

## Пленочные испаляторы

А.В.Старцев, Ю.Ю.Стойлов

*В новых физических объектах – испаляторах на основе свободных мыльных пленок – в открытых и закрытых объемах в воздухе с добавкой газов типа  $C_8F_{18}$  ( $p = 20$  Тор) при перепадах температур на пленках в десятые и сотые доли кельвина наблюдаются непрекращающиеся потоки мыльного раствора, непрерывно двигающиеся со скоростью 5–20 см/с. Впервые обнаружено, что участки наклонной пленки испалятора при нагреве ведут себя аномальным образом – их вес увеличивается и они двигаются по пленке вниз, а ненагретые, холодные, – вверх. На круговых пленках в закрытых объемах при их наружном равномерном охлаждении испаряющейся водой в течение 5–10 ч идут непрерывные радиально-вихревые потоки с образованием и замыканием участков тонкой черной пленки. Быстрые потоки делают пленочные испаляторы эффективными переносчиками тепла, работающими при весьма малом перепаде температур (десятые и сотые доли кельвина) и по переносимой энергии превосходящими медь. Обсуждаются перспективы дальнейшего исследования и использования пленочных испаляторов для регистрации тепловых полей и лазерного излучения.*

**Ключевые слова:** испалятор, фторуглерод, мыльная пленка, самоорганизация, поверхностное натяжение, фазовые переходы, гидродинамика, теплопроводность, зарождение жизни.

Испаляторы [1–3] (от слов испаритель и осциллятор) – это разнообразные устройства, демонстрирующие особенности воздействия газов на поверхностное натяжение жидкостей. Как показано в [1–3], контакт многих жидкостей с газами, например фторуглеродными (при давлении 10–100 Тор), приводит к тому, что на их поверхностях при испарении возникают постоянные колебания или вращения вещества со скоростью 1–3 см/с. Испаляторы, как и лазеры, относятся к интересному классу самоорганизующихся систем с неравновесными фазовыми переходами, в которых колебательные состояния являются энергетически более устойчивыми и имеют определенные пороговые условия их появления. Но к работающему испалятору не надо специально подводить энергию, он естественно самовозбуждается при испарении.

Открытие испаляторов показывает, что параметры жидкостей, считавшиеся до этого медленно меняющимися (типа поверхностного натяжения, смачивания, несмачивания) и не зависящими от вида и давления инертных газов над ними, при наличии поверхностно-активных комплексов (ПАК) из молекул жидкости и газа могут меняться в разных участках одного сосуда за доли микросекунды без особых энергетических затрат. Это открывает новые области исследований и практических применений для физики, химии, синергетики, которые можно было бы назвать гидродинамикой открытых систем с ПАК, или ПАК-гидродинамикой.

С физической точки зрения испаляторы являются новыми самоорганизующимися системами, поэтому представляет интерес расширить их класс и исследовать меха-

низм их постоянного движения. В испаляторах эксперимент опережает теорию, позволяя удобно изучать свойства таких нестабильных межмолекулярных комплексов, которые пока не поддаются теоретическому описанию или расчету. Это простые открытые системы, в которых нет термического равновесия, а есть спонтанно возникающие и самоподдерживающиеся колебательные состояния потоков жидкости, где за счет изменения сил ван-дер-ваальсова взаимодействия нестабильных комплексов из молекул жидкости и газа происходит последовательное переключение режимов смачивания и несмачивания. Они представляют собой наглядную модель для изучения квантовомеханических особенностей слабых межмолекулярных взаимодействий и явлений двумерной межфазной физики [3].

Целью настоящей работы было создание испаляторов на основе свободных тонких слоев жидкости, в которых возникающие потоки не испытывали бы сильного торможения из-за вязкого взаимодействия с нижележащими покоящимися слоями жидкости.

Для создания пленочных испаляторов необходимы растворы, способные образовывать устойчивые тонкие пленки типа мыльных пузырей, которые не рвались бы сразу при контакте с фторуглеродными жидкостями и парами, но при этом реагировали бы на их присутствие. В то же время известно, что фтористые соединения с очень малым поверхностным натяжением ( $\sim 10$ – $15$  дин/см) как раз и являются самыми эффективными пеногасителями [4].

Водные растворы обычного кускового мыла [3] или поверхностно-активных веществ типа Triton X-305, SDS слабо реагируют на пары фторуглеродов, поэтому для первых опытов был выбран более чувствительный к фтористым соединениям водный раствор жидкого мыла «Бинго» с глицерином (фирмы Hayat Chemical Industry)

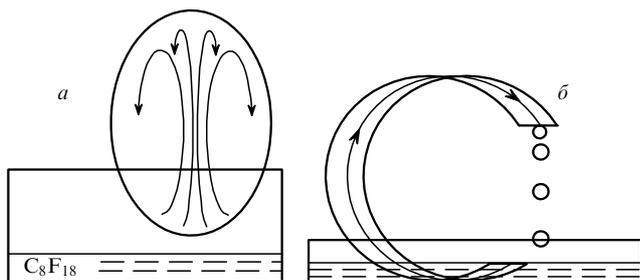


Рис.1. Схема движения потоков на пленочных испалаторах.

для мытья посуды. Прочность пленок этого раствора, как мы обнаружили, значительно увеличивается при добавлении небольшого количества дибутилфталата (ДБФ).

При обычном погружении в раствор рамки диаметром 5 см на ней создается пленка. Затем на воздухе рамка с пленкой боком опускается в открытый стакан, на дне которого находится слой жидкого и химически абсолютно инертного фторуглерода перфтороктана  $C_8F_{18}$ . При расстоянии 1–2 см от уровня  $C_8F_{18}$  на пленке возникают потоки раствора, движущиеся снизу вверх со скоростью до 5–10 см/с в виде интенсивного двумерного фонтана с образованием в верхней части пленки мелких капель, которые под действием своего веса снова по пленке возвращаются вниз рамки (рис.1,а). Интенсивность потоков увеличивается при дальнейшем опускании пленки и ее касании слоя  $C_8F_{18}$ . Потоки заметны из-за движущихся неровностей поверхности, капель, свилей, при прохождении через которые луч света отклоняется примерно на  $1^\circ$ .

Механизм движения жидкости, подробно рассмотренный в [3], связан с изменением ее натяжения при контакте с парами фторуглеродов и с их неравномерным распределением по высоте. Постоянное движение быстрых потоков вещества на пленочном испалаторе продолжается десятки минут, до тех пор, пока пленка не рвется. В этом опыте пленочный испалатор работает как наглядный и чувствительный индикатор наличия паров  $C_8F_{18}$  в стакане, обнаружить которые другим способом весьма сложно.

В мелкой чашке (высотой 5 мм) на воздухе этот же мыльный раствор, налитый на поверхность  $C_8F_{18}$  (часть поверхности  $C_8F_{18}$  при этом не покрыта раствором), при опускании в него рамки с пленкой тоже быстро (со скоростью 10–20 см/с) поднимается по ней вверх. Если рам-

ка имеет вид прямоугольной полоски шириной 1 см и длиной около 8 см, согнутой в виде буквы С (диаметром около 4 см), то поднявшийся раствор собирается на верхнем свисающем конце рамки и капает вниз (рис.1,б). Оцененное капельным методом [3] с погрешностью  $\pm 3\%$  поверхностное натяжение этого мыльного раствора при комнатной температуре на воздухе составляет 25 дин/см, а в бутылке с воздухом и насыщенными парами  $C_8F_{18}$  – 20 дин/см.

Потоки вещества на пленочном испалаторе идут так же, как и в так называемом мыльном мосте (туннеле), где под действием своего веса мыльная пленка общей площадью до  $100\text{ м}^2$  потоком бежит по рамке сверху вниз [5, 6]. Отличие состоит в том, что в испалаторе мыльная пленка, преодолевая свой вес, бежит по рамке вверх. В этом опыте пленочный испалатор работает как необычная помпа для подъема и перекачки раствора на высоту нескольких сантиметров со скоростью около  $0.5\text{ см}^3/\text{мин}$ .

Если на воздухе рамку диаметром 10–40 см с пленкой опустить краем в  $C_8F_{18}$  и установить горизонтально, то быстрые потоки на испаряющейся цветной пленке при своем хаотическом движении меняют ее толщину и цвет и в отраженном свете на несколько минут превращают пленку в необычное живое абстрактное полотно с яркими сочными красками и постоянно изменяющимися оригинальными фигурами (рис.2).

По нашему мнению, это открывает перспективу применения пленочных испалаторов для серийного производства уникальных, создаваемых природой на наших глазах разнообразных рисунков, образцов для филигранных украшений и высококачественных художественных произведений практически любых размеров (1–100 см) с полной гаммой гармонично сочетающихся цветов и с детальной проработкой мельчайших (микронных) динамических узоров.

Поскольку условия в воздухе постоянно меняются, а также присутствуют неконтролируемые воздушные потоки, испарение воды и  $C_8F_{18}$ , мы для воспроизводимости некоторых опытов с пленками проводим в закрытых объемах. Для этого в обычную прозрачную пластиковую или стеклянную бутылку диаметром 6–16 см с плотной пробкой и небольшой перетяжкой (уменьшением диаметра) по высоте заливается  $50\text{--}100\text{ см}^3$  мыльного раствора и несколько граммов  $C_8F_{18}$ . При взбалтывании раствора жидкий  $C_8F_{18}$  образует на дне бутылки беловатый слой из мелких (диаметром 0.1–0.01 мм) неслипающихся

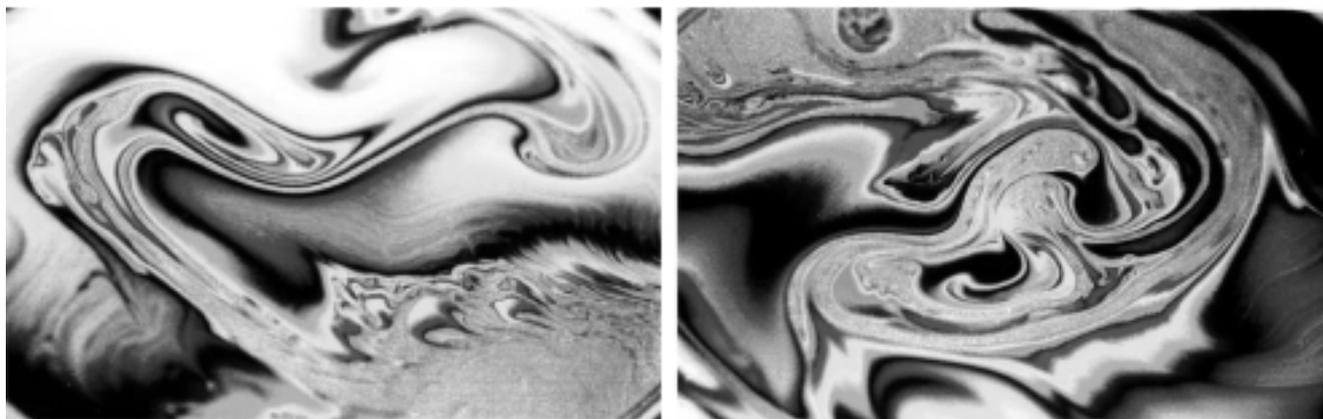


Рис.2. Типичные многоцветные картины в отраженном свете горизонтально расположенного в воздушной среде пленочного испалатора (диаметром 40 см) с интенсивными потоками.

шариков. При наклоне и круговом движении бутылки, как при ополаскивании, после нескольких попыток удается создать внутри (обычно на уровне перетяжки) одну сплошную мыльную пленку, которая в зависимости от состава мыльного раствора и наклона пленки в закрытом объеме может существовать часами. Такие пленки можно создавать многократно, что удобно при проведении серии опытов в одинаковых условиях.

Наклонная пленка в закрытом объеме, как и обычные мыльные пленки, при наблюдении в отраженном белом свете из-за стекания с нее раствора за минуты из толстой бесцветной становится более тонкой цветной, с 5–10 яркими горизонтальными интерференционными полосами. По цвету полос можно судить о толщине пленки [7], увеличивающейся к ее основанию. Постепенно пленка становится тоньше, полосы расширяются, их число уменьшается до 1–2 и сверху появляется обычная тонкая черная зона [8–10] с четкой границей. Черной она называется потому, что ее толщина заметно меньше длины волны света, и из-за малого отражения (менее 0.1–0.2 %) при наблюдении в отраженном свете пленка выглядит черной. Черная зона постепенно расширяется почти на всю площадь, и пленка рвется. Отличие наших пленок от обычных заключается в их повышенной прочности, высокой контрастности и яркости наблюдаемых на них полос, а также в снижении поверхностного натяжения пленок в парах  $C_8F_{18}$ .

При нагревании пленки с одной стороны через стенку светом лампы, дыханием или рукой (или при охлаждении льдом) влияние паров  $C_8F_{18}$  проявляется в явно аномальном поведении участков пленки. Слегка нагретый участок наклонной пленки неожиданно быстро (со скоростью 5–20 см/с) устремляется вниз (!), а холодный с такой же скоростью идет по пленке вверх. Таким образом, при нагреве с одной стороны на всей пленке образуется быстрый постоянный круговой поток, который приводит к замене ранее установившихся форм горизонтальных интерференционных полос на S-образные, к замедлению появления черной зоны и заметному увеличению времени жизни пленки. Без паров  $C_8F_{18}$  пленки из такого же раствора ведут себя вполне нормально: нагретый участок со скоростью 0.5–1.0 см/с идет вверх, а холодный – вниз. При некотором малом давлении в объеме паров  $C_8F_{18}$  пленка может вообще не реагировать на нагрев или холод.

Аномальное поведение пленки объясняется особенностями ее взаимодействия с парами  $C_8F_{18}$ . Было замечено, что когда на воздухе к наклонной пленке сверху подносится ватка, смоченная  $C_8F_{18}$ , то пары  $C_8F_{18}$ , падая на пленку, приводят к ее локальному расширению, утоньшению, и тонкий участок из-за своей легкости, как воздушный шарик, стремится по пленке вверх. Наблюдаемое обратное вращение пленки в парах  $C_8F_{18}$  показывает, что нагретый на 0.1–10 К участок пленки теряет с поверхности часть молекул  $C_8F_{18}$  (на нем быстрее распадаются и меньше живут комплексы [3]), поверхностное натяжение на нем возрастает, стягивающаяся жидкость увеличивает толщину и вес участка, и он по пленке быстро идет вниз. А на холодной пленке натяжение меньше, толщина меньше, и участок идет вверх.

Таким образом, быстрое круговое движение пленочного испалатора в закрытом объеме связано с особенностями взаимодействия молекул  $C_8F_{18}$  с нагретыми и холодными поверхностями этих пленок, что обуславливает

аномальную зависимость натяжения от температуры. Прочные пленки выдерживают несколько минут без разрыва более высокие перепады температур на своих краях (вплоть до 30–40 К) и вращаются со скоростью около 1 м/с. Без охлаждения наклонная пленка за минуты становится цветной, и на ней наблюдаются медленные красочные потоки, созданные малейшими (сотые доли кельвина) случайными разностями температур стенок. Поднесение ладони к бутылке на расстоянии 10 см уже через 10–20 с меняет направления и скорость движения этих потоков на пленке.

Высокую температурную чувствительность пленки можно использовать для регистрации или индикации лазерного излучения при ее локальном нагреве. Такой нагрев приводит к изменению цвета пленки испалатора, что позволяет использовать лазер для кратковременной записи информации или для целенаправленной доработки получаемых картин. Пленочные испалаторы с их потоками и изменением цвета от малейших температурных градиентов (порядка тысячных долей кельвина) можно использовать как дешевые обширные (до 1–2 м в диаметре) двумерные температурные датчики для регистрации и индикации неравномерных тепловых полей, возникающих, например, на сложных и дорогостоящих интегральных полупроводниковых схемах в процессе их апробации и «выжигания».

Аномальное температурное поведение, при котором натяжение увеличивается с ростом температуры, сравнительно часто наблюдается на границе жидкость–жидкость [11], но для поверхности жидкость–газ оно, как мы полагаем, впервые обнаружено в настоящей работе. Именно из-за аномальной зависимости натяжения от температуры образующийся на стенках холодный конденсат вытягивается на более теплую пленку и увеличивает время ее жизни. Ниже мы еще вернемся к обсуждению особенностей этого движения, а пока опишем результаты следующей серии опытов с горизонтально расположенными пленками испалаторов в закрытых объемах.

Горизонтальная или слегка выпуклая (высотой 0.5–1 см) пленка в бутылке также реагирует на нагрев или охлаждение своих краев. Ее кольцевые интерференционные полосы подтягиваются к нагреваемому участку и отступают от охлаждаемого. Поскольку к охлаждаемому месту раствор возвращается по утолщению (ребру) пленки у стенки, то такое движение может происходить и в невесомости. В качестве наружного охладителя можно использовать испаряющуюся воду на ватке или полоске ткани в контакте со стенкой. Мы полагали, что одинаково охлаждать все края пленки нет смысла, поскольку при равномерном и одновременном охлаждении пленки со всех сторон каких-либо движений или смещений на ней ожидать нельзя.

Однако такой опыт с охлаждаемой по краям пленкой испалатора все-таки был проведен и дал весьма неожиданные результаты. На выпуклой пленке, на которой уже появились интерференционные кольца, при ее наружном равномерном охлаждении возникают и устремляются от краев в центр быстрые многоцветные вихревые потоки, по форме похожие на струи жидкости при двумерном кипении. Эти струи меняют свое направление и обходят более медленные и менее цветные, возвращающиеся к стенке потоки. Всю картину можно сравнить с пляской разноцветных вихревых и тянущихся к центру языков

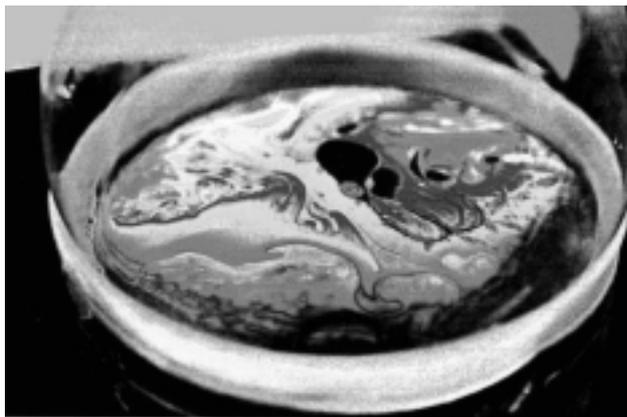


Рис.3. Вид горизонтально расположенного испарителя с тонкой пленкой (диаметром 6 см) в отраженном свете в закрытом объеме при охлаждении ее краев полоской ткани с испаряющейся водой.

пламени горящего кольцевого костра или с ожившей холмогской росписью. Постепенно, за десятки минут, пленка становится толще, цвета исчезают, но потоки со свилами на ней не прекращаются.

При наружном охлаждении постоянное бурное движение на пленке со скоростью 10–20 см/с продолжается в закрытом объеме 5–10 ч вплоть до разрыва. Перед разрывом на пленке снова появляются цветные потоки, в центре возникает медленно разрастающееся пятно в виде пляшущего в потоках черного участка (рис.3), и пленка рвется. Если же до разрыва наклонить бутылку и чуть обмыть края пленки находящимся в ней раствором, то черная область на горизонтальной пленке за 10–20 мин замывается потоками и пленка продолжает жить много часов.

Наличие потоков заметно (на порядок) увеличивает время жизни пленки, но не делает ее вечной. Разогрев части бутылки ниже пленки теплой водой или руками резко (почти на порядок) увеличивает скорость движения потоков на пленке, разогрев же верхней части бутылки на скорость потоков практически не влияет. На вогнутой пленке таких постоянных радиальных вихревых потоков при охлаждении нет (они заметны при нагреве краев), поскольку в центре ее сразу собираются капли раствора, которые падают вниз и пленка быстро (за минуты) рвется. Картина потоков на пленочном испарителе малочувствительна к температуре в комнате и практически одинакова при всех комнатных температурах (в пределах 5–35 °C) и влажности окружающего воздуха ниже 98 %.

После описанных экспериментов стало понятно, что центральная часть пленки из-за ее контакта с газовой средой в объеме имеет чуть более высокую температуру, чем края, температура которых на доли кельвина или на кельвин ниже, что и приводит к непрекращающимся бурным потокам. Скорость движения потоков увеличивается с ростом выпуклости пленки, когда легкие участки быстрее поднимаются вверх, а тяжелые быстрее опускаются вниз. Скорость потоков замедляется с уменьшением толщины пленки, когда она становится цветной, и на черной пленке потоков практически нет.

Появляющееся на пленке меняющее форму черное пятно на бесцветном фоне имеет четкие, резко выраженные и бликующие в отраженном свете границы (границы шириной около 0.1 мм). Черная зона мыльных пленок давно привлекает внимание исследователей и подробно изучается в стационарных условиях [8–10]. В испарителе

рах же есть возможность следить за поведением черного пятна в условиях его сильного возмущения при постоянных деформациях набегающими потоками. Оно легко меняет свою форму, расходуется на части, как двумерный пузырь или капли с тянущимися за ними длинными тонкими хвостами, которые затем рвутся, стягиваются, снова расходятся и быстро соединяются (рис.3). Сверхмалый поперечный размер хвостов (менее 0.1 мм) свидетельствует о незначительной разности поверхностных натяжений черного пятна и толстой пленки. Размер черного пятна на пленке может уменьшаться не только описанными потоками, но и при механическом воздействии. Для этого нужно сначала омыть края пленки раствором и затем сильно потрясти бутылку с пленкой в горизонтальной плоскости, разгоняя скопившуюся у краев жидкость по пленке.

Живые и грациозные движения черного пятна в набегающих и отходящих радиальных потоках напоминают движения медузы или ската и не менее привлекательны, чем описанная выше картина пляшущих цветных языков. Если языки во время движения появляются и исчезают, меняют место своего отхода от стенки, очертания, цвет и площадь, то черное пятно при всех бурных изменениях своей формы, движениях и разделениях на части не склонно менять цвет или площадь.

Находясь в окружении толстой, хорошо отражающей свет пленки, тонкое черное пятно ведет себя как живое существо, борющееся в потоках жизни за свое существование. Попадающие на черную область мелкие участки толстой пленки за секунды принимают круглую форму. На присутствие в объеме паров  $C_8F_{18}$  черное пятно практически не реагирует, и по отдельным пылинкам можно видеть, как при нагреве его края на наклонной пленке теплая область медленно (1 см/с) идет вверх, а не быстро вниз, как у толстой пленки.

Движущиеся по пленке потоки вещества переносят тепловую энергию, и оценка такого теплопереноса представляет интерес. Не проводя подробных калориметрических измерений, мы оценили теплопроводность пленки следующим простым способом. В серии опытов закрытая бутылка со смоченным водой наружным охладителем (полоска ткани) помещалась на весы, и при одинаковых внешних условиях в течение нескольких десятков ми-

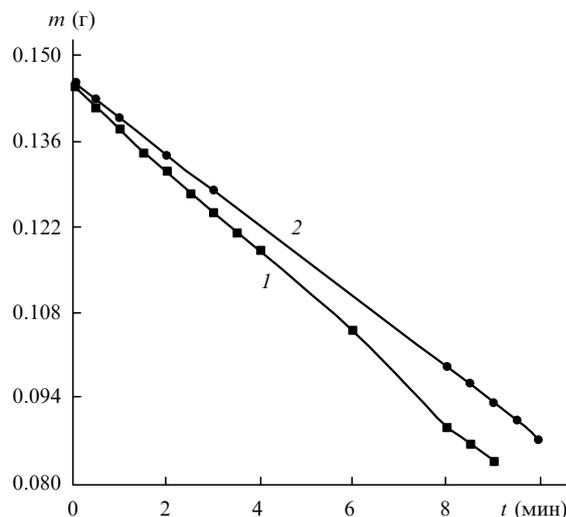


Рис.4. Испарение воды из охладителя при наличии рядом с ним пленки испарителя (1) и без нее (2).

нут регистрировалась скорость уменьшения веса бутылки, т.е. испарения воды из охладителя, в двух случаях: когда в бутылке на уровне охладителя находилась пленка испаятора и когда такой пленки не было. Увеличение объема испаренной воды при наличии пленки испаятора на  $10 \pm 1\%$  (рис.4) позволило оценить требуемую для этого среднюю мощность (около 20 мВт) и количество тепла, подводимого за фиксированное время пленкой из бутылки к охладителю.

Считая (с некоторым запасом), что разница температур между центром пленки и ее краем составляет 1 К (реально она меньше), а толщина пленки (тоже с запасом) равна 10 мкм, мы получаем, что по переносу тепла пленка в несколько раз превышает теплопроводность образца меди таких же размеров. При этом не учитывается, что центральная часть пленки и воздух в бутылке могут иметь разные температуры (см. ниже) и что есть перепад температур на стенке бутылки и на неподвижном жидком утолщении (ребре) пленки в месте ее контакта со стенкой. С учетом этих поправок реальный перенос тепла может оказаться заметно выше.

Таким образом, пленочный испаятор является новым эффективным переносчиком тепла, работающим при весьма малом (доли кельвина) перепаде температур, аналогичным тепловым трубам, только использующим необычную газо-пленочную среду, в которой фторуглеродные молекулы осаждаются на поверхность движущейся жидкости и слетают с нее; на наклонной пленке тепло переносится в необычном направлении – сверху вниз. Отметим эту новую полупроводниковую одностороннюю направленность переноса тепла, поскольку та же наклонная пленка испаятора тепло снизу вверх практически не переносит.

Следует отметить, что горизонтальная пленка испаятора, эффективно отводя тепло вбок, одновременно также является хорошим теплоизолятором (!) при передаче тепла по газу в бутылке снизу вверх. Тепло через пленку вверх проходит плохо. Это можно наблюдать, когда в испаяторе на расстоянии примерно 1 см друг от друга находятся две параллельные, одинаково охлаждаемые с боков пленки. В этом случае быстрые потоки наблюдаются на нижней пленке, а на верхней движение потоков идет на порядок медленнее. Если нижняя пленка рвется, то верхняя сразу приходит в интенсивное движение.

Прямые измерения температуры воздуха в бутылке точным ртутным термометром ( $\pm 0.05$  К) показывают, что в стационарных условиях температура воздуха непосредственно над пленкой испаятора на  $0.4-0.7$  К меньше, чем под пленкой. Оценки показывают, что сама пленка из-за характерной для жидкостей высокой теплопроводности не может без затрат больших мощностей (порядка нескольких ватт) стационарно на своих границах поддерживать такой перепад температур. Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемый градиент температур обеспечивается тонкой прослойкой холодного газа, постоянно отходящего вниз от поверхности вместе с молекулами  $C_8F_{18}$  снизу пленки.

Пленочный испаятор эффективно охлаждает прилегающий воздух с обеих сторон пленки, но сверху пленки этот более тяжелый холодный воздух остается около нее, а снизу он сохраняется только в тонком, динамически поддерживаемом слое, поскольку быстро отходит от пленки вниз и сменяется более теплым. Отметим, что на

тонком черном участке пленки потоков практически нет, и он, наоборот, хорошо проводит тепло снизу вверх и плохо – вбок. Таким образом, наличие черного пятна дополнительно усложняет динамику системы, внося возмущения в направления движения прилегающих к пленке газовых потоков.

В то же время динамика взаимодействия пленки с прилегающими воздушными потоками весьма важна для понимания механизма ее движения. В газовом потоке находятся диффундирующие молекулы  $C_8F_{18}$ , которые, как и пары воды, осаждаются на холодных участках поверхности раствора и на стенках (и нагревают их, образуя комплексы), перемещаются вместе с пленкой и покидают ее при разогреве; распад комплексов приводит к охлаждению поверхности жидкости. Затем молекулы  $C_8F_{18}$  нагреваются окружающим воздухом, потоком газа переносятся к холодным участкам поверхности и снова на них садятся, заканчивая цикл движения.

Газовые потоки постоянно циркулируют рядом с пленкой, меняют ее состав и обмениваются с ней энергией, что дополнительно усложняет наблюдаемые траектории движения двухфазных потоков. Наличие самого тесного взаимодействия жидкости и газа в пленочных испаяторах, как и в ранее рассмотренных объемных [3], при внешней простоте описанных опытов чрезвычайно усложняет задачу математического описания и моделирования их взаимосвязанного движения. Предсказать «погоду» на локальном участке пленки (направление потоков, температура, состав прилегающей атмосферы) так же трудно, как и предсказать погоду на Земле. В то же время эксперименты с пленочными испаяторами весьма просты, нетрудоемки и информативны.

Уменьшение толщины и старение пленки со временем происходят обычным образом. Раствор из пленки сначала вытягивается гравитационными и капиллярными силами в пограничное трехгранное ребро у стенки, где из-за малого радиуса кривизны образующих это ребро граней внутреннее давление меньше, чем в пленке [12]. Затем из ребра пленки раствор медленно вытягивается по стенкам к более нагретым участкам и стекает вниз, т.к. натяжение на холодной пленке меньше, чем на нагретой. Этот медленный дренаж раствора из пленки через несколько часов делает ее тоньше, что уменьшает перепад плотностей пленки, замедляет движение, приводит к возникновению цветных потоков, черного пятна и к разрыву пленки.

Если пленка находится недалеко (3–6 мм) от поверхности основного раствора в объеме, когда есть возможность подпитки пленки капиллярными силами, то продолжительность ее жизни увеличивается до нескольких недель. Однако осталось невыясненным, почему испаяторная пленка-помпа живет ограниченное время и лопаются, хотя ее вещество за время работы целиком заменяется сотни раз прокачиваемым раствором.

Движение потоков на пленке по виду имеет двумерный характер, хотя известно, что дренаж раствора из некоторых пленок, ограниченных с двух сторон плотными мономолекулярными слоями поверхностно-активных молекул, может при неподвижных поверхностных слоях происходить и внутри пленки [10]. В испаяторах динамика усложняется тем, что потоки приводят к изменениям свойств пленок, ее толщины, расклинивающего давления, марангоновской и асимптотической (гиббсовской) поверхностной эластичности [13].

Передача тепла по пленке испаятора происходит

быстро, а через ребро (как по объемной жидкости) – существенно медленнее, поэтому пена из мелких ячеек в испалаторной бутылке практически не является теплопроводящей.

Мы убедились, что испалатор, как и всякая самоорганизующаяся система с прокачкой энергии (или массы), работает только тогда, когда его наличие ускоряет проток энергии через систему, в которой он находится. Это общее правило для самоорганизующихся структур всех видов (вплоть до социальных) демонстрируется в опытах с ускорением испарения воды охладителя. С точки зрения окружающей системы появление в ней новой самоорганизованной структуры – это конкуренция, вызов старой системе и ее обход (раньше энергия текла через систему, а теперь – с увеличенной скоростью в обход нее через новые структуры). Условие самоорганизации означает, что, увеличивая общий проток энергии, новая структура не может много энергии тратить на себя, на поддержание своей системы, она обязана передавать энергию – только в этом смысл ее существования. А передавая ускоренно через себя энергию, структура тем самым увеличивает энтропию окружающей ее среды (ускоряет выравнивание температуры) и этим сокращает свою жизнь. Изучение самоорганизации потоков в испалаторах позволит оценить пороговые условия (синергетику) их возникновения на поверхностях жидкостей.

Сложность наблюдаемой на пленочном испалаторе динамики движений и взаимодействия жидкостных и прилегающих газовых потоков, по-видимому, можно сравнить с пока не контролируемой в деталях, но зрительно представляемой картиной неповторяющегося возникновения и передачи межклеточного возбуждения в коре головного мозга. В этом плане бегающие по пленке цветные узоры могут служить в некотором роде наглядной моделью (или макетом) самоорганизации мыслительных процессов с их тесной взаимосвязью друг с другом, с внешней средой и с исторической памятью своих предыдущих состояний.

Теоретические проблемы и вопросы, поставленные ранее при исследовании объемных испалаторов [3], в равной мере относятся и к пленочным испалаторам. Но появились и новые вопросы. Интересен анализ динамики движения пленочных потоков в условиях, когда выше и ниже пленки скорости газовых потоков, температуры и плотности активных фторуглеродных молекул в них не равны.

Требуется экспериментально определить поверхностное натяжение разных жидкостей в зависимости от температуры в парах разных фторуглеродов (и других газов) при фиксированной плотности паров. Можно ли продлить жизнь пленочного испалатора и при наличии постоянного охлаждения (испаряющейся водой) сделать его «вечным»? Какие составы растворов окажутся для этого оптимальными? Отметим, например, что прочность пленок нашего раствора заметно возрастает при добавлении в него еще нескольких процентов порошка для «Гигантских пузырей» (USA, Cricket Hill, Inc., Winter Haven, FL 33880) или ополаскивателя для рта «Colgate Total Plax» следующего состава: активные ингредиенты – фторид натрия (0.025 %), триклозан (0.03 %), сополимер PVM/МА (0.20 %); ингредиенты – вода, сорбитол, этиловый спирт, глицерин, лаурилсульфат натрия, метилкокоилтаурат натрия, ароматизаторы, ментол, динатрийфосфат, гидроксид натрия, сахарин, краситель CI 42090. Ин-

тересно, что водный раствор для «Гигантских пузырей» и сам ополаскиватель тоже образуют прочные пленки, но они, как и пленки из водного раствора кускового мыла, в закрытых объемах практически не дают потоков в присутствии паров  $C_8F_{18}$ . В дальнейшем интересно выяснить, с какими молекулами на пленках и как взаимодействуют фторуглеродные соединения. Интересна возможность объединения динамичных пленочных испалаторов с многоцветными лазерами на растворах красителей и создания на этой основе чувствительных датчиков и лазерных проекторов для больших экранов.

Возникающие на пленке цветные участки обычно нестабильны и стремятся к преобразованию в черные пятна или в толстые области, как при расслоении двухкомпонентных растворов. По этой причине между черным пятном и толстой пленкой (с быстрыми потоками) обычно нет постепенного утолщения с цветными полосами, а есть резкий, бликующий на свету край. Но какова форма этой четкой грани у черного пятна? На какой высоте в бегающей толстой пленке располагается черное пятно? В какой степени на толстой пленке верхняя поверхность пленочного испалатора может двигаться независимо от нижней? Представляет интерес определить близкие поверхностные натяжения толстой пленки и черного пятна, рассмотреть условие равновесия сил на их границе и оценить влияние этих сил и сил расклинивающего давления на динамику движения черных капель с длинными хвостами и взаимного превращения пленок разной толщины. Интересен вопрос о влиянии стереоформ, пространственной структуры (цис-, транс-, например, у  $C_{10}F_{18}$ ) и хиральной симметрии (закрученность) линейных фторуглеродных молекул на их взаимодействие с молекулами на поверхностях жидкостей [17].

Для детального понимания сути обнаруженного в испалаторах наномасштабного взаимодействия химически-инертных молекул, вызывающего самоорганизацию макродвижений на жидкостях, требуется проведение специальных теоретических разработок, моделирования и подробных компьютерных вычислений с целью прояснения его особенностей и возможных применений. Видеофильмы о движении на пленочных испалаторах свободно доступны в Интернете [21–23].

Отметим, что при исследовании пленочных испалаторов мы убедились, что они могут быть сделаны не только на основе фторуглеродных соединений. Почти такие же быстрые или чуть более медленные потоки возникают на наших мыльных пленках при взаимодействии с парами пентана  $C_5H_{12}$ , когда рамка с мыльной пленкой опускается боком в открытый сосуд с парами налитого на дно жидкого пентана, или же в герметичном пленочном испалаторе с насыщенными парами пентана, эфира или обычного бензина. Это существенно расширяет эндемичность испалаторов и позволяет создавать их на основе более дешевых соединений.

Особенности взаимодействия молекул пентана с поверхностью воды в стационарных условиях исследованы экспериментально и теоретически в ряде работ [18, 19]. Пентан не растворяется в воде [20], но при контакте его насыщенных паров (~400 Тор) с водой на ней осаждается мономолекулярный слой пентана [18, 19]. Поверхностное натяжение воды, как мы определили, при этом уменьшается на 14 %. В насыщенных парах пентана натяжение мыльного раствора уменьшается на 37 %. Уменьшение натяжения пропорционально давлению паров пентана,

что в неравновесных условиях и вызывает постоянное движение потоков на таком пленочном испаляторе. О результатах исследования пленочных испаляторов с такими более дешевыми, чем фтористые вещества, соединениями мы сообщим позже.

Развиваемая в мире за последние 10 лет нанотехнология (создание моторов и устройств на молекулярном уровне) может для своих целей использовать обнаруженные нами перемещения молекулярных комплексов [3] в качестве нанодвигателей для быстрого переноса, например, фтористых или других молекул из одного места в другое по поверхности жидкостей, как это уже происходит в испаляторах (на большие многосантиметровые расстояния). Ведь испаляторы по своей сути – это и есть наномолекулярные двигатели, причем в рассматриваемых пленочных испаляторах по сравнению с их объемными аналогами [3] скорость перемещений потоков, как и их геометрические поперечные размеры, возрастает на порядок.

Пленочные испаляторы также могут представить интерес с физической и практической точек зрения в следующих случаях:

1. Реализации уникальных двумерных физических систем с новыми принципами постоянного движения.

2. Наблюдения равновесия, двумерного расслоения и обратимых фазовых переходов между толстой и черной (тонкой) пленками под влиянием меняющихся знак разных составляющих расклинивающего давления.

3. Детального изучения механизма движения газовых и жидкостных потоков в самих объемных и пленочных испаляторах.

4. Использования возвратно-вихревого движения двумерных систем для моделирования воздушных потоков типа атмосферных циклонов и изменения погоды.

5. Серийного производства высококачественных, не повторяющихся «живых» картин, эскизов для филигранных украшений, плавно меняющихся фантастических заставок для кино и телевидения.

6. Изучения механизма образования узоров в неравновесных физических системах при усилении шумов на нестабильностях [14, 15].

7. Создания инерционных датчиков типа гироскопов, регистрирующих угловую скорость вращения систем по изменению картины радиальных потоков (горизонтальная пленка в бутылке диаметром около 10 см может без разрыва вращаться со скоростью более 10 об./с).

8. Изучения термодинамики двумерных систем с аномальными свойствами расширения при охлаждении.

9. Использования в качестве чувствительных, дешевых и обширных двумерных температурных индикаторов и датчиков.

10. Создания эффективных однонаправленных переносчиков тепла (холода), подобных используемым в тепловых трубах, но работающих с необычным газожидкостным пленочным наполнением и переносащих энергию сверху вниз.

11. Расширения объектов изучения общей физики мягких конденсированных систем [16] и апробирования разрабатываемых газожидкостных моделей теоретической гидродинамики открытых систем с поверхностно-активными комплексами [3].

Появление пленочных испаляторов на основе распространенных органических газов показывает, что для реализации систем с самоорганизацией и макродвижением

не требуются особые экстремальные окружающие условия. Нужна вполне обычная пленка из подходящего набора природных составляющих, которая, как показано выше, без каких-либо запасов энергии и химических преобразований может реагировать на малейшие перепады температур, создавать на своей большой поверхности потоки вещества и в них во много раз ускорять соединение и разъединение атомов и молекул.

Простой и естественный состав растворов, высокая чувствительность к окружающим условиям, легкость самообразования потоков вещества при малых перепадах температуры дают основания полагать, что такие или похожие пленочные структуры были основой появления самоорганизующихся систем в океане и жизни на Земле.

Первыми живыми существами на Земле, по-видимому, были не микроорганизмы, а скорее, простые макрошарики, испаляторные пузырьки из тонкой пленки на океанских волнах с постоянными самоорганизующимися потоками и с высокой чувствительностью к нагреву, влажности и химическому составу. Они обладали характерной возможностью создавать и поддерживать разные условия по разные стороны пленки, комбинировать пространственно ориентированные на поверхностях молекулы вещества в потоках и отбирать наиболее жизнеспособные структуры. Древняя легенда о том, что Афродита вышла из морской пены, с появлением испаляторов получает разумное научное обоснование.

В связи с этим интересен общий вопрос – есть ли другие, более простые физические системы с самоорганизацией, высокой чувствительностью и богатыми возможностями комбинирования составляющих их соединений при минимальном протоке через них энергии (или массы), которые могли бы служить основой появления жизни на Земле?

1. Белоногов А.Ю., Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю., Чо Сан-Дзю. *Квантовая электроника*, **25**, 625 (1998).
2. Stoilov Yu. Yu. *Langmuir*, **14**, 5685 (1998).
3. Стойлов Ю.Ю. *УФН*, **170**, 41 (2000).
4. Меркин А.П., Таубе П.П. *Непрочное чудо* (М.: Химия, 1983).
5. Vorobieff P., Ecke R.E. *Am. J. Phys.*, **67**, 394 (1999); <http://cnls.lanl.gov/~azathoth/ekman/2dturb-index.html>.
6. Rivera M., Vorobieff P., Ecke R.E. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 1417 (1998).
7. Sirota E.B., Pershan P.S., Sorensen L.B., Collett J. *Phys. Rev. A*, **36**, 2890 (1987).
8. Poulin Ph., Nallet F., Cabane B., Bibette J. *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 3248 (1996).
9. Guenoun P., Schalchli A., Sentenac D., Mays J.W., Benattar J.J. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 3628 (1995).
10. Sonin A.A., Bonfillon A., Langevin D. *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 2342 (1993).
11. Braverman L.M., Eckert K., Nepomnyashchy A.A., Simanovskii I.B., Thess A. *Phys. Rev. E*, **62**, 3619 (2000).
12. Monnerau C., Vignes-Adler M. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 5228 (1998).
13. Chomaz J.M., Cathalau B. *Phys. Rev. A*, **41**, 2243 (1990).
14. Gollub J.P., Langer J.S. *Rev. Mod. Phys.*, **71**, S396 (1999).
15. Bowman C., Newell A.C. *Rev. Mod. Phys.*, **70**, 289 (1998).
16. Witten T.A. *Rev. Mod. Phys.*, **71**, S367 (1999).
17. Sprik M., Rothlisberger U., Klein M.L. *Molec. Phys.*, **97**, 355 (1999).
18. Bertrand E., Dobbs H., Broseta D., Indekeu J., Bonn D., Meunier J. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 1282 (2000).
19. Weiss V.C., Widom B. *Physica A*, **292**, 137 (2001).
20. Ragil K., Bonn D., Broseta D., Meunier J. *J. Chem. Phys.*, **105**, 5160 (1996).
21. <http://www.atv.ru/archives/video/01/1701-1.asf>
22. <http://www.atv.ru/archives/video/01/1001-2.asf>
23. <http://www.atv.ru/archives/video/01/1501-2.asf>
24. <http://www.atv.ru/archives/video/12/3112-2.asf>