

## Self-sputtering of the thin homogeneous foils

V. V. Manukhin

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, Russia

*Principles of invariant embedding are applied to investigation of the phenomenon of self-sputtering of thin homogeneous foils. Integral equations describing the flux of the sputtered atoms with regard for the boundary conditions are obtained. Approximate solutions to the integral equation for a function that describes the energy and angular spectra of the atoms escaping from the thin foils surfaces in the case of self-sputtering are found.*

УДК 532.612:541.1:532.6:532.77

С. И. Иголкин

Балтийский государственный технический университет, Санкт-Петербург, Россия

*Классические демонстрации "сил поверхностного натяжения" с использованием мыльных пленок допускают альтернативную трактовку, не связанную с силами на поверхности. Наблюдаемые эффекты можно исчерпывающим образом объяснить объемными напряжениями в объектах, которые относятся к классу пленок, мембран и оболочек. Опыт по косвенному определению давления Лапласа под искривленной поверхностью жидкости не только не подтверждает формулу Лапласа, но и приводит к прямо противоположному результату: на искривленной поверхности жидкости могут иметь место напряжения сжатия.*

Классическая демонстрация поверхностных свойств жидкостей и растворов, многократно описанная в учебниках, включает описание опыта по измерению силы, действующей на подвижную рамку со стороны пленки жидкости, в которой она образуется. Демонстрацию "поверхностных" эффектов проводят также при помощи мыльных пузырей, внутри которых формируется "давление Лапласа под искривленной поверхностью жидкости". Внимательное рассмотрение дает повод усомниться в объяснениях результатов экспериментов и соответствующих итоговых заключениях.

Перечислим особенности постановки опытов, а также вопросы, на которые не дают ответа классическая постановка и трактовка результатов наблюдений.

- Измерения проводятся для неравновесного объекта, создаваемого вполне определенным образом. Различия в способах создания и существования объектов не учитываются. Полагается, что силы поверхностного натяжения (ПН) существуют

всегда, не являются реакцией на внешние воздействия и никак с этими воздействиями не связаны.

- Поверхностные напряжения в пленке и возможные напряжения внутри объема той же пленки не разделены. Более того, объемные напряжения внутри жидкости в классической постановке никогда не принимались во внимание.

- Явление демонстрируется для весьма специфической рабочей среды, которая обладает особыми, не рассматриваемыми детально и конкретно не определяемыми физическими свойствами. Это свойства длинных полимерных молекул любого мыла, которые помещены в умеренно подвижную водную среду.

Вопросы заключаются в обоснованиях правомочности названных и некоторых иных допущений, а также особенностей демонстрации эффектов. Например, опыты с чистыми веществами (чистая вода, чистые полимеры: смолы, лаки, клеи и др.) немедленно проявили бы наблюдаемые явления должным образом. Ниже показана обязательность подробного учета всех физических свойств объектов исследования, а также этапов постановки и трактовки подобных экспериментов.

### Опыт с подвижной рамкой

Стандартной демонстрацией "поверхностного" натяжения является опыт по измерению силы, действующей на подвижные элементы металлической рамки с натянутой между ними мыльной пленкой.

Оставляя в стороне погрешности измерений и их обработки, аналогичные опытам по отрыву кольца и взвешиванию капель, падающих из капилляра [1], и подчеркивая также, что мыльный состав и вода – вещества, не одинаковые по химическому составу и свойствам, сравним объяснения результатов опытов с разных позиций.

Традиционный ход рассуждений следующий. В мыльной пленке внутри прямоугольной рамки с размерами  $B \times L$  на каждую сторону действует сила  $F$ , пропорциональная длине стороны и коэффициенту поверхностного натяжения (КПН)  $\gamma$

$$F^L = \gamma L; \quad (1)$$

$$F^B = \gamma B. \quad (2)$$

В литературе не обсуждаются варианты, когда значение силы  $F$  определяется не поверхностным натяжением, а упругими напряжениями  $\sigma$ , действующими по всему поперечному сечению пленки. Если все же допустить, что напряжение в пленке определяется не КПН  $\gamma$  с размерностью [н/м], а как для твердого тела пределом текучести  $\sigma_T$  [н/м<sup>2</sup>], то сила, действующая на каждую сторону рамки, определится как

$$F_{\sigma} = \sigma_T \delta L,$$

где  $\delta$  — толщина пленки.

Учитывая вполне очевидный факт, что с увеличением напряжения толщина пленки должна уменьшаться, в качестве результата эксперимента вполне логично ожидать, что произведение величин  $\sigma \delta$  может быть близким к константе, которая и обеспечивает искомую прямую пропорциональность по уравнениям (1) и (2). Таким образом, с учетом объемных эффектов альтернативная трактовка результатов классического опыта по крайней мере имеет право на существование.

Обратим внимание на одну особенность постановки конкретного опыта с рамкой, которая обычно не уточняется при демонстрации. В описании экспериментов не оговаривается, с каким объемом жидкости он проводится — постоянным или переменным. Судя по ряду косвенных данных, этот объем, как правило, неограничен. Только в таком случае возможно сколь угодно большое увеличение площади пленки с полным сохранением и толщины, и напряжений во всем рассматриваемом объекте. Это означает, что фактически имеется

некоторый резервуар, из которого и пополняется объем жидкости в пленке. Толщина пленки и напряжение в ней при неограниченном росте ее размеров могут и должны оставаться неизменными:  $\sigma \delta = \text{const}$ . Только в этом случае при росте размеров пленки постоянное пополнение объема из резервуара происходит при фиксированных условиях. Тогда для любого предела текучести  $\sigma_T$  выполняется известная формула

$$F_{\sigma} = \sigma_T \delta L = C_{\sigma} L.$$

Именно это соотношение, т. е. пропорциональность силы длине рамки, переписанное в терминах "поверхностного натяжения", как в уравнениях (1) и (2), является самым весомым аргументом общепринятой концепции.

Для иной постановки опыта, когда суммарный объем пленки внутри рамки неизменен,

$$V = \text{const} = \delta L B, \quad (3)$$

итоговая зависимость может существенно измениться. Логично считать, что напряжения по ортогональным направлениям в пленке одинаковы, но с изменением длин  $B$  или  $L$  все параметры связываются несколько иным образом. Например, для постоянной длины  $L$  при изменении ширины  $B$  имеем

$$F_{\sigma}^L = \sigma_T \frac{V}{B}.$$

В такой постановке опыты не проводятся. Фактически это опыт с "сухой" рамкой. Для него, возможно, не будет справедливым утверждение о постоянстве силы, действующей на сторону, размер которой неизменен:  $F^L \neq \text{const}$  при переменном значении  $B$ . Другими словами, здесь для постоянного объема пленки либо при неизменном напряжении  $\sigma$  сила будет уменьшаться с ростом размера  $B$ , либо, что более логично, в пленке будут уменьшаться толщина и расти напряжение. Именно так ведут себя образцы твердых тел при испытаниях на прочность. В любом случае постоянство сил, действующих в рамке, и точная прямая пропорциональность их длине соответствующей стороны рамки в данной постановке вызывают сомнения. Это заслуживает отдельной проверки. К сожалению, опыт такого типа весьма сложен для корректного исполнения из-за технической проблемы обеспечения условия (3).

Результат измерений для случая неограниченного количества раствора в обоих вариантах его трактовки не изменяется. Таким образом, равноправными являются два подхода, и в одном из них не требуется термин КПН. Сама же линейная зависимость силы от длины пленки не является доказательством действия силы поверхностного натяжения.

Отметим также, что свойства пленки в целом более обширны, и они более точно отражают наблюдаемые явления, чем возможные свойства поверхности этой же пленки. В целом детальный анализ опытов с мыльными пленками на прямоугольных рамках не дает повода для выбора концепции сил поверхностного натяжения в качестве единственно возможной основы для объяснения известных результатов.

**Демонстрация давления Лапласа**

В работе [1] в качестве доказательства справедливости уравнения Лапласа—Юнга

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \tag{4}$$

приводятся схемы и фотографии опытов с мыльными пленками, которые на первый взгляд действительно удовлетворяют названному уравнению, а также уравнению для случая формирования поверхностей с двумя радиусами кривизны

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \tag{5}$$

где  $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  
 $R$  — радиусы кривизны поверхности жидкости.  
 Уравнение (5) называют основным уравнением теории капиллярных явлений. В сферических мыльных пузырях, когда радиусы равны, уравнение (5) становится уравнением (4), и этот результат без дополнительного анализа обобщают на случай сферической капли.

В частности, для демонстрации давления Лапласа в [1] приводится схема опыта (рис. 1), где показано, что в позиции *a* радиусы кривизны поверхности равны по величине, но противоположны по знаку, поэтому давление под всей пленкой неизменно равно атмосферному —  $\Delta P = 0$ . При наличии перепада давлений в позиции *б* радиусы неравны, но при открытии кранов давление и форма поверхностей неизбежно выравниваются (см. рис. 1, в).

Повторение подобного опыта и тщательное измерение радиусов кривизны образованных мыльной пленкой поверхностей (рис. 2) полностью подтверждают общепринятые соотношения. Однако результаты опыта имеют другое объяснение, более адекватное сущности рассматриваемого явления.

Наблюдаемая картина никак не доказывает наличие поверхностного натяжения и не подтверждает формулу Лапласа. Она демонстрирует свойства тонких напряженных объектов — пластин, пленок, оболочек, мембран, — в которых один характерный размер много меньше двух других.

Пленка обладает свойствами трехмерных объектов, имеющих объем и конечную толщину. Этим они отличаются от двухмерных поверхностей, которые являются всего лишь границей двух сред. На границе формируются свои особенности. Граница действительно обладает особым энергетическим потенциалом, равным энергии образования поверхности, но особая сила натяжения на этой поверхности вполне может отсутствовать и пока не обнаружена.

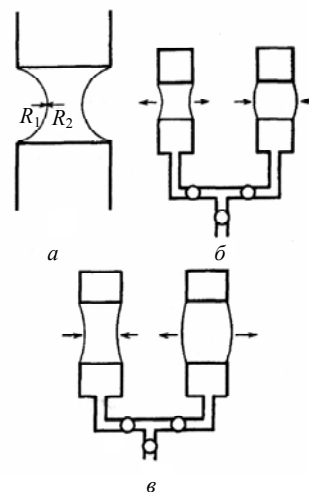


Рис. 1. Классический опыт по демонстрации давления Лапласа [1]

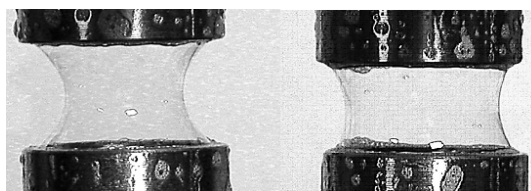


Рис. 2. Радиусы пленки между цилиндрами (варианты)

Измерение давлений ("давлений Лапласа") в мыльных пузырях реально производится внутри объема, который находится под пленкой, но не под поверхностью. Пленка имеет две поверхности, и пространство между этими поверхностями не является пустым. Свойства жидкости, заполняющей это пространство, можно представить как промежуточные между свойствами газа и твердого тела. Причем, учитывая, что мыльная среда обладает клеящими свойствами, логично полагать наличие существенных сил притяжения между молекулами раствора, а с ростом его концентрации — дальнейшее и непрерывное приближение всех его характеристик к параметрам эластичной, достаточно прочной среды — свойствам резиновой пленки.

Эксперименты с мыльными пузырями иллюстрируют не поверхностное, а пленочное, объемное натяжение.

Прямой ответ на природу растягивающих напряжений в мыльной пленке дают два опыта. Первый — по измерению силы притяжения тех же цилиндров (см. рис. 2) в зависимости от расстояния между ними, и второй — по измерению кривизны пленки, образующейся между двумя цилиндрами при наличии перетяжки.

### *Измерение силы притяжения*

При малом расстоянии между цилиндрами, связанными мыльной пленкой, периметр пленки близок к периметру цилиндров. С ростом этого расстояния радиус перетяжки убывает, и произведение периметра на постоянный "коэффициент поверхностного натяжения" должно давать значения силы, пропорциональные этому периметру. Другими словами, если следовать концепции стандартного толкования поверхностного натяжения, то при увеличении расстояния сила притяжения должна убывать.

Постановка подобного опыта аналогична опыту с определением силы отрыва твердой плоскости от поверхности жидкости. Отталкиваясь от модели объемной прочности жидкости, получается, что введение мыльного раствора в воду в любом количестве не меняет и не может изменить общего закона пропорциональности максимальной силы отрыва от площади поверхности. Но сила натяжения или напряжение в растягиваемом образце до момента отрыва зависит от удлинения в соответствии с зависимостью упругости материала от приложенного напряжения.

В предельно простом исполнении эксперимент дает следующие результаты.

- Сила притяжения цилиндров, связанных мыльной пленкой, существенно зависит от значительного числа параметров, в том числе от концентрации мыльного раствора, и от длительности проведения опыта, что среди иных факторов связано с испарением и "стеканием" вещества пленки под действием силы тяжести.

- Результаты обладают плохой повторяемостью. Ряд факторов (например, та же толщина пленки) являются случайными, переменными во времени величинами и соответствующим образом влияют на конечный результат опыта.

- Наиболее важное наблюдение заключается в том, что при небольшом отличии радиуса перетяжки от радиуса цилиндров сила притяжения возрастает с расстоянием между цилиндрами. Периметр перетяжки при этом уменьшается. Иными словами, напряжения в пленке растут с ростом внешней нагрузки, что всегда и наблюдается во

всех твердых, упругих и пластичных телах. Для объяснения этого факта в классической концепции КПН придется допустить зависимость этого параметра от приложенного напряжения.

- На больших расстояниях между цилиндрами, когда радиус перетяжки становится мал, т. е. в режиме, близком к моменту разрыва пленки, сила притяжения между цилиндрами уменьшается. Это очевидное следствие геометрического уменьшения площади поперечного сечения пленки при постоянном достигнутом пределе текучести раствора.

Возможно следующее истолкование данного опыта. Введение длинных мыльных молекул "армирует" воду (повышает когезию, коагулирует и т. п.), существенно повышая ее предел прочности (текучести) по сравнению со значением для чистой воды ( $\sigma_T \approx 40 \text{ н/м}^2$ ). Пластические и релаксационные свойства такой среды допускают образование пленок, в которых напряжения выравниваются, и раствор демонстрирует все характеристики, типичные для смол, клея, резины, полиэтлена и т.п. полимеров. Особенностью таких материалов является плавное уменьшение пластичности (увеличение жесткости) с ростом приложенного напряжения. Благодаря этому свойству выравнивается толщина пленки. В рамках представлений об объемной упругости пленок использование понятия поверхностного натяжения не требуется.

Результаты рассмотренного опыта являются серьезным аргументом в пользу "объемной" физической модели напряжений в пленке. Общепринятое представление об определяющем значении сил "поверхностного натяжения" выглядит противоречивым.

### *Опыты с цилиндрическими каркасами при наличии перетяжки*

В ряде случаев при специально подобранной схеме смачивания поверхностей между цилиндрами образуется поперечная перетяжка из той же пленки (рис. 3, а).

Вместо поверхности с двумя переменными радиусами (см. рис. 2) образуются два усеченных конуса достаточно правильной формы (см. рис. 3, б). В пределах точности измерений образующие этих конусов можно считать прямыми, за исключением областей, близких к угловым точкам, где возникают дополнительные пузырьчатые образования.

Устойчивость данной структуры в рамках модели поверхностного натяжения также невозможно объяснить. При постоянном КПН для любого участка конуса (рис. 4) элементарный закон статической устойчивости в виде  $4\pi r_1 \gamma = 4\pi r_2 \gamma$  не соблюдается. Подобная картина для разных радиусов одного конуса была бы возможна только при переменном КПН.

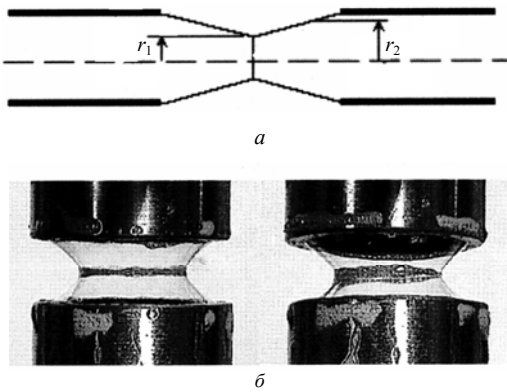


Рис. 3. Пленочное образование с перетяжкой

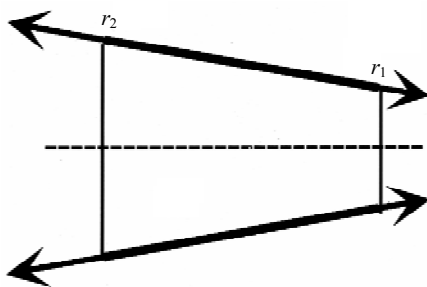


Рис. 4. Силы, действующие на конический участок структуры

Как и в ранее рассмотренном случае, гораздо более обоснованным выглядит следующий вариант соблюдения равновесия для переменных значений напряжений  $\sigma$  и толщин  $\delta$  в каждой точке рассматриваемой системы:

$$2\pi r_1 \delta_1 \sigma_1 = 2\pi r_2 \delta_2 \sigma_2.$$

В полном соответствии с законами устойчивости подобных образований напряжения и толщины в каждой точке конуса "подстраиваются" под текущую конфигурацию. Они возникают как самосогласованная реакция пленки на внешнее воздействие, в качестве которого выступает сила раздвижения цилиндров.

Важным параметром для многочисленных технических приложений, использующих поверхностное натяжение жидкостей, является понятие давления Лапласа, или давления под искривленной поверхностью жидкости [1, 2]. Детальный анализ обоснований вывода формулы Лапласа позволяет поставить под сомнение как саму зада-

чу, так и результат, выражаемый уравнением (4).

Демонстрацией справедливости уравнения Лапласа как связи поверхностного натяжения с давлением под искривленной поверхностью жидкости обычно служит опыт по перетеканию воздуха из меньшего мыльного пузыря в больший, когда они соединены капилляром [1]. Результат опыта напрямую переносят на свойства капель, полагая, что в капле имеет место то же самое увеличение давления с уменьшением ее радиуса.

Подобное обобщение некорректно в силу нескольких причин. Пленка и капля — принципиально разные объекты. Поведение жидкости в мыльной пленке, которая является неравновесным образованием, существующим только при растяжении пленки, и поведение равновесной совершенной капли, находящейся в предельно устойчивом состоянии, различны. Измерения давления в каплях неизвестны. Их постановка связана со значительными сложностями, в частности, или с необходимостью работы с предельно малыми каплями, или проведением опытов в состоянии невесомости, поскольку возможны эффекты одного порядка с силой тяжести капли умеренных размеров.

К настоящему времени признано, что экспериментов, напрямую подтверждающих повышение давления Лапласа внутри малой капли, не проведено, как нет и данных, подтверждающих справедливость уравнения Кельвина, связывающего кривизну поверхности жидкости  $r$  с равновесным давлением паров  $P$  над ней [1, 3]

$$RT \ln(P/P^0) = 2\gamma V/r.$$

Напротив, есть данные, свидетельствующие об иных зависимостях для этого параметра [4, 5]. Например, в [5] теоретически достаточно строго из термодинамических соображений показано, что для роста давления Лапласа при уменьшении размера капли нет никаких оснований.

В силу ряда причин понятие КПН не удовлетворяет ряду требований и является источником многочисленных погрешностей в конкретных вычислениях. Особенно велики ошибки определения размеров и концентрации дисперсных частиц, образующихся при конденсации паров в процессах охлаждения [1, 6]. Все подобные расчеты проводятся на основе классической теории нуклеации и опираются на КПН как на определяющую индивидуальную константу рассматриваемого рабочего тела. Значение КПН в теории нуклеации однозначно определяет размер "критического зародыша новой фазы" через давление Лапласа, и скорость роста частиц определяется уравнением Кельвина.

Стандартные методы определения КПН требуют введения больших по величине поправок даже при эталонных измерениях. Во многих работах признано, что КПН не является константой вещества, а существенным образом зависит от температуры, состава окружающей среды, формы и размеров частицы [7, 8].

Экстраполяция значений в области, недоступной для прямых измерений, приводит к абсурдным результатам или к необходимости использования еще одного ряда не особенно очевидных и обоснованных поправок. В частности, поправка Лотта и Паунда для использующих КПН формул скорости образования конденсированной фазы из пара изменяет искомое значение на множитель от  $10^{17}$  [6] до  $10^{20}$  [1]. Известны и другие противоречия теории гомогенной нуклеации, в силу которых на практике применяют эмпирические зависимости, а среда, даже предельно чистая, как правило, считается гетерогенной. Следует признать, что есть и другие задачи, использующие поверхностное натяжение в качестве базового фактора, и они также весьма далеки от исчерпывающе корректного решения. Таким образом, в силу существования целого ряда подобных фактов целесообразно продолжение поиска новых аргументов и подходов к анализу уже устоявшихся терминов, моделей и решений.

#### Опыт по прямому измерению давления Лапласа

Прямое измерение давления Лапласа в малых каплях сопряжено с большими и пока непреодолимыми экспериментальными сложностями. Абсолютная величина скачка давления для капли воды радиусом 1 мм в нормальных условиях согласно уравнению (4) близка к 1 мм рт. ст. Датчики давления для таких перепадов имеют несоизмеримо большие габариты. Уменьшение датчиков до размеров капли практически нереально из-за технических сложностей и резкого уменьшения точности. Пересечение областей надежных измерений с областями заметных перепадов давлений пока недостижимо ни при увеличении, ни при уменьшении размеров капли.

Тем не менее стоит обсудить следующий наглядный, хотя и косвенный метод проверки соотношения Лапласа. Стакан, изготовленный из несмачиваемого материала, имеет в днище отверстие заданного калибра (рис. 5). При наполнении его жидкостью согласно концепции ПН искривленная в отверстии поверхность жидкости должна выдерживать перепад давления, отражаемый формулой Лапласа. Высота удерживаемого столба воды для отверстия радиусом 1 мм должна быть весьма ощутимой — 13 мм — и при использовании от-

верстий меньшего радиуса линейно расти с его уменьшением.

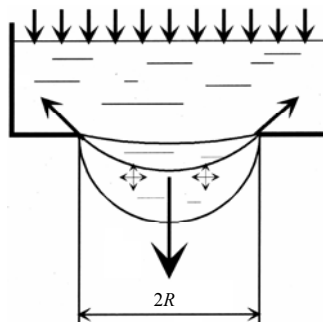
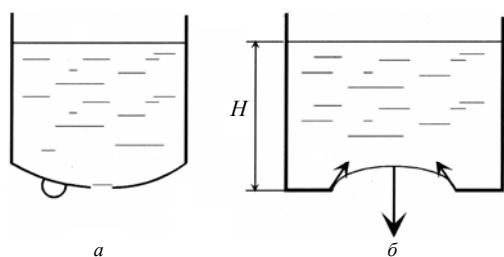


Рис. 5. Постановка опыта по измерению давления Лапласа

Результаты этого легко повторяемого и проверяемого опыта следующие.

- Высота удерживаемого столба жидкости действительно растет с уменьшением размера отверстия.
- Высота столба, как правило, в несколько раз ниже величины, предсказываемой формулой Лапласа.
- Результаты измерений нестабильны и зависят от нескольких вторичных факторов: темпа наполнения стакана жидкостью, времени пребывания в нем, особенностей изготовления отверстия и т. д.
- Разброс данных велик даже для одного отверстия в неизменных условиях опыта, что принципиально хорошо подтверждают многочисленные особенности процессов смачивания и растекания, подробно описанные в [8].
- Самый главный результат опыта состоит в том, что ожидаемая стационарная теоретическая форма объекта (см. рис. 5) не наблюдается. Выпуклый мениск не обнаруживается даже при специально изготовленном выпуклом днище сосуда (рис. 6, а). И если на свободной сплошной поверхности днища еще возможно удержание показанной на рис. 6, а "контрольной" капли, то непосредственно под отверстием подобная форма не имеет места. При потере устойчивости и переходе к "теоретической схеме" (см. рис. 5) происходит немедленное истечение всей жидкости из отверстия.

Свободная поверхность жидкости в отверстии на стационарной стадии увеличения высоты столба изогнута в другую сторону (см. рис. 6, б): столб жидкости удерживается не растянутым, а сжатым сферическим слоем! Столб жидкости удерживается не натяжением поверхностного слоя, а поверхностью свода, в пределах которого молекулы по всем законам равновесия находятся не в растянутом, а в сжатом состоянии. Иными словами, наблюдается не поверхностное натяжение, а поверхностное сжатие жидкой фазы.



**Рис. 6. Наблюдаемые результаты:**  
*a* — внешний вид стакана с контрольной каплей и отверстием; *б* — схема удержания столба

Подчеркнем, что растянутый слой жидкости не выдерживает расчетного (по формуле Лапласа) давления жидкости. Картина, представленная на рис. 5, наблюдается только в том случае, если в отверстие поместить смачиваемый материал или все дно выполнить из смачиваемого материала. Тогда схема опыта полностью соответствует ранее рассмотренному случаю отрыва капли от смачиваемого капилляра [9]. Максимальный суммарный размер высоты столба воды, удерживаемый мениском в случае смачивания пористой поверхности в отверстии, оказывается весьма малым. Он согласуется с результатами опытов по отрыву твердого тела от жидкости или капли от капилляра и не превосходит  $\Delta H \approx 0,4$  см.

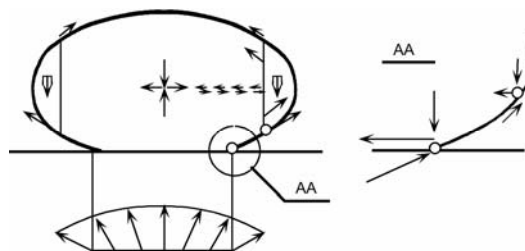
Какое-либо объяснение перечисленных эффектов в рамках классической концепции поверхностного натяжения крайне затруднительно.

**Анализ результатов**

Наиболее наглядной и ясной картина данного эффекта представляется с использованием дискретной модели связанного состояния [10] или в терминах парной потенциальной функции взаимодействия молекул. Эта функция одинакова для всех идентичных пар молекул и не зависит от места, в котором реализованы связи с ближайшим окружением. Межмолекулярные силы действуют во всем объеме жидкости. В состоянии равновесия каждая молекула совершает симметричные тепловые колебания относительно положения равновесия, и допускаются смещения относительно этого среднего положения при наличии внешней силы. В объеме жидкости могут иметь место стационарные напряжения сжатия, растяжения и сдвига. О наличии таких напряжений говорилось в работах [11, 12]. Внутри объема жидкости допустима анизотропия нагрузок, смещений и параметров колебаний молекул относительно положения равновесия.

Явления смачивания или несмачивания поверхностей в терминах парной потенциальной функции взаимодействия молекул выражаются следующим образом. Если эта функция, например, не имеет

областей притяжения, то для таких пар веществ, очевидно, поверхности смачиваться не будут, а на границе вероятно существование положительного скачка нормальных и касательных напряжений. Характер вероятных напряжений в капле, лежащей на несмачиваемой поверхности, можно представить из рис. 7. Стрелками показаны направления векторов действующих напряжений. Внизу выделены напряжения на плоской контактной поверхности, а напряжения в точке контакта трех сред отдельно вынесены в правую часть рис. 7 (AA). Очевидно, что в нижней части капли на поверхности должны иметь место напряжения сжатия. Иные схемы принципиально возможны, но требуют малореальных дополнительных условий и допущений.



**Рис. 7. Напряжения в капле на несмачиваемой поверхности**

Подобная картина наблюдается в деформируемом твердом теле, подвергаемом продольной вертикальной нагрузке на сжатие. Очевидно, что в показанной схеме тангенциальные напряжения имеют место в объеме и на границе жидкости и твердого тела. На свободной поверхности, т. е. на границе капли с окружающей атмосферой, таких напряжений не требуется. Устойчивость формы полностью обеспечивается набором объемных напряжений, который в отличие от случая совершенно свободной капли несколько усложнен наличием тангенциальных составляющих. Таким образом, свойства материала жидкой капли в очередной раз оказываются близкими к свойствам очень непрочного твердого тела, подвергаемого деформациям при предельно малых нагрузках.

Показанная на рис. 7 картина действующих напряжений полностью удовлетворяет требованиям стационарного равенства сил и моментов сил относительно любой точки рассматриваемого объекта. Любая иная схема, в частности классическая схема поверхностных натяжений, действующих только по границам сред, подобным свойством не обладает.

В рамках предлагаемого подхода опыт с несмачиваемым отверстием в днище стакана имеет совершенно четкое объяснение, вытекающее из рис. 7. В нем сумма тангенциальных и нормальных напряжений вокруг отверстия действительно

обеспечивает сжатие свода поверхности жидкости над отверстием. Всестороннее сжатие возможно до таких напряжений, при которых предел сдвиговой прочности позволяет удерживать весь столб жидкости, находящийся над отверстием.

Подчеркнем еще раз, что в классической концепции постоянно действующих сил поверхностного натяжения жидкости опыт со сводом над отверстием объяснению не поддается.

Напряжения в жидкости, как и в твердом теле, возникают только вследствие внешних воздействий в качестве реакции на них по третьему закону Ньютона. В отсутствие таких воздействий напряжений нет.

Внешние нагрузки передаются по всему объему объекта по одинаковым законам, и в массивных образцах, и в тонких пленках. Поверхность пленки не играет какой-либо особенной роли.

При превышении предела текучести жидкости, который весьма мал по абсолютной величине, жидкость приобретает форму, соответствующую внешней нагрузке.

Разрыв, нарушение целостности жидкого объекта происходит при превышении предела объемной прочности — разрыве нормальных связей между молекулами по полной аналогии с твердыми телами.

Опыты по определению сил в структурах, образуемых мыльными пленками, опровергают концепцию поверхностного натяжения и убедительно доказывают связь действующих сил с напряжениями внутри всего объема пленки.

Классические опыты по демонстрации давления Лапласа под искривленными поверхностями мыльных пленок никак не доказывают его реального существования. Эти опыты допускают альтернативную, более логичную трактовку на основе свойств объемных пленочных объектов малой толщины.

Результаты косвенного метода проверки уравнения Лапласа не подтверждают справедливость этого уравнения. Над отверстием в несмачиваемом

днище сосуда жидкость образует свод, в котором напряжения сжатия удерживают давление расположенного выше столба жидкости. По порядку величины это давление близко к давлению Лапласа, но имеет принципиально иную физическую природу и противоположное направление. Вместо поверхностного натяжения имеет место сжатие свободной поверхности жидкости над отверстием.

Существование "свода" со сжимающими напряжениями на поверхности жидкости в опыте с несмачиваемым днищем сосуда доказывает ошибочность общепринятого мнения об обязательном наличии сил поверхностного натяжения.

В свободной капле в жидкости над отверстием и в малых частицах любой конденсированной фазы давление Лапласа не имеет места, не существует. Причины для его возникновения не обнаруживаются. Это полностью согласуется с точкой зрения Ю. И. Петрова [5] и других авторов.

1. *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей. — М.: Мир, 1979. — 489 с.
2. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике: 4-е изд., испр. — М.: Наука, Физматлит, 1996. — 624 с.
3. *Everett D. H., Hagnes J. M., Mc Elroy P. J.* The Story of Anomalous Water//Science Progress, 1971. V. 59. № 235. P. 279—308.
4. *Несмеянов А. Н.* Давление пара химических элементов. — М.: АН СССР, 1961. — 396 с.
5. *Петров Ю. И.* О поверхностном натяжении и поверхностном давлении в кластерах и малых частицах//Известия РАН. Сер. физическая. 1998. Т. 62. № 6. С. 1142—1148.
6. *Горбунов В. Н., Пирумов У. Г., Рыжов Ю. А.* Неравновесная конденсация в высокоскоростных потоках газа. — М.: Машиностроение, 1984. — 200 с.
7. *Русанов А. И.* Фазовые равновесия и поверхностные явления. — Л.: Химия, 1967. — 338 с.
8. *Горюнов Ю. В., Сумм Б. Д.* Физико-химические основы смачивания и растекания. — М.: Химия. 1976. — 232 с.
9. *Иголкин С. И.* Критический анализ опытов по измерению углов смачивания и сил поверхностного натяжения// Прикладная физика. 2007. № 4. С. 43.
10. *Иголкин С. И.* Модель конденсации по механизму "пар—кристалл"//ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 9. С. 1—11.
11. *Бондаренко Н. Ф., Нертин С. В.*//ДАН СССР. 1957. 114, 833.
12. *Бондаренко Н. Ф.* ДАН СССР. 1967. 1778, 383; Ж. Физ. Хим. 1968. 42, 225.

*Статья поступила в редакцию 29 августа 2006 г.*

## Tension of a sheets suds and Laplace pressure under the bent surface of a liquid

*S. I. Igolkin*

Baltic State Technical University, St.-Petersburg, Russia

*Classical demonstrations of a "surface tension" spent using soap foam permit the alternative treatment which has not been connected with surface forces. Volumetric stresses in objects which*



---

*concern to a class of sheets, films, membranes and shells reflect that phenomena more accurately. Experiment does not confirm Laplace formula for pressure under the bent surface of a liquid, but lead to opposite result. Instead of surface stretch the compression stresses can takes place in the bent surface layers of a liquid.*

