

Г. И. Тер-Степанни

Об условии равновесия капиллярной системы с внешней средой

Условия равновесия жидкости в капиллярной системе, находящейся в гравитационном поле, требуют, чтобы средняя кривизна K поверхности жидкости в любой точке равнялась бы отношению высоты этой точки, отсчитанной от пьезометрического уровня жидкости в системе, к капиллярной постоянной a^2 этой жидкости [1,2], т. е.

$$K = - \frac{z - z_0}{a^2}, \quad (1)$$

где z — высота рассматриваемой точки относительно горизонтальной координатной плоскости, z_0 — высота пьезометрического уровня капиллярной системы относительно той же координатной плоскости.

Если, однако, возможно взаимодействие капиллярной системы с внешней газообразной средой, то в результате должны создаться новые условия равновесия, учитывающие также это взаимодействие.

Следствием молекулярного обмена, происходящего между жидкой фазой капиллярной системы и внешней газообразной средой, может явиться изменение количества жидкости в системе, что отразится на положении ее пьезометрического уровня. В настоящей статье рассматриваются условия равновесия капиллярной системы с внешней изолированной газообразной средой, в которой, помимо изучаемой системы, могут находиться также свободная поверхность жидкости и другие капиллярные системы.

Поместим капиллярную систему в замкнутую, лишенную воздуха, изотермическую камеру, в которой находится сосуд с той же жидкостью, что заполняет поры капиллярной системы, и изучим условия равновесия в этом случае. Естественно, что жидкость будет испаряться как с поверхности капиллярной системы, так и из сосуда: по мере испарения жидкости давление пара в камере будет увеличиваться, а скорость испарения — уменьшаться. Когда пар сделается насыщенным, дальнейшее испарение прекратится и установится равновесие.

Общее количество жидкой фазы в капиллярной системе будет также уменьшаться, вследствие чего произойдет понижение пьезометрического уровня в системе. Определим, какое соотношение

установится между положением пьезометрического уровня системы и свободной поверхностью жидкости в сосуде.

Прекращению дальнейшего испарения жидкости в камере соответствует установление состояния насыщенного пара; обозначим его давление через p_0 . Строго говоря, таким давлением будет обладать только тонкий слой пара, находящийся непосредственно над поверхностью жидкости в сосуде. На высоте z' от этой поверхности давление пара p , в силу закона гидростатического равновесия, будет меньшим и составит:

$$p = p_0 - \rho_2 g z', \quad (2)$$

где ρ_2 — среднее значение плотности пара в камере,
 g — ускорение силы тяжести.

Обратимся к поверхности менисков. Как известно, одним из следствий искривления поверхностей менисков является изменение величины давления насыщенного пара. Согласно формуле Кельвина, это изменение равно избытку капиллярного давления, вызванному кривизной поверхности, уменьшенному в отношении плотности пара и жидкости [3]. Поэтому давление насыщенного пара над менисками составит:

$$p = p_0 + \alpha \left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \right) \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}, \quad (3)$$

где R' и R'' — радиусы главной кривизны поверхности мениска,
 ρ_1 — плотность жидкости.

В состоянии равновесия давление насыщенного пара над мениском должно равняться величине давления пара в окружающей среде. Действительно, если бы это не имело места, то под действием разности давлений происходило бы испарение жидкости, или же ее конденсация, в зависимости от знака этой разности. В обоих случаях не имело бы места равновесие жидкости, находящейся в капиллярной системе с окружающей средой. Поэтому условием равновесия должно быть равенство давления пара в среде, определяемое уравнением (2), с давлением пара над поверхностью менисков, определяемым уравнением (3).

Приравнявая их и выражая радиусы главной кривизны поверхности через ее среднюю кривизну, получим:

$$K = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g z' = - \frac{z'}{a^2}. \quad (4)$$

Сравнивая (4) с (1), заключаем, что условием равновесия жидкости, заполняющей поры капиллярной системы и свободной поверхностью той же жидкости, находящейся в изотермической изолированной камере, является совпадение пьезометрического уровня жидкости в капиллярной системе с уровнем жидкости в сосуде.

Таким образом, нет никакой разницы между случаем, когда жидкость в сосуде непосредственно сообщается с жидкостью, за-

подняющей капиллярную систему и тем случаем, когда такого непосредственного сообщения нет. В последнем случае связь осуществляется через атмосферу насыщенного пара.

Если в изолированной камере находится не одна капиллярная система, как это было рассмотрено выше, а несколько таких систем, то и в этом случае положение пьезометрических уровней всех этих систем должно измениться таким образом, чтобы они совпали с уровнем жидкости в сосуде, находящимся в той же камере. Таким образом, результат был бы тот же, как если бы все капиллярные системы непосредственно сообщались друг с другом и с жидкостью в сосуде.

Отсюда не трудно видеть, что если в камере находятся одни только капиллярные системы, т. е. отсутствует сосуд с жидкостью, то и в этом случае у них устанавливается один общий пьезометрический уровень, т. е. происходит нивелирование пьезометрических уровней. При этом пьезометрический уровень одних систем понижается, а других повышается.

Вовсе не является обязательным, чтобы понижался пьезометрический уровень более высоко расположенных систем и повышался уровень низко расположенных. В этом процессе сами потенциалы гравитационных сил систем не имеют никакого значения. Существенны только гравитационные потенциалы пьезометрических уровней этих систем, так как происходит нивелирование именно этих уровней всех систем, находящихся в рассматриваемом замкнутом пространстве.

Если окажется, что более высоко расположенная система обладает также и более высоким пьезометрическим уровнем, то при нивелировании произойдет понижение этого уровня. Однако возможен и такой случай, когда капиллярная система, расположенная на низком горизонте, обладает относительно более высоким пьезометрическим уровнем по сравнению с другой системой, гисометрически расположенной выше. В этом случае, при нивелировании пьезометрических уровней у первой системы пьезометрический уровень опустится, а у второй поднимется. Физически это означает, что жидкость будет испаряться из пор более низко расположенной капиллярной системы и конденсироваться в пустотах системы, расположенной на большей высоте.

Можно представить себе и такой случай, когда несколько капиллярных систем, заключенных каждая в отдельную камеру, могут находиться в равновесии с окружающей их средой; если эти камеры получают сообщение друг с другом, то с течением времени установится новое состояние равновесия. При этом жидкость будет покидать системы, пьезометрический уровень которых обладает большим потенциалом силы тяжести и переходить в системы с меньшим потенциалом пьезометрического уровня.

եթե մեկուսացված տարածությունում գտնվում են մի քանի կապիլար սխառնմաներ, ապա նեղուկով անտեղի ներկայությունից անկախ պետք է կատարվի պիեզոմետրիկ մակարդակների համասարեցում:

Անհրաժեշտ է, որ համասարեցման բնթացքում բարձր գիրք ունեցող սխառնման պիեզոմետրիկ մակարդակն իջնի, կամ ցածր գիրք ունեցող սխառնմանը՝ բարձրանա: Այդ սխառնմաների գրավիտացիոն պատենցիալը ոչ մի նշանակություն չունի, էական է միայն նրանց պիեզոմետրիկ մակարդակի պատենցիալը: Այդ իսկ պատճառով նախատր է, որ ցածր գիրք ունեցող կապիլար սխառնման ունենա համեմատաբար բարձր պիեզոմետրիկ մակարդակ, իսկ բարձր գիրք ունեցող սխառնմանը՝ ցածր մակարդակ: Համասարեցման բնթացքում առաջին սխառնման պիեզոմետրիկ մակարդակը կիջնի, իսկ երկրորդինը՝ կբարձրանա: Ֆիզիկական դա կնշանակի, որ առաջին սխառնման նեղուկը կզտլորշիանա, իսկ երկրորդի վրա՝ կկուտակվի: Այլ կերպ ասած՝ նեղուկը կը անդափսխվի ծանրության ուժի հակառակ ուղղությամբ: