

Плазма как сурфактант

А. Е. ДУБИНОВ, Ю. П. КОЖАЕВА, В. А. ЛЮБИМЦЕВА, В. Д. СЕЛЕМИР

Сурфактантами называют поверхностно-активные вещества, изменяющие коэффициент поверхностного натяжения какой-либо жидкости и улучшающие смачиваемость поверхности твердого тела этой жидкостью. Примеры сурфактантов известны каждому: мыло, шампуни, средства для мытья посуды, стиральные порошки, технологические чистящие реагенты и т. д.

В мире производится и реализуется огромное количество химических сурфактантов. Например, известно, что годовой рынок сурфактантов США составляет $\sim 3 \cdot 10^6$ т. Для перевозки такого количества химикатов нужен железнодорожный состав из 5000 вагонов общей длиной 1500 км! Близкие объемы реализации имеют и другие крупные государства, в том числе и Россия. И весь этот объем в конце-концов растворяется в воде, которая затем сливается, образуя так называемые сточные воды. Очистка сточных вод от сурфактантов по разным данным оценивается как 10000–30000 руб/т.

В бедных странах сточные воды практически не очищаются, а сливаются в водоемы, нанося непоправимый вред глобальной экосистеме. Одним из решений этой проблемы могла бы стать замена химических сурфактантов на иные средства.

Проводя многочисленные исследования электрических разрядов над поверхностью жидкостей, мы заметили, что в местах контакта плазмы с жидкостью происходят новые, неизвестные

из литературы капиллярные явления и новые явления смачивания. Эти явления можно объяснить тем, что плазма изменяет поверхностное натяжение там, где касается жидкости. А там, где плазма касается точек контакта жидкости с твердым телом, происходит улучшение смачиваемости.

Известно, что плазма при контакте с поверхностью конденсированного вещества отдает электрический заряд веществу, преимущественно отрицательный. На этом основаны, например, принцип действия электрического зонда в плазме или зарядка мелких частичек, летающих в запыленной плазме.

В нашем случае заряженная поверхность жидкости приобретает дополнительную поверхностную энергию за счет кулоновского взаимодействия внесенных зарядов. Преобладание зарядов одного знака на поверхности жидкости снижает работу, требуемую на растягивание поверхности, что приводит к увеличению смачиваемости и к уменьшению контактного угла. Фактически заряженные частицы на поверхности жидкости, внесенные из плазмы, играют роль сурфактанта – вещества, модифицирующего нужным образом поверхностное натяжение в жидкости и смачивание ею твердой поверхности.

Первые наши опыты, основанные на этой идее, привели к открытию нового плазменно-капиллярного эффекта. Обычный капиллярный эффект заключается в подъеме жидкости в вертикально установленном незапаянном капилляре, один конец которого погружен в сосуд с жидкостью на высоту больше высоты уровня жидкости в сосуде. Эффект возникает, когда стенки капилляра смачиваются жидкостью.

В первой серии наших опытов в чашке Петри вертикально закреплялся стеклянный трубчатый капилляр. В чашку Петри наливался водный раствор медного купороса, который являлся рабочей жидкостью. Использование такого раствора вместо чистой воды было продиктовано двумя причинами: увеличением электропроводности воды, так как она служила одним из электродов газоразрядного промежутка, и окраски жидкости для улучшения визуализации. В капилляр вводился игольчатый электрод так, чтобы его конец и верхний край жидкости в капилляре образовывали небольшой электро-



В. Д. Селемир, В. А. Любимцева, А. Е. Дубинов, Ю. П. Кожаяева проводят очередной опыт с плазмой

разрядный промежуток. В саму жидкость погружался другой электрод.

На электроды подавалась последовательность высоковольтных наносекундных импульсов. Импульсы генерировали в промежутке между концом иглы и поверхностью жидкости искровые разряды. Причем один из концов плазменного канала искры опирался на свободную поверхность жидкости. Первоначальная высота уровня жидкости в капилляре была на 5 мм выше уровня жидкости в чашке Петри благодаря обычному капиллярному эффекту. После каждого импульса уровень жидкости в капилляре поднимался на 0,51 мм (рис. 1), пока не достигал игольчатого электрода. Если же этот электрод поднимать синхронно с подъемом жидкости, исключая их прямой контакт, то уровень жидкости мог подняться на еще большую высоту. А после прекращения подачи импульсов уровень жидкости не опускался, а оставался на новой поднятой высоте. Индуцированный электрическими разрядами подъем уровня жидкости

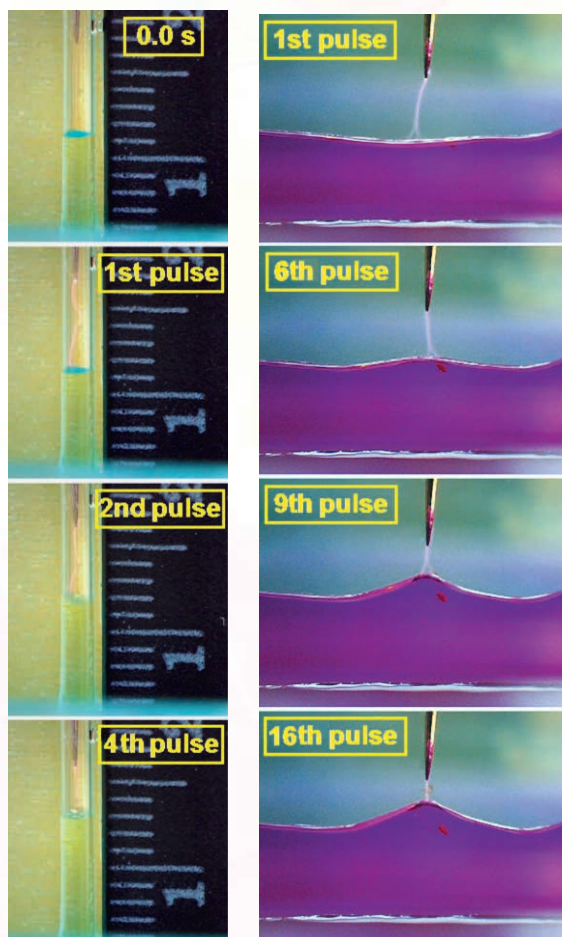


Рис. 1

в капилляре на высоту, большую, чем высота уровня при обычном капиллярном эффекте, мы назвали плазменно-капиллярным эффектом.

Другая серия опытов проводилась в щелевом капилляре, образованном парой плоских параллельных стекол, в котором размещался игольчатый электрод. На электроразрядный промежуток также подавалась последовательность высоковольтных импульсов. На рис. 2 показаны некоторые кадры, демонстрирующие эволюцию линии уровня водного раствора марганцовки в капилляре, когда жидкость поднималась только в районе контакта плазмы с жидкостью. В итоге уровень жидкости в щелевом капилляре принимал форму колоколообразного выступа и сохранялся после прекращения воздействия плазмой в течение длительного времени.

Результаты двух серий опытов, описанных выше и показывающих, что заряженные частицы, поступающие из плазмы в жидкость, модифицируют поверхностное натяжение и смачиваемость, подтолкнули нас к идее, что асимметричный контакт жидкости с плазмой может привести в направленное движение всю каплю жидкости целиком.

Целью третьей серии опытов была демонстрация направленного движения капель жидкостей при контакте с плазмой. Эти опыты проводились следующим образом. Капля исследуемой жидкости наносилась на гладкую поверхность металлического образца, который играл роль одного из электродов.

Над каплей закреплялся другой электрод в форме стальной иглы так, чтобы образовывался небольшой зазор между поверхностью металлического образца и острием иглы. При этом острие игольчатого электрода должно было находиться не над вершиной капли, а чуть сдвинутым по горизонтали. Этим достигалась необходимая асимметрия высыпания заряженных частиц на каплю.

Сначала опыты третьей серии проводились с каплями чистой воды, лежащими на линейке из нержавеющей стали. Поскольку капли здесь не выполняли роль электродов, то возможно использовать низкопроводящие жидкости такие, как, например, чистая вода вместо солевого раствора. Для сокращения длительности процесса по сравнению с процессами предыдущих серий на электроды подавалась непрерывная последовательность высоковольтных импульсов, следующих с большой частотой. Было зарегистрировано, что за непродолжительное время воздействия импульсно-периодическими нано-

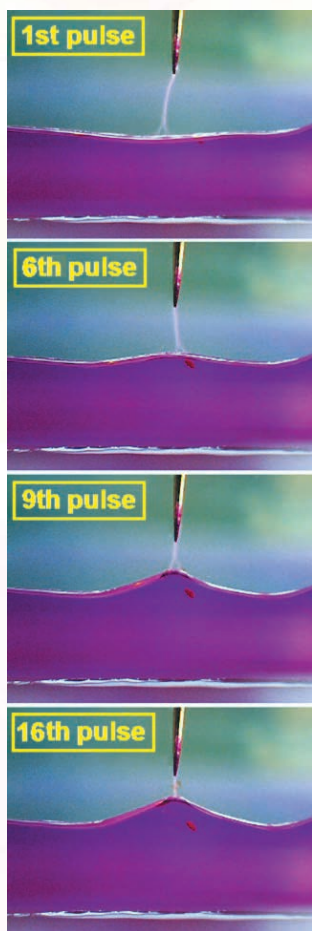


Рис. 2

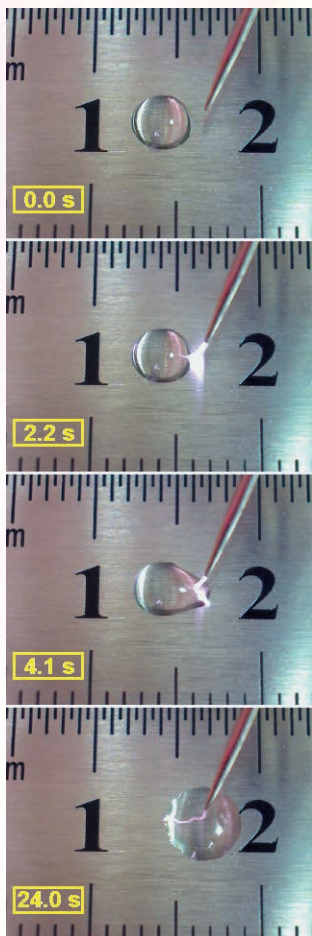


Рис. 3

секундными искрами капля перемещается в сторону игольчатого электрода и останавливается в положении, в котором конец иглы находится над центром капли. Несколько кадров видеозаписи, которая была сделана при наблюдении сверху, приведены на рис. 3. Данные кадры иллюстрируют это перемещение и позволяют заметить его некоторые интересные особенности: сначала приходит в движение край капли, лежащий непосредственно под иглой, в результате чего капля удлиняется в продольном направлении, а затем быстро подтягивается наиболее удаленный от иглы край за счет поверхностного натяжения. Такое движение сходно с перистальти-

ческим движением некоторых червей и слизней.

Были проведены десятки других опытов с различными жидкостями и различными металлами, на которых лежала капля. Для иллюстрации перистальтики капли на рис. 4 приведен график эволюции во времени площади основания капли глицерина, движущегося по поверх-

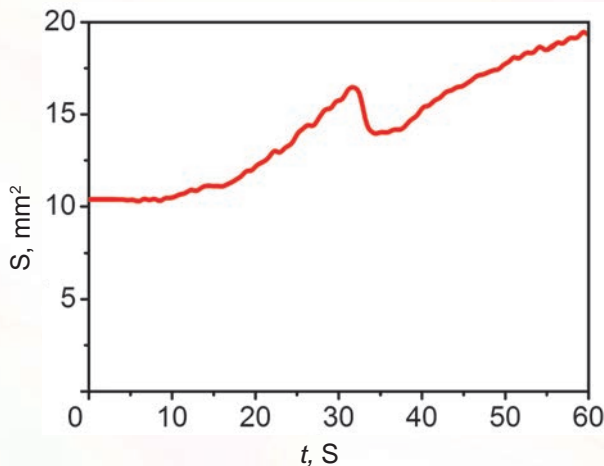


Рис. 4

ности оловянной пластины. На нем имеется спадающий участок, который соответствует стадии подтягивания.

Выяснилось также, что капли жидкости можно заставить двигаться вверх по наклонной плоскости (рис. 5).

В итоге, в третьей серии опытов был зарегистрирован новый эффект смачивания, заключающийся в перистальтическом перемещении капли вдоль поверхности под действием плазмы электрического разряда.

Сформулируем главный вывод нашей работы: низкотемпературная плазма электрических разрядов при контакте с жидкостями оказывает на них действие, сходное с действием сурфактантов. Благодаря этому в жидкостях могут наблюдаться новые капиллярный эффект и эффект смачивания.

Предполагаемые области применения найденных эффектов могут быть связаны, например, с экологией воды или с микрогидродинамикой капель, например, при производстве лекарств.

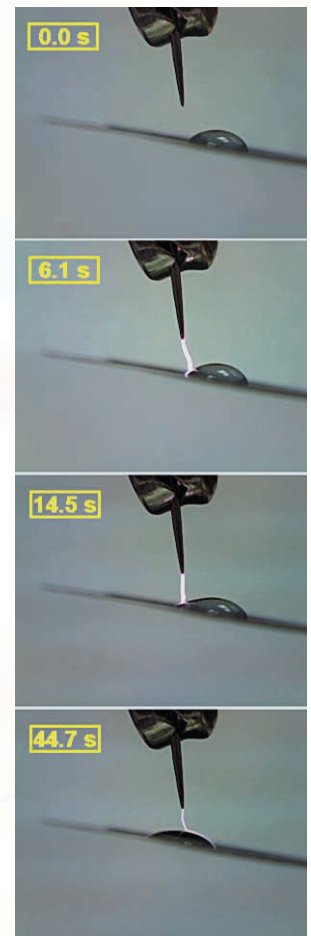


Рис. 5

СЕЛЕМИР Виктор Дмитриевич –
директор НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
член-корреспондент РАН

КОЖАЕВА Юлия Павловна –
инженер-исследователь НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

ЛЮБИМЦЕВА Валерия Александровна –
инженер-исследователь НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

ДУБИНОВ Александр Евгеньевич –
заместитель директора НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор физ.-мат. наук