

Новые экспериментальные исследования механизма движения жидкости в капиллярах

И. А. Кипнис¹, Ю. М. Вернигоров² Н.В, Кондратьев³

¹Научно-производственная фирма «КАСИОР», г. Москва, Российская Федерация.

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

³Научно исследовательский кино-фото институт «НИКФИ», г. Москва. Российская Федерация.

Аннотация: Предложенная Лапласом физическая модель движения жидкостей в капиллярах, и формула Жюрена, полученная на её основе, в земных условиях хорошо согласуются с экспериментом, но оказываются не применимыми в условиях невесомости. В настоящей работе экспериментально показано, что капиллярное движение жидкости обусловлено не избыточным давлением Лапласа, а лишь силами адгезии (силы Ван дер Ваальса) и когезии. Экспериментально показано, что явление капиллярного движения жидкости по поверхности твёрдого тела при их контакте имеет место в обычных условиях даже при отсутствии узких щелей или полостей малого диаметра. Авторами постулируется новая гипотеза физического механизма явления движения жидкости по поверхности тел, в том числе и в капиллярах.

Ключевые слова: капилляр, избыточное давление Лапласа, жидкость, адгезия, сила Ван дер Ваальса, когезия, мениск, гравитация, электромагнетизм, невесомость.

Введение.

Со времени открытия около 300 лет назад Леонардо да Винчи капиллярных явлений попытками создания согласованной с экспериментом теории явления занималось в разное время множество ученых. Это: Фрэнсис Хоксби (1709), Клеро (1743), фон Сегнер (1751), Джон Лесли (1802 г), Гиббс (1850), Бернулли, Релей, Максвелл, Юнг, Гаусс, Ван дер Ваальс (1869) и другие. Но только Лапласу удалось достигнуть в этой теории известной законченности и сообщить ей научную основу [1]. Лаплас полагал, что подъём воды в цилиндрическом круглом капилляре определяется тремя факторами: силами взаимодействия между молекулами жидкости (когезия), силами взаимодействия между жидкостью и молекулами стенок капилляра (адгезия) и действием силы тяжести. Влияние третьей фазы воздуха Лаплас не учитывал. Суммарное действие этих сил по Лапласу приводит к возникновению мениска и силы поверхностного натяжения жидкости в нём,

которая обеспечивает так называемое **избыточное давление Лапласа** (разность давлений в соседних жидкой и газообразной фазах, граница которых - искривленная поверхность) и подъём воды в капилляре. На основании этой модели Жюреном была получена формула расчета высоты подъема воды h в вертикальном капилляре с внутренним радиусом r , погруженном в жидкость плотности ρ , которая носит название закон Жюрена [2, 3]:

$$h = 2\sigma \cos \theta / (\rho g r), \quad (1)$$

где: σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости в мениске капилляра, θ – краевой угол смачивания.

В [4] показано, что в условиях невесомости физическая модель капиллярных явлений, построенная Лапласом, неприменима, поскольку в невесомости сила тяжести отсутствует ($g=0$), избыточное давление Лапласа также отсутствует, а капиллярные явления сохраняются. Формула Жюрена в этих условиях также неприменима, так как по ней высота подъема жидкости при отсутствии силы тяжести стремится к бесконечности.

Кроме того, в (1) при $\theta = 90^\circ$ $h = 0$ независимо как от радиуса капилляра, так и от плотности самой жидкости. Избыточное давление Лапласа при этом отсутствует. В литературных источниках не содержится сведений о жидкостях, обладающих такими свойствами. Но при этом без указания конкретных жидкостей высказано предположение, что такой угол смачивания могут иметь некоторые силиконовые и минеральные масла. Такое поведение жидкости могло бы иметь место, если силы адгезии и когезии были бы примерно равны или не происходило межмолекулярного взаимодействия между капилляром и жидкостью. При $\theta > 90^\circ$ $h < 0$, то есть жидкость в капилляре опускается (например ртуть). Какая сила заставляет в этом случае жидкость опускаться неизвестно.

В [4] сформулирована требующая дополнительных исследований гипотеза о том, что существует иной общий физический механизм движения жидкости в капиллярах, справедливый как в поле силы тяжести, так и при её отсутствии, а само явление капиллярности обязано только действию сил когезии и адгезии (силы Ван дер Ваальса). Необходимо также выяснить степень влияния на капиллярные явления третьей, исключённой Лапласом из рассмотрения, фазы (молекул воздуха) на границах раздела с жидкостью и стенками капилляра. Это позволит обосновать необходимость построения новой физической модели капиллярных явлений, в которых возникшие противоречия устранены.

Цель работы.

Экспериментально показать, что капиллярные явления обусловлены только взаимодействием сил когезии и адгезии. Это явится основанием для построения новой непротиворечивой модели подъёма и движения жидкостей по поверхности тел, в том числе и в капиллярах.

Основная часть.

Движение жидкости в капиллярах происходит на границе раздела трех фаз: твердое тело – жидкость – воздух. При построении физической модели капиллярности Лаплас исключил из рассмотрения влияние воздушной фазы на подъем жидкости. Но на границе раздела трех фаз молекулы воздуха взаимодействуют, как с молекулами поверхности жидкости, так и с молекулами стенки капилляра в условиях присутствия сил гравитации.

Теоретический расчёт этого взаимодействия невозможен из-за отсутствия в литературе сведений о величинах сил, возникающих при взаимодействии фаз. Но из молекулярной физики известно, что давление воздуха на поверхности раздела фаз зависит от его плотности. При увеличении плотности уменьшается средняя длина свободного пробега молекул воздуха и увеличивается количество их ударов о поверхность

контактирующих с воздухом фаз. С уменьшением атмосферного давления, а, следовательно, и плотности взаимодействие молекул воздуха с соседними фазами уменьшается, но при этом увеличивается их длина свободного пробега.

Средняя длина свободного пробега молекул воздуха $\langle \lambda \rangle$ и давление газа p определяются следующими соотношениями [2]

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 n}}, \quad p = nkT, \quad (2)$$

где d - эффективный диаметр молекулы воздуха, n - число молекул в 1 м^3 , k - постоянная Больцмана, T - термодинамическая температура.

Из (2) следует

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 p}} \quad (3)$$

Полагая $p = P_0 = 101325 \text{ Па} = \text{const.}$ (атмосферное давление при нормальных условиях), а изменяемое давление $P_i \leq P_0$, при прочих равных условиях можно записать соотношение, показывающее во сколько раз, изменяется $\langle \lambda \rangle$ при изменении давления P_i в виде

$$\frac{\langle \lambda \rangle_{|P_i}}{\langle \lambda \rangle_{|P_0}} = \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 P_i}} : \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 P_0}} = \frac{P_0}{P_i} \quad (4)$$

Расчёты по соотношению (4) представлены в таблице №1.

Таблица №1.

Зависимость нормированной длины свободного пробега молекул воздуха от его давления.

P_i	$0,01 P_0$	$0,1 P_0$	$0,2 P_0$	$0,3 P_0$	$0,4 P_0$	$0,5 P_0$	$0,8 P_0$	P_0
$\frac{\langle \lambda \rangle_{ P_i}}{\langle \lambda \rangle_{ P_0}}$	100	10	5	3,33	2,5	2	1,25	1

Из таблицы №1 видно, что при высокой степени разрежённости воздуха $\langle \lambda \rangle_{|P_i}$ в 100 раз больше $\langle \lambda \rangle_{|P_0}$. При этом во столько же раз слабее

воздух взаимодействует с жидкостью и стенкой капилляра, а следовательно должен меньше влиять на подъём воды в капилляре. Видно также, что чем меньше разрежен воздух, тем сильнее его взаимодействие с вышеупомянутыми фазами.

Вышеизложенное требует экспериментального подтверждения.

Оценить степень участия в явлении капиллярного движения жидкости каждой из взаимодействующих фаз можно удалив одну из них. Единственный способ – избавиться от воздушной фазы, поместив капилляр с жидкостью под вакуумный колпак и откачав воздух. При этом, если воздух оказывает влияние на движение воды в капилляре (та самая разница давлений над и под мениском по Лапласу), то в оставшихся двух фазах жидкость – твердое тело должно произойти перераспределение сил взаимодействия и по мере откачивания воздуха мениск должен изменять свою форму. Если такое изменение происходит, то по его степени можно будет судить о доле участия воздушной фазы в капиллярном процессе. Если изменения не произойдёт, то можно утверждать, что воздушная фаза не принимает участия в процессе капиллярного движения жидкости.

Для чистоты эксперимента необходимо исключить влияние гравитации, предоставив взаимодействовать только жидкости и стенке капилляра.

И если удалить воздушную фазу достаточно легко, то исключить влияние гравитации значительно труднее.

Первый эксперимент проведен с целью оценить степень влияния воздушной фазы на подъём жидкости в капилляре в условиях отсутствия влияния гравитации.

Схема экспериментальной установки, показана на рисунке.1.

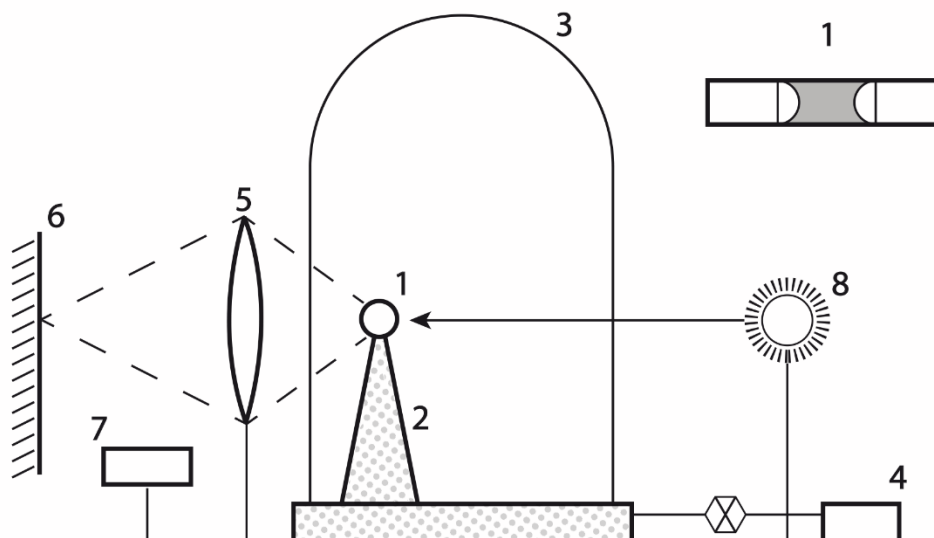


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки. Пояснения по тексту.

Методика проведения эксперимента.

Для эксперимента (см. рис.1) был использован цилиндрический стеклянный капилляр (1) с внутренним диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, наружным $4,5 \cdot 10^{-3}$ м и длиной 10^{-1} м. Капилляр на стеклянных опорах (2) помещался под стеклянный колпак (3) вакуумного стола. Объём колпака 2,4 л. С помощью форвакуумного насоса (4) производительностью 42 л/мин обеспечивалось снижение давления воздуха под колпаком от атмосферного до 20 Па. Температура воздуха 19°C . Регистрация процесса производилась с помощью линзы (5), фокусирующей изображение на экран (6) и видеосъемки (7) с последующей покадровой обработкой. Источник света – светодиодная лампа (8).

В качестве жидкости использована дистиллированная вода. Поскольку дистиллированная вода содержит в своём составе значительное количество CO_2 , который может выделяться из воды при понижении давления под

вакуумным колпаком (холодное кипение), производилось предварительное его удаление. Для этого небольшое количество воды в мензурке помещали под вакуумный колпак и последовательной откачкой воздуха добивались снижения порога начала холодного “кипения” воды от $0,4 P_0$ до $0,2 P_0$. Сам эксперимент производился выше достижения порога “кипения” в диапазоне изменения давления воздуха от P_0 до $0,3 P_0$.

С помощью шприца небольшое количество очищенной от газа воды вводилось в капилляр, где образовывался её столбик высотой $\sim 10^{-2}$ м. Для исключения влияния на результаты эксперимента гравитации капилляр устанавливался в горизонтальном положении на опоры. При этом мениски образовывались с обеих концов водяного столбика. В таком положении капилляра действие гравитации на водяной столбик уравнивалось реакцией опоры и по мере откачки воздуха во взаимодействии оставались только две фазы жидкость и капилляр.

Результаты эксперимента показали, что положение и форма менисков в капилляре при удалении воздуха не изменяются. Это значит, что капиллярный подъем жидкости обусловлен только силами адгезии и когезии. Гравитация также не является причиной капиллярных явлений, хотя бы потому, что они в полной мере имеют место в невесомости.

Приведенные выше результаты экспериментов позволили сформулировать следующую гипотезу. Если капиллярные явления – продукт взаимодействия только жидкости и твёрдого тела, то эти же явления должны иметь место в обычных условиях при контактах жидкости и твёрдого тела, не требующих наличия узких щелей или полостей малого диаметра. Для подтверждения этой гипотезы была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 2.

Цель проведения этой серии экспериментов – выяснить как взаимодействуют жидкость и твердое тело в условиях отсутствия узких щелей и полостей малого диаметра.

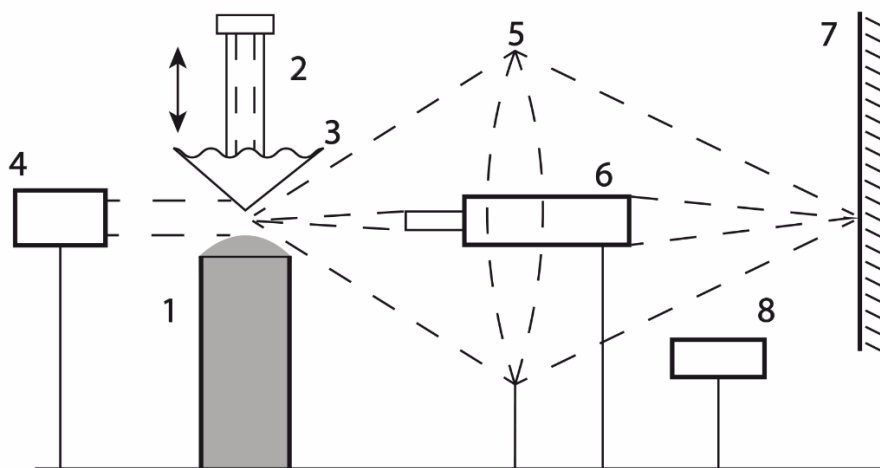


Рис. 2. – Схема экспериментальной установки. Пояснения по тексту.

Методика проведения экспериментов.

К поверхности воды, полностью заполняющей кювету (1), выполненную из оптического стекла, с помощью укрепленного на штативе микрометрического винта (2) опускалось прикреплённое к нему экспериментальное тело (3). В качестве экспериментальных тел использовались: стеклянная пластинка из оптического стекла (размерами: длина - $5,3 \cdot 10^{-2}$ м, ширина - $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, толщина - $1,5 \cdot 10^{-3}$), торец тонкого стеклянного стержня диаметром $\sim 9 \cdot 10^{-6}$ м, полученного путём растягивания стеклянной палочки в пламени газовой горелки, а также ряд других тел.

Наблюдение и регистрация взаимодействия поверхностей экспериментальных тел и жидкости проводилось на микроскопических расстояниях между ними при их сближении и в момент контакта. Для возможности визуализации и наблюдения процесса в динамике область взаимодействия освещалась мощным лазером (4) с длиной волны 530 нм или

мощным светодиодом белого цвета. С помощью линзы (5) или измерительного микроскопа (6), сфокусированных на область взаимодействия, изображение происходящего проецировалось прямо на экран (7), на котором проводились наблюдения и с которого видеокамерой (8) производилась видеозапись происходящего. Вода в кювете наливалась “горкой” чуть выше её краев, как показано на рис.2, а пробное тело подводилось к “вершине” этой “горки”. Это исключало попадание краёв кюветы в область наблюдения. Но хотя при этом объём воды, доступный для эксперимента, ограничивался объёмом самой “горки”, наблюдение взаимодействия пробного тела и поверхности воды было возможным.

В качестве примера результаты проведенного эксперимента в виде пяти

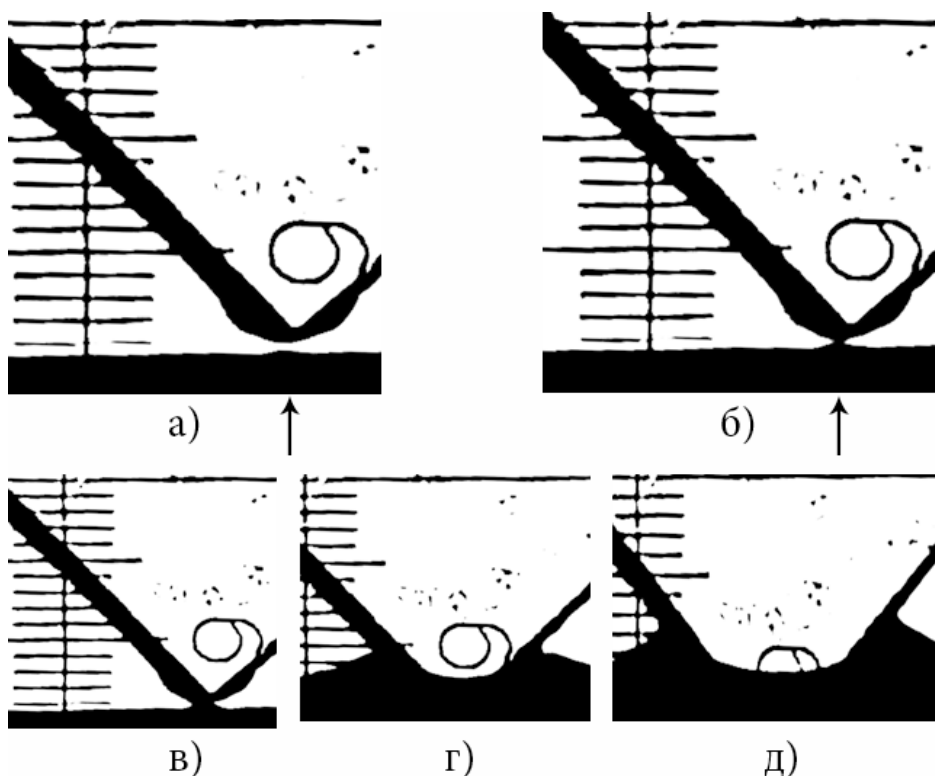


Рис. 3. – Подъем воды у угла пластинки. Скорость съемки 320 кадров в секунду. Цена деления измерительного микроскопа $\sim 17 \cdot 10^{-6}$ м.

Пояснения по тексту.

последовательных видео кадров представлены на рис 3, из которого видно, что происходит между поверхностью воды и опускаемой к ней углом стеклянной пластинки. До начала взаимодействия поверхность воды остается в покое. При опускании угла пластинки к поверхности воды замечено, что в момент начала взаимодействия поверхность воды начинает приподниматься вверх как бы притягиваясь к пластинке (рис. 3а↑), достигая максимума подъема у угла пластинки. В дальнейшем, когда угол пластинки почти касается поверхности воды, между ними возникает водный тяж (рис. 3б↑) и происходит скачкообразный подъем воды по поверхности пластинки (рис. 3в, г, д).

Аналогичная картина наблюдается при проведении эксперимента с другими пробными телами.

Отсутствие на момент проведения эксперимента высокоскоростной видео камеры не позволило провести более детальный анализ процесса.

Замечено также, что в результате скачкообразного подъема вода достигает некоторой высоты h , и по мере удаления l от поверхности пластинки профиль смачивающей ее воды принимает вид, как на рис. 4.

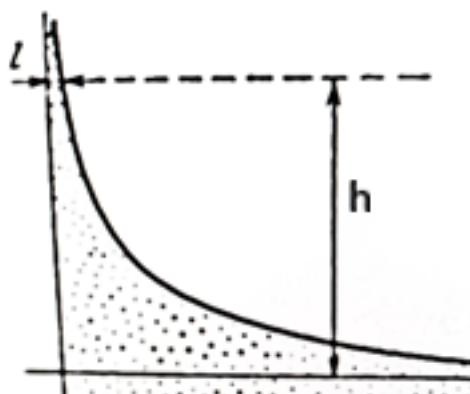


Рис. 4. – Зависимость высоты подъема воды от удаления от поверхности пластинки.

Обсуждение результатов.

Проявление сил ван-дер-ваальсова взаимодействия в поверхностных эффектах рассмотрено, например, в ряде учебной [5, 6, 7], научной, [8, 9, 10] литературе и многочисленных опубликованных работах, посвященных этому вопросу. Наиболее полно это отражено в обзорной монографии [11], где собрано и проанализировано более 900 теоретических и экспериментальных работ, посвященных силам Ван дер Ваальса, называемым иначе молекулярными силами – силами притяжения между атомами и молекулами на больших расстояниях. Сила Ван дер Ваальса W , проявляющаяся при электромагнитном взаимодействии атомов и молекул, имеет три составляющие: ориентационное, индукционное и дисперсионное взаимодействия и может быть записана в виде.

$$W = W_{\text{ориент.}} + W_{\text{инд.}} + W_{\text{дисп.}} \sim 1/r^6$$

Эти три составляющие силы Ван-дер-Ваальса различны по своей физической природе, но их потенциал зависит от расстояния r между молекулами одинаково, как $1/r^6$.

Для ван-дер-ваальсова взаимодействия характерной является область расстояний от нескольких Ангстрем до нескольких тысяч Ангстрем. По сравнению с размерами атомов эти расстояния относятся к макроскопическим масштабам. При взаимодействии больших макроскопических тел силы Ван дер Ваальса проявляют себя в узком слое вблизи поверхности. Поэтому их относят к классу поверхностных сил ([11] стр.22). О порядке величины силы Ван дер Ваальса и изменения её с расстоянием можно судить по величине этой силы, приходящейся на единицу площади, полученной теоретически для слюдяных и кварцевых пластин, разделённых пустой щелью шириной l ([11] стр.267), приведенной в таблице №2

Таблица №2.

Зависимость сил Ван дер Ваальса от расстояния между слюдяной и кварцевой пластинами.

$l, \text{\AA}$ ($l, \text{мкм}$)	1 (0,0001мкм)	10 (0,001мкм)	100 (0,01 мкм)	1000 (0,1 мкм)	10000 (1 мкм)
$W, \text{дин/см}^2$	$4,8 \cdot 10^{10}$	$4,73 \cdot 10^7$	$3,51 \cdot 10^4$	8,46	$1,47 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы №2 следует, что силы Ван дер Ваальса наиболее велики на расстояниях порядка единиц Ангстрем и уменьшаются примерно в 10^3 раз при каждом последовательном десятикратном увеличении l . Из этой таблицы также видно, что силы Ван дер Ваальса начинают воздействовать на диполи жидкости на расстоянии $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ м. Поэтому для визуализации момента начала их электромагнитного взаимодействия требуется высокоскоростная съёмка. Но данные таблицы 2 вполне согласуются со сведениями, приведенными в обширном обзоре [12] по изучению растекания жидкости по подложке. Показано, что впереди фронта жидкости движется тонкая пленка толщиной порядка $100 \text{ \AA}$, именуемая автором прекурсионная, которая располагается перед линией трехфазного контакта. Показано также, что образование такой пленки обязано действию поверхностных сил Ван дер Ваальса, которые не зависят от наличия или отсутствия гравитации. Установлено также, что диссипация энергии из-за **вязкого трения** в такой пленке очень велика и **имеет место градиент её поверхностного натяжения**.

Для того, чтобы оценить вклад тех или иных сил в процесс капиллярного подъёма жидкости надо сравнить величины этих сил. Порядок величины сил Ван дер Ваальса приведен в таблице 2. Оценим величину силы гравитации. Для этого воспользуемся имеющимися в литературных

источниках сведениями о размерах прекурсионной плёнки [12, 13]. Установлено, что толщина её при растекании жидкости на горизонтальной поверхности, а также при подъёме воды в капилляре составляет $\sim 100 \text{ \AA}$ [12, 13] при высоте $\sim 10^{-2} \text{ м}$ [13]. На внутренней поверхности капилляра, например с внутренним диаметром 10^{-3} м эта пленка образует “прилипший” к нему полый цилиндр из жидкости с толщиной стенки $\sim 100 \text{ \AA}$ (10^{-8} м) и высотой $\sim 10^{-2} \text{ м}$. Вес P такого цилиндра в случае воды составляет $\sim 10^{-10} \text{ Н}$. Давление p этого водного цилиндра на нижележащие под ним слои воды при этом составляет $\sim 10^2 \text{ Н/м}^2$ или 10^3 дин/см^2 . Сравнивая эти величины с данными таблицы 2 можно видеть, что сила электромагнитного взаимодействия между стенками капилляра и прилегающими слоями жидкости, действующая на “прилипший” цилиндр примерно в 10^{20} раз больше сил гравитации. Следовательно, основной вклад в подъём воды осуществляется силами Ван дер Ваальса, а влияние гравитации пренебрежимо мало.

Силы Ван дер Ваальса по мере удаления от поверхности твердого тела уменьшаются пропорционально $1/r^6$ и, начиная с некоторого расстояния, молекулы воды обретают всё большую подвижность: роль сил когезии возрастает. Этот результат хорошо согласуется с данными таблицы 2. При этом между слоями воды с разной подвижностью возникает напряжение сдвига, которое при достижении некоторой величины и обеспечивает скачкообразный подъём воды, который наблюдается в проведенных нами экспериментах. Скачкообразный подъём воды в капилляре также зафиксирован в [12] при исследовании свойств жидкости в капиллярной гидродинамике.

Нелинейность профиля жидкой плёнки, смачивающей вертикально стоящую пластику (см. рис. 4) объяснена в [11], где было показано, что $l(h)$, при разных условиях пропорциональна либо $\sim h^{-1/3}$, либо $\sim h^{-1/4}$.

Современной физике известны всего четыре силы, существующие в природе. Это: силы гравитации, силы электромагнитного взаимодействия и силы сильного и слабого ядерного взаимодействия. Поэтому силы Ван дер Ваальса – единственные реальные силы, обеспечивающие капиллярные явления и эти силы могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания [11], что объясняет поведение движения жидкости в капилляре.

Всё вышеизложенное подтверждает справедливость полученных результатов.

Выводы.

1. Экспериментально в отсутствии влияния гравитации установлено, что воздушная фаза не принимает участия в процессе движения жидкости в капилляре, а сам капиллярный эффект обусловлен только взаимодействием сил адгезии (сил Ван дер Ваальса) и когезии.

2. Показано, что гравитация также не влияет на явление капиллярного движения, так как при устранении её влияния в эксперименте форма менисков и водяной столбик остаётся неизменным, то есть он оказывается нечувствительным к её отсутствию. Гравитация также не является причиной капиллярных явлений, ещё хотя бы потому, что они в полной мере имеют место в невесомости, где силы гравитации отсутствуют, а действуют только силы межмолекулярного взаимодействия. В невесомости отсутствует также, положенное основу теории капиллярных процессов понятие «**избыточное давление Лапласа**», на основании которого в земных условиях объясняется и рассчитывается капиллярный подъём жидкости.

3. Экспериментально показано, что явление подъёма (или продвижения) жидкости по поверхности твёрдого тела при их контакте имеет место в обычных условиях даже при отсутствии узких щелей или полостей малого диаметра.

4. Экспериментально показано, что взаимодействие твёрдого тела и жидкости начинается еще до их прямого контакта: поверхность жидкости начинает приподниматься в сторону твердого тела. Объяснить это возможно только началом между ними межмолекулярного взаимодействия, имеющего электромагнитную природу. При этом, сам факт подъёма поверхности жидкости свидетельствует о превосходстве сил Ван дер Ваальса над силами гравитации, одновременно действующими на приповерхностный слой жидкости.

5. При расстояниях сближения пробного тела и поверхности жидкости в несколько микрон между ними возникает водяной тяж, который и определяет их прямой контакт. При дальнейшем сближении жидкость скачкообразно поднимается по телу, образуя нелинейный профиль поверхности в зоне контакта, как показано на рис. 4. Всё вышеизложенное свидетельствует о необходимости разработки новой единой теории капиллярных явлений справедливой, как при наличии, так и при отсутствии гравитации.

6. Авторами постулируется следующая гипотеза физического механизма явления подъема жидкости по поверхности тел, в том числе и в капиллярах. Наибольшую силу притяжения имеют молекулы жидкости, непосредственно граничащие с твердым телом и ближайшие к ним. В этой зоне одновременно действуют, как силы адгезии, так и силы когезии, имеющие электромагнитную природу. Но на расстоянии в несколько десятков слоёв молекул жидкости от поверхности тела силы Ван дер Ваальса значительно превосходят силы когезии. Поэтому молекулы жидкости, удалённые от поверхности тела на расстояние, например, до $10 \text{ \AA}$ находятся не только под действием сил притяжения молекул твердого тела, находящихся под поверхностью жидкости $W_{\text{под}}$, но и под суммарным силовым воздействием молекул поверхности твердого тела $\Sigma W_{\text{над}}$,

находящихся над поверхностью жидкости. Поскольку над поверхностью жидкости противодействия сил когезии нет, жидкость под действием $\Sigma W_{\text{над}}$ начинает двигаться по поверхности тела, образуя прекурсионную плёнку. Поскольку силы Ван дер Ваальса быстро убывают с расстоянием от поверхности тела, то происходит постепенное перераспределение степени участия их воздействия на молекулы жидкости. В какой-то момент расстояние станет таковым, что силы когезии станут равными силам Ван дер Ваальса и последующие слои жидкости будут находиться только под действием сил когезии, подъём жидкости прекратится и при дальнейшем увеличении расстояния поверхность жидкости станет плоской. Останется только криволинейный профиль смачивания у поверхности твёрдого тела. Это легко представить себе, мысленно увеличивая внутренний диаметр капилляра: с какого-то момента мениск исчезнет, но у стенки капилляра подъём жидкости сохранится, как и показано нашими экспериментами. Кроме того, поскольку диссипация энергии из-за вязкого трения при подъеме жидкости велика и имеет место градиент её поверхностного натяжения, то между слоями жидкости появляется напряжение сдвига, которое также вносит свой вклад в наблюдаемый процесс её подъёма. Этим и обусловлено образование мениска, форма которого не зависит от гравитации.

Литература

1. Laplace P.S. Trait de Mécanique Cèleste; Supplement to the tenth book, On Action. Capillary (1807); in: Complete works of Laplace, v. 4 Gauthiers-Villars, Paris, 1880, pp. 349 - 419.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. Учебник для вузов, изд. Лань 2023 г. 436 с.
3. Яворский Б.М. - Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. 8-е изд., 2022. - 1055 с

4. Кипнис И.А., Вернигоров Ю.М., Кондратьев Н.В. О подъеме воды в капилляре или насколько прав был Лаплас. Экология 2023 – море и человек. Сборник трудов X11 Всероссийской научной конференции и молодёжной школы-семинара, Таганрог, 21-23 сентября 2023. Изд. Южного федерального университета 2023, 20 – 26 с.
5. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. - М.: Химия, 1988. – 464 с.
6. Рубин А.Б. Биофизика: Теоретическая биофизика. - М.: Книжный дом Университет, 1999. – 448 с.
7. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с
8. Дзялошинский И Е, Лифшиц Е М, Питаевский Л. П. Общая теория ван-дер-Ваальсовых сил. УФН 73 (1961) 381. – 422 с.
9. Ландау Л.Д. Квантовая механика: Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1989. – 767 с.
10. Gibbs J.W. Trans. Conn. Acad., 1878, v.3, Термодинамические работы. М. – Л., Гостехиздат, 1950, 343 р.
11. Бараш Ю.С. Силы Ван-дер-Ваальса. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. - 344 с.
12. Де Жен П. Ж. Смачивание: статика и динамика. Успехи физических наук, 1987, Т. 151, вып. 4, 619 – 678 с.
13. Кирколуп Е.Р. Разработка устройств для исследования свойств жидкости в капиллярной гидродинамике. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, ВПО «Алтайский государственный университет», Барнаул, 2008, 24. с.

Referens.

1. Laplace P.S. Trait de Mécanique Cèleste; Supplement to the tenth book, On Action. Capillary (1807); in: Complete works of Laplace, v. 4 Gauthiers-Villars, Paris, 1880, pp. 349 - 419.
 2. Savel'ev I.V. Kurs obshchei fiziki. Tom 1. Mekhanika. Molekuliarnaia fizika. [Course of general physics. Volume 1. Mechanics. Molecular physics]. Uchebnik dlia vuzov, izd. Lan. 2023. 436 p.
 3. Yavorskij B.M. - Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov vuzov. 8-e izd., [Handbook of Physics for engineers and university students. 8th ed.,] 2022. 1055 p.
 4. Kipnis I.A., Vernigorov Yu.M., Kondrat'ev N.V. Sbornik trudov XII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii i molodezhnoi shkoly-seminara, Taganrog, 21-23 sentiabria 2023. Izd. Iuzhnogo federalnogo universiteta. 2023, 20-26. p.
 5. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoi khimii. [Course of colloidal chemistry]. M.: Khimiia, 1988. 464 p.
 6. Rubin A.B. Biofizika: Teoreticheskaja biofizika. [Biophysics: Theoretical biophysics]. M.: Knizhnyi dom Universitet, 1999. 448 p.
 7. Adamson A. Fizicheskaja khimiia poverkhnostei. [Physical chemistry of surfaces]. M.: Mir, 1979. 568 p.
 8. Dzyaloshinskij I E, Lifshicz E M, Pitaevskij L. P. Obshhaya teoriya van-der-Vaal'sovy`x sil [General theory of van der Waals forces]. UFN 73 (1961), 381-422 p.
 9. Landau L.D. Kvantovaja mekhanika: Nerelativistskaja teoriia. [Quantum mechanics: A non-relativistic theory]. M.: Nauka, 1989. 767 p.
 10. Gibbs J.W. Trans. Conn. Acad., 1878, v.3, Termodinamicheskie raboty. M. L., Gostekhizdat, 1950, 343 p.
 11. Barash Yu.S. Sily Van-der-Vaalsa. [Van der Waals forces]. M.: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. 344 p.
-



12. De Zhen P. Zh. Wetting: statics and dynamics. Successes Physical Sciences, 1987, vol. 151, issue 4, pp. 619 – 678.

13. Kirkolup E.R. Razrabotka ustroystv dlia issledovaniia svoistv zhidkosti v kapilliarnoi gidrodinamike. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of devices for studying the properties of liquids in capillary hydrodynamics]. VPO «Altaiskii gosudarstvennyi universitet», Barnaul, 2008, 24 p.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 2.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025