ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
XII 1950 4

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Г. И. Тер-Степанян

О глубине капиллярного опирания жидкости

(Представлено А. А. Акопяном 14 X 1950)

Хотя и нет никакого принципиального различия в движении жидкости в капиллярных трубках в зависимости от их направления, теория капиллярности развивалась, главным образом, в применении к случаю капиллярного поднятия (2). Между тем случай, когда жидкость перемещается в противоположном направлении, имеет некоторые особенности, могущие представить известный интерес. В настоящей заметке излагаются условия равновесия жидкости в капиллярной трубке, верхний конец которой погружен в сосуд с жидкостью, а нижний конец расположен ниже уровня жидкости в сосуде. Такой случай может иметь место, когда в сосуд погружена изогнутая капиллярная трубка. Как известно, жидкость проникает в трубку и, опустившись, образует у нижнего конца ее выпуклый мениск, на который как бы опирается висящий столбик жидкости. Определим глубину *капиллярного опирания** жидкости, понимая под этим выражением ту наибольшую глубину, на которую может отстоять поверхность выпуклого мениска от уровня жидкости в сосуде.

Механизм капиллярного опирания с энергетической точки зрения можно понять следующим образом. Вследствие смачивания стенок капиллярной трубки жидкостью возникает равновесный краевой угол, вызывающий искривление поверхности жидкости. Кривизна этой поверхности определяется величиной краевого угла и кривизной стенок трубки. Свободная поверхностная энергия образовавшегося таким образом мениска создает разность давления, заставляющую жидкость перемещаться в сторону центра кривизны мениска, в данном случае вниз; к этому давлению прибавляется влияние веса жидкости, находящейся выше поверхности мениска. Под совместным действием этих двух дав-

* Мы сознательно выбрали термин „опирание", а не напрашивающийся „опускание", так как это последнее выражение кажется более уместным применить в случае опускания жидкости в капиллярной трубке, вызванном несмачиванием стенок трубки жидкостью, как, например, опускание столбика ртути в стеклянной трубке, погруженной в сосуд со ртутью.

лений, жидкость перемещается вниз по капиллярной трубке, сохраняя форму мениска. Процесс смачивания стенок трубки опережает движение по трубке.

Когда краевой угол перемещающегося мениска достигает конца капиллярной трубки, вышеуказанные силы продолжают перемещать жидкость вниз; при этом кривизна поверхности мениска уменьшается, что ведет к уменьшению добавочного давления, возникающего выше поверхности мениска вследствие искривления его поверхности.

В момент, когда при таком перемещении жидкости и выправлении поверхности мениска, последний сделается плоским, добавочное давление, согласно формуле Лапласа, делается равным нулю, и дальнейшее движение жидкости происходит только под действием гидростатического давления жидкости. Так как смоченный край уже не может опускаться ниже, здесь должен образовываться выпуклый мениск. По мере увеличения кривизны этого мениска, выше него создается добавочное давление, направленное уже кверху, т. е. в сторону, обратную действию гидростатического давления.

Радиус кривизны R получающегося таким образом выпуклого мениска определяется из того условия, чтобы добавочное давление, образующееся выше него, уравновесило давление, оказываемое весом жидкости

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho g y, \tag{1}$$

где α — поверхностное натяжение жидкости, ρ — ее плотность, g — ускорение силы тяжести и y — вертикальное расстояние между уровнем жидкости в сосуде, с которым сообщается капиллярная трубка, и нижним краем этой трубки.

Из рисунка видно, что между радиусом кривизны мениска R и внутренним радиусом трубки r_1 существует соотношение

$$R = \frac{r_1}{\sin\varphi}, \tag{2}$$

где φ — угол, образуемый касательной плоскостью к поверхности мениска с торцовой поверхностью трубки.

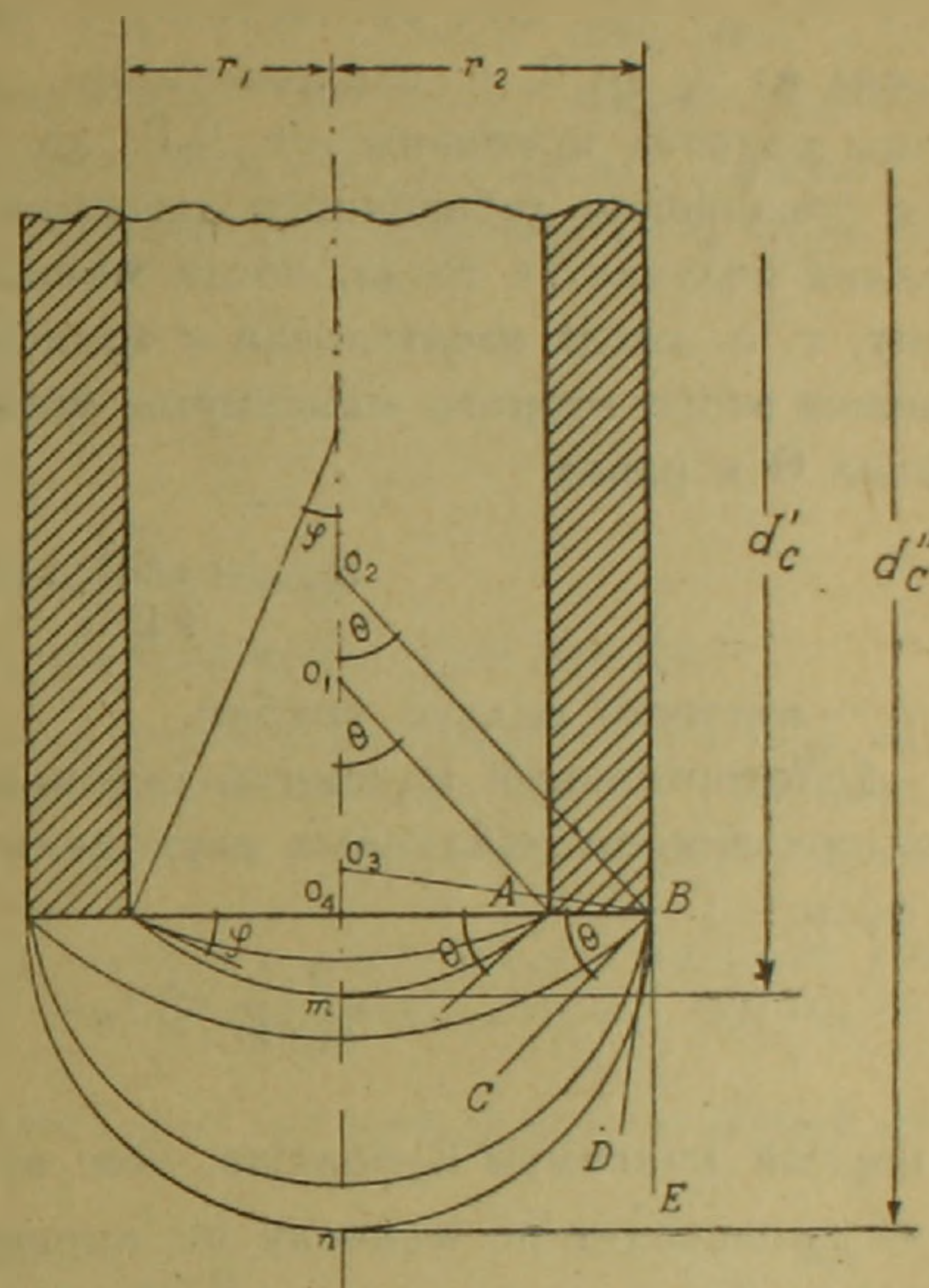
Подставляя значение R из (2) в (1), находим глубину опирания y

$$y = \frac{2\alpha \sin\varphi}{\rho g r_1}. \tag{3}$$

Максимальное значение глубины капиллярного опирания получится из (3), когда величина краевого угла φ сделается равной предельному значению краевого угла смачивания Θ между жидкостью и твердым телом, что соответствует радиусу кривизны мениска O_1A; обозначая эту максимальную глубину через d_c, получим:

$$d_c = \frac{2\alpha \sin\Theta}{\rho g r_1}. \tag{4}$$

Если действительное расстояние между уровнем жидкости в сосуде и нижним концом трубки y меньше, чем максимальная глубина d_c', определяемая из (4), то устанавливается равновесие, а мениск занимает какое-то промежуточное положение между плоскостью (при $y = 0$) и предельным мениском m (при $y = d_c'$).



Если же это расстояние y больше, чем максимальная глубина d_c', то равновесие не может установиться и жидкость продолжает прибывать в трубку.

При увеличении количества жидкости в трубке начинается передвижение смоченного края мениска по торцовой поверхности трубки от A до B, причем величина предельного угла смачивания Θ остается постоянной. Одновременно центр кривизны мениска перемещается от O_1 до O_2.

Предел такому перемещению смоченного края ставится в тот момент, когда он достигает внешнего края капиллярной трубки B, а радиус кривизны мениска равняется O_2B. При дальнейшем увеличении количества жидкости в мениске касательная BC, образующая краевой угол Θ, начинает поворачиваться от положения BC до положения BD, которое определяется из того условия, чтобы соответствующий ему радиус кривизны мениска O_3B равнялся O_1A. В течение всего этого процесса „подъемная сила" мениска вначале уменьшается и достигает минимума, когда радиус кривизны мениска составляет O_2B, а затем вновь увеличивается. В момент, когда радиус кривизны достигает O_3B, величина добавочного давления, определяемого формулой Лапласа, делается равной тому давлению, которое имело место в начале перехода, так как, как указывалось, радиусы кривизны O_1A и O_3B равны друг другу. Так как сам переход был вызван тем обстоятельством, что максимальная глубина капиллярного опирания d_c', определяемая радиусом кривизны O_1A, была недостаточной по сравнению с действительным расстоянием y между уровнем жидкости в сосуде и нижним краем капиллярной трубки, то, естественно, что в течение всего описанного перехода жидкость в мениске не может находиться в состоянии равновесия.

При дальнейшем увеличении количества жидкости в мениске, касательная к смоченному краю продолжает поворачиваться от положения BD до BE. Это соответствует перемещению центра кривизны мениска из O_3 до O_4 и, следовательно, дальнейшему уменьшению величины радиуса кривизны от O_3B до O_4B. В результате происходит новое увеличение добавочного давления. Максимальное значение этого давления получается тогда, когда мениск принимает полусферическую форму, т. е. когда касательная к краю мениска делается вертикальной. Величина этого второго максимума *независима* от величины угла смачивания θ и равна

$$d_c'' = \frac{2\alpha}{\rho g r_2}, \tag{5}$$

где r_2 — внешний радиус трубки.

Действительный максимум глубины капиллярного опирания получится сравнением найденных двух значений (4) и (5). Легко видеть, что если

$$\frac{r_1}{\sin\Theta} < r_2, \tag{6}$$

то первый максимум d_c больше, чем второй d_c'', и максимальное опирание происходит по мениску m, имеющему форму шарового сегмента радиуса $\frac{r_1}{\sin\Theta}$.

Если же

$$\frac{r_1}{\sin\Theta} > r_2, \tag{7}$$

то второй максимум больше, чем первый, и максимальное опирание происходит по полусферическому мениску n радиуса, равному внешнему радиусу трубки r_2.

Вследствие известного явления гистерезиса смачивания, а также влияния загрязнения на величину краевого угла, задача не может быть решена простым сравнением внешнего и внутреннего радиусов трубки, а должно быть учтено также и состояние поверхности. Так, для стекла и воды краевой угол смачивания для сухой поверхности составляет по некоторым данным до 40^0 (угол натекания), тогда как для мокрой поверхности он падает до 0^0 (угол оттекания) ([1]). Поэтому, в случае толстостенных капиллярных трубок с сухой торцовой поверхностью, максимальная глубина капиллярного опирания определится по формуле (4), а в случае тонкостенных трубок с мокрой торцовой поверхностью, по формуле (5)

Если длина у той части вертикальной капиллярной трубки, которая расположена ниже уровня жидкости в сосуде, больше, чем максимальная глубина капиллярного опирания d_c' или d_c'', то гидростатическое давление жидкости не может быть уравновешено максимальным значением добавочного давления поверхности мениска, и жидкость продолжает опускаться. Так как при этом радиус кривизны мениска увеличивается, то величина добавочного давления, определяемого по формуле Лапласа, должна уменьшаться. В результате жидкость не может находиться в состоянии равновесия и отрывается в виде капли.

Институт Геологических Наук
Академии Наук Армянской ССР
Ереван, 1950, июль

ԳԵՈՐԳ ՏԵՐ-ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ

Հեղուկի կապիլյար հենման խորության մասին

Հեղինակը պարզաբանում է հեղուկի հավասարակշռության պայմանները, երբ ուռուցիկ մենիսկը պահում է հեղուկի քաշի ճնշումը։ Այդ երևույթը տեղի է ունենում, օրինակ, երբ սիֆոնաձև կապիլյար խողովակն իջեցված է հեղուկով լի անոթի մեջ, իսկ նրա ազատ ծայրը ցածր է հեղուկի մակերեսից։

Հեղինակը անվանում է կապիլյար հենման խորությունն այն ամենամեծ հեռավորությունը, որը կարող է լինել անոթի հեղուկի մակերեսի և մենիսկի մեջ։ Այդ հենման խորությունն ունի երկու մաքսիմում՝

1. Հենումը կատարվում է m մենիսկի վրա, որն ունի գնդային սեգմենտի ձև։ Այդ սեգմենտի շառավիղը հավասար է՝

$$OA_1 = \frac{r_1}{\sin\Theta} \qquad (2')$$

որտեղ r_1—խողովակի ներքին շառավիղն է, իսկ Θ—թրջման անկյունն է։

Այդ դեպքում հենման խորությունը—d_c', որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$d_c' = \frac{2\alpha \sin\Theta}{\rho g r_1} \qquad 4)$$

որտեղ α— մակերեսային լարվածությունն է,
ρ—հեղուկի խտությունն է, իսկ
g—ծանրության ուժի արագացումն է.

2. Հենումը կատարվում է n մենիսկի վրա r_2 շառավիղով։ r_2 խողովակի արտաքին շառավիղն է։ Այդ դեպքում հենման խորությունը—d_c'', կլինի՝

$$d_c'' = \frac{2\alpha}{\rho g r_2} \qquad 5)$$

Եթե

$$\frac{r_1}{\sin\Theta} < r_2 \qquad (6)$$

ուրեմն առաջին մաքսիմումն ավելի մեծ է, քան երկրորդը։ Այդ իսկ պատճառով մաքսիմալ հենումը կատարվում է m մենիսկի վրա։

Եթե

$$\frac{r_1}{\sin\Theta} > r_2 \qquad (7)$$

ուրեմն երկրորդ մաքսիմումն ավելի մեծ է, քան առաջինը։ Այդ իսկ պատճառով մաքսիմալ հենումը կատարվում է n մենիսկի վրա։

Իրական մաքսիմալ հենման խորությունը կախված է Θ, r_1 և r_2 մեծությունների հարաբերությունից։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. *Н. К. Адам*. Физика и химия поверхностей, ГТИ, 1947. 2. *О. Д. Хвольсон*. Курс физики, т. 1, Берлин, 1923.