факт, что в случае, когда на поверхности не открывается область с радиальным течением, движение жидкости в объеме является единственным механизмом, приводящим к развитию гидродинамической неустойчивости. Трековые снимки течения горизонтальных срезов, полученные путем перемещения лазерного ножа вдоль вертикальной координаты, и вертикальных плоскостей, полученные путем поворота лазерного ножа на 90° , позволяют полностью восстановить структуру объемного (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в приповерхностной области (глубина погружения лазерного ножа составляла доли миллиметра) радиальное течение, затекая под застойную зону, теряет азимутальную однородность. Потеря осевой симметрии течения приводит к формированию струй, распадающихся у стенки кюветы на пары согласованных вихрей. Вихревые пары довольно быстро затухают с глубиной и на расстоянии от 3 до 5 мм от поверхности сменяются возвратным радиальным течением, направленным к центру ячейки.

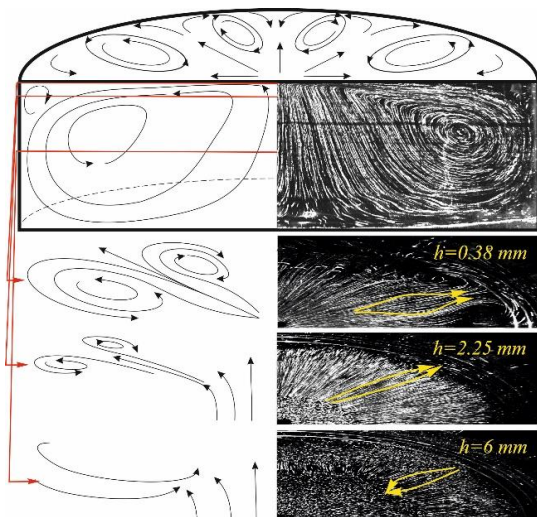


Рис. 4. Структура объемного течения

Вихри, по всей видимости, и приводят в движение плёнку ПАВ. Таким образом, можно предположить, что системе энергетически выгоднее задействовать вращательную степень свободы поверхности, чем сохранить осевую симметрию течения.

Объемное же течение в целом имеет форму сложного тора. Центр его вращения смещен к периферии кюветы и расположен под поверхностными вихрями. Структура течения также зависела от азимутального угла съемки. Когда луч был направлен вдоль встречных поверхностных потоков (область, где радиальное течение встречается с возвратным течением от формирующих вихри струй), в объеме под пленкой ПАВ фиксируется слабый контр вихрь. Формирование такого вихря позволяет системе согласовать обратное вдоль радиуса движение в пленке с дивергентным объемным течением.

Наиболее интересными в данной работе являются результаты исследования взаимодействия основного течения с пленками ПАВ, имеющими различные реологические свойства. В экспериментах, проведенных со стеариновой кислотой, было обнаружено, что при некотором значении поверхностной концентрации ПАВ даже при наличии радиального течения в центре рабочей поверхности вихревое движение в области сжатой пленки не наблюдалось.

Для проверки результата и исключения ошибки в проведении эксперимента в работе были реализованы опыты с использованием специальной маски. Маска позволяла наносить на поверхность, разделенную на две половины, молекулы стеариновой и олеиновой кислоты одновременно. В такой постановке эксперимента можно гарантировать, что остальные параметры: степень чистоты

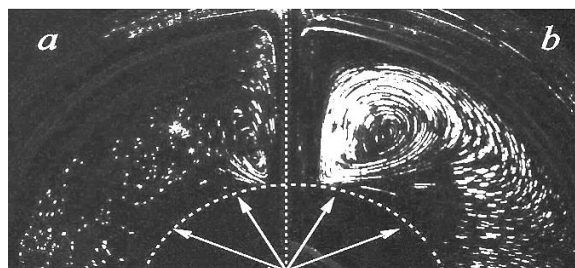


Рис. 5: Структуры поверхностного течения, полученные в экспериментах с бесконтактным источником ПАВ в присутствии на границе раздела пленок стеариновой (а) и олеиновой (б) кислоты (время съемки 4 с)

системы и давление на пленку со стороны источника, одинаковы для обеих пленок ПАВ. Структуры течения, визуализируемые на границе раздела в пленке стеариновой кислоты, представлены на рис. 5, а, олеиновой – на рис. 5, б. Из рисунка видно, что отличающиеся по сдвиговой вязкости на порядок плёнки при одинаковой степени сжатия по-разному реагируют на внешнее воздействие.

Течение, зародившееся справа в области более подвижной пленки олеиновой кислоты (рис. 5, б), интенсивнее течения, визуализируемого в пленке стеариновой. Зарождение небольшого вихря на рис. 5, а можно объяснить тем, что на твердой стенке маски в жидкости должно выполняться условие прилипания. Последнее приводит к изменению радиальной скорости по азимуту и формированию сдвигового течения.

Из представленных результатов исследования можно сделать вывод, что реологические свойства адсорбционного слоя также оказывают влияние на динамику формирования и структуру поверхностного течения.

3.2. Структуры течения на поверхности сферы

Результаты второй части работы, посвященной визуализации течения вокруг обтекаемой ламинарным потоком твердой сферы, представлены на рис. 6.

На рис. 6, а приведен снимок ползущего течения ($Re < 5$). Все струи на поверхности сферы хорошо визуализируются, а в области за сферой вниз по потоку отсутствует присоединенный вихрь. Видно, что ширина окрашенной струи варьируется в зависимости от скорости, что позволяет оценить её изменение относительно окружающего потока.

При росте числа Рейнольдса (рис. 6, б, в) вниз по потоку за сферой наблюдается формирование присоединенного вихря. При этом течение на поверхности сферы теряет симметрию.

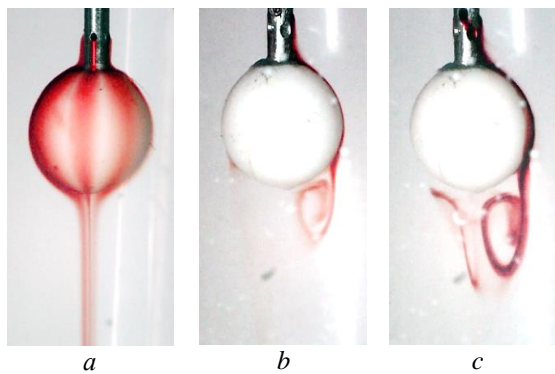


Рис. 6. Структуры течения, визуализируемые на поверхности твердой сферы, обтекаемой ламинарным потоком при числах Рейнольдса: $Re < 5$ (a), $Re \sim 100$ (b, c)

Потеря симметрии связана со способом организации объемного течения, поскольку движение жидкости в эксперименте генерировалось прокачкой воды за счет перепада давления. В дальнейшем в работе планируется изменить конструкцию экспериментальной установки. Обтекание газового пузырька или капли другой жидкости будет осуществляться путем равномерного перемещения цилиндра с раствором ПАВ, как целого. При этом исследуемый объект будет расположен на неподвижном капилляре, скользящем вдоль оси цилиндра.

Эксперименты по визуализации структур течения на поверхности сферы позволяют подобрать оптимальные скорости основного потока, форму и число отверстий в капилляре для подачи красителя, формирующего струи, его концентрацию и скорость впрыска.

4. Заключение

Таким образом, в заключение можно вынести следующие утверждения. Проведенные в работе экспериментальные исследования по взаимодействию радиального осесимметричного течения жидкости на плоской поверхности воды от точечного бестелесного источника тепла и бесконтактного источника ПАВ с пленками олеиновой и стеариновой кислоты позволили обнаружить ряд эффектов, которые невозможно получить при использовании источников другого типа.

Эксперименты с тепловым источником неоднородности показали, что вихревое течение на границе раздела при больших поверхностных концентрациях в пленке ПАВ наблюдается только после зарождения развитого объемного термогравитационного течения. Использование тепловизора, фиксирующего поле температуры на границе раздела, позволило наглядно продемонстрировать равенство касательных сил, возникающих на границе раздела. Показана возможность применения без-

размерного параметра $E = \Delta\sigma_r / \Delta\sigma_T$ (elasticity number), введенного в двумерной задаче, для описания поведения поверхностной фазы в системе с 3D геометрией.

Исследование структуры течения вблизи капли ацетона показало, что в случае, когда под пленкой ПАВ отсутствует объемное течение, движение на границе раздела, занятой пленкой ПАВ, не формируется.

Эксперименты с веществами, имеющими различную сдвиговую вязкость, еще раз доказали, что реологические свойства поверхности являются одними из основных параметров, определяющих условие формирования вихрей в сжатой пленке.

Возможность менять ориентацию и положение лазерного ножа относительно рабочей полости позволила восстановить структуру объемного течения и предложить возможный механизм зарождения вихрей.

Работа по визуализации структур течения на поверхности сферы показала, что метод добавления красителя является в данной задаче наиболее оптимальным. В отличие от часто используемого метода лазерного ножа с добавлением трассеров данный метод позволяет не только зафиксировать структуры течения в узком слое вблизи поверхности сложной геометрии, но и дает возможность определить скорость потока вдоль неё. Дальнейшая работа будет посвящена разработке установки натуральных экспериментов по визуализации поверхностного течения на пузырьках газа и каплях, обтекаемых раствором ПАВ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-71-00097

Список литературы

1. *Bickel T. et al.* Hydrodynamic response of a surfactant-laden interface to a radial flow // *Phys. Rev. Fluids*. 2019. Vol. 4, 124002. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.124002.
2. *Carpenter B., Homsy G. M.* The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot. Part 2. Partially contaminated interfaces // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 155. P. 429–439. DOI: 10.1017/S0022112085001884
3. *Manikantan H., Squires T. M.* Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows // *J. Fluid Mech.* 2020. Vol. 892, P1. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.170>
4. *Mizev A., Shmyrova A.* Effect of an insoluble surfactant film on the stability of the concentration-driven Marangoni flow // *J. Fluid Dyn.* 2014. Vol. 49. N. 1. P. 26–36. DOI: 10.1134/S0015462814010050.
5. *Roché M., et al.* Marangoni flow of soluble amphiphiles // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 112, 208302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.208302

6. Shmyrov A. V., Mizev A. I., Demin V. A., Petukhov M. I., Bratsun D. A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow // *J. Fluid Mech.* 2019. Vol. 877. pp. 495–533. DOI: 10.1017/jfm.2019.613
7. Shmyrova A., Shmyrov A. Instability of a homogeneous flow from a lumped source in the presence of special boundary conditions on a free surface // *EPJ Web of Conferences.* 2019. Vol. 213, 02074. DOI: 10.1051/epjconf/201921302074
8. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. Л.: Химия, 1981. 304 с.
9. Воробьева Л. Б. Электропроводность образцов питьевой воды разной степени чистоты // Сборник материалов VIII Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь». 2012. Вып. 5. Т. 1. С. 57–61.
3. Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows. *J. Fluid Mech.*, 2020, vol. 892, P1. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.170>
4. Mizev A., Shmyrova A. Effect of an insoluble surfactant film on the stability of the concentration-driven Marangoni flow. *J. Fluid Dyn.*, 2014, vol. 49, no. 1, pp. 26–36. DOI: 10.1134/S0015462814010050.
5. Roché M., et.al. Marangoni flow of soluble amphiphiles. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 112, 208302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.208302
6. Shmyrova A., Shmyrov A. Instability of a homogeneous flow from a lumped source in the presence of special boundary conditions on a free surface. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 213, 02074. DOI: 10.1051/epjconf/201921302074.
7. Shmyrov A. V., Mizev A. I., Demin V. A., Petukhov M. I., Bratsun D. A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow. *J. Fluid Mech.*, 2019, vol. 877, pp. 495–533. DOI: 10.1017/jfm.2019.613
8. Abramzon A. A. *Surfactants: Properties and application.* Leningrad: Chemistry, 1981. 304 p. (in Russian).
9. Vorobyova L. B. Electrical conductivity of drinking water samples of different purity levels. *Materials of the VIII International scientific Congress and exhibition “Interexpo geo-Siberia”*, 2012, iss. 5, vol. 1, pp. 57–61 (in Russian).

References

1. Bickel T. et.al. Hydrodynamic response of a surfactant-laden interface to a radial flow. *Phys. Rev. Fluids*, 2019, vol. 4, 124002. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.124002.
2. Carpenter B., Homsy G. M. The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot. Part 2. Partially contaminated interfaces *J. Fluid Mech.*, 1986, vol. 155, pp. 429–439. DOI: 10.1017/S0022112085001884

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Шмырова А.И., Шмыров А.В. Механизмы формирования вихревых структур на границе раздела жидкость-газ в присутствии адсорбционного слоя // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 31–38. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-31-38

Please cite this article in English as:

Shmyrova A.I., Shmyrov A.V. Mechanisms of formation vortex structures at the liquid-gas interface with an adsorption layer. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, vol. 3. pp. 31–38. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-31-38