

Тема: Водные свойства почв

Вопросы лекции:

- 1.** Пористость почв
- 2.** Строение и свойства воды
- 3.** Осмотические явления в почвах
- 4.** Капиллярные явления в почвах

Вопрос № 1

Пористость почв

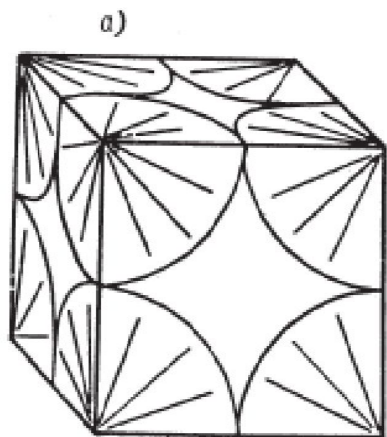
Значения пористости в разных почвенных горизонтах:

- ❖ Величина пористости в разных почвах и в разных горизонтах одной и той же почвы варьирует в широких пределах - от 25 до 80 % в минеральных почвах.
- ❖ В чисто органогенных горизонтах, например в торфах и лесных подстилках, она может превышать 90 %.
- ❖ В верхних, гумусовых горизонтах минеральных почв величина пористости бывает обычно повышенной (50-60 %) за счет хорошо выраженной структуры, наличия ходов корней, ходов роющих животных и насекомых и т. д.
- ❖ Книзу пористость уменьшается, доходя до 40-45 % в глинистых и суглинистых неоглеенных породах и до 35-40 % в песчаных.
- ❖ В оглеенных суглинистых и глинистых породах она уменьшается, как будет показано ниже, до 25-30 %.



Размер пор тем больше, чем грубее гранулометрический состав, т. е. чем крупнее частицы, из которых состоит почва.

Изучение пор на идеальной почве



Кубическое расположение частиц в идеальной почве

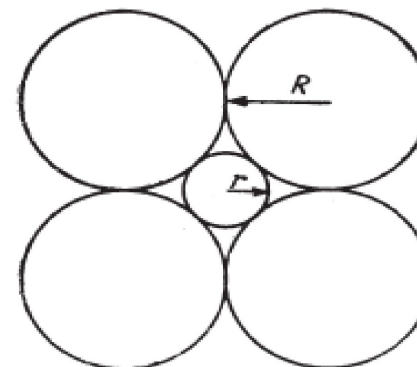
Идеальной почвой принято называть сыпучее тело, состоящее из сферических частиц одинакового диаметра. Нетрудно понять, что эта модель весьма далека от реальной почвы.

Шарообразные частицы, из которых состоит «идеальная почва», могут быть различно расположены по отношению друг к другу. Существуют два главных случая их взаимного расположения.

При кубической упаковке частиц, каждая частица соприкасается с шестью другими частицами. Пористость системы при такой упаковке равняется 47,64% общего объема системы. Соответственно объем твердой части составляет 52,36 %. Каждая элементарная пора имеет форму октаэдра с вогнутыми сферическими гранями. Радиус наиболее узких проходов, соединяющих соседние поры между собой, измеряемый радиусом круга r , вписанного между четырьмя соседними частицами равен:

$$r = 0,41R,$$

где: R - радиус частицы.



Соприкосновение четырех шарообразных частиц при кубической упаковке.

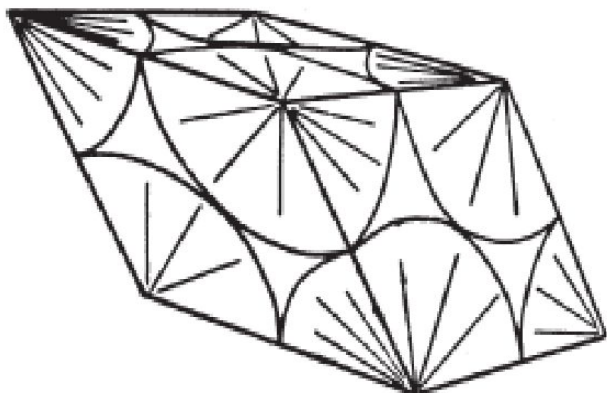
Радиус самой поры, измеряемый радиусом r_2 шара, вписанного между восемью соприкасающимися шарообразными частицами, равен:

$$r_2 = 0,73R.$$

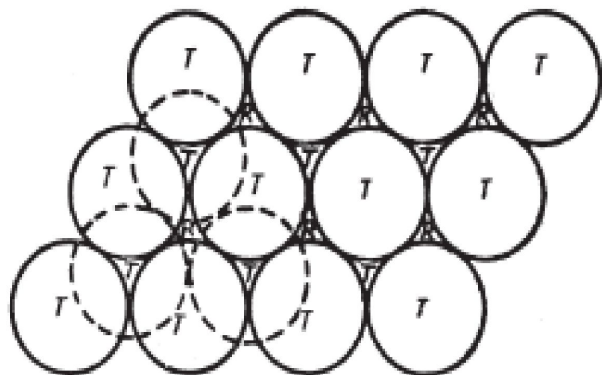
Объем октаэдрической поры равен $3,82 R^3$.

Изучение пор на идеальной почве

б)



Второй случай соответствует наиболее плотной упаковке частиц. Частицы расположены по отношению друг к другу так, что их центры оказываются в углах равностороннего тетраэдра. Такая упаковка называется гексагональной. Каждая частица соприкасается с двенадцатью соседними частицами.



Расположение ромбоэдрических (R) и тетраэдрических (T) пор при гексагональной упаковке.

Пористость системы при такой упаковке равняется 25,95 %, а объем твердой части - 74,05 %. Элементарные поры в этом случае имеют двойную форму: тетраэдрическую и ромбоэдрическую с вогнутыми сферическими гранями. Число тетраэдрических пор в два раза превышает число ромбоэдрических

Выводы:

1. Поровое пространство «идеальной почвы» представляет собой совокупность пустот различной формы и различного размера, соединяющихся между собой в разных направлениях проходами более узкими, нежели поперечник самих пустот.
2. Характерной чертой пористости является ритмическая изменчивость в пространстве поперечника почвенных пор, осуществляющаяся на весьма малых расстояниях.
3. Почвенное поровое пространство можно представить в виде пространственной трехмерной сетки, состоящей как бы из узелков (пор) различной формы и различного размера, соединенных друг с другом перетяжками (более узкими проходами между порами).
4. Вероятно, что в почвах и грунтах грубого гранулометрического состава - песчаного, гравийного, особенно при условии окатанности отдельных частиц, - поры по своей форме могут приближаться к порам «идеальной почвы».
5. В «почвах же и грунтах более тяжелого гранулометрического состава - суглинистых и глинистых, в которых содержится большее или меньшее количество частиц глинистых минералов, обладающих пластинчатой формой, форма пор может значительно отличаться от формы пор «идеальной почвы».

Пористость перегнойных горизонтов

Пористость перегнойных горизонтов в почвах самых разных типов по большей части варьирует в пределах 50-60%, т. е., значительно превышает пористость «идеальной почвы» даже при самой рыхлой - кубической - упаковке частиц.

Причины этого нужно искать, естественно, в том, что именно в гумусовом горизонте, как правило, наиболее отчетливо бывает выражена структура, т.е. агрегированность почвенных частиц. Совершенно понятно, что когда почва состоит из более или менее крупных комочков, которые в свою очередь состоят тоже из комочков или из элементарных частиц и, следовательно, обладают своей, внутриагрегатной пористостью, то общая пористость почвы от этого значительно повышается. Кроме того, в перегнойных горизонтах, более чем в каких-либо других, бывает развита корневая система растений, а также ходы различных мелких роющих животных (дождевых червей, личинок насекомых и т. д.). Эти явления также сильно повышают пористость почвы.

Пористость глубоких неоглеенных горизонтов

В более глубоких горизонтах почвы (кроме оглеенных) величина пористости равным образом материнских пород, обычно лежит гораздо ближе к пористости «идеальной почвы» при кубической упаковке (47,64 %), нежели при гексагональной (25,95 %), иногда превышая даже первую из этих величин.

Все эти неоглеенные суглинистые грунты, особенно лёссовидные, и нижние горизонты почв обладают микроструктурой. Они состоят из мелких агрегатов, диаметр которых обычно измеряется величинами порядка сотых долей миллиметра. В соответствии с этим и в указанных почвенных горизонтах и в грунтах имеется по меньшей мере две системы пор: поры ***межагрегатные*** и поры ***внутриагрегатные***.

Близость общей пористости к величине пористости при кубической упаковке оказывается совершенно случайной. На самом деле эта величина (45,1 %) может быть обусловлена микроструктурой почвенных горизонтов и их двойкой (межагрегатной и внутриагрегатной) пористостью, причем упаковка элементарных частиц в агрегатах и самих агрегатов может быть достаточно близкой к наиболее плотной, т. е. гексагональной.

Однако межагрегатная пористость может достигать указанных величин лишь в тех случаях, когда порода представляет собой нанос, который образовался путем отложения готовых уже агрегатов. В почвах межагрегатная пористость может возникать и иначе - путем растрескивания, распада ранее образовавшихся почвенных комков. В этих случаях величина межагрегатной пористости может быть значительно меньше и может сильно изменяться во времени в зависимости от влажности почвы.

В верхних, гумусовых горизонтах почв, в особенности хорошо оструктуренных (черноземы), как уже было отмечено выше, общая пористость гораздо больше - чаще всего около 60 %. Возникновение такой пористости может быть объяснено аналогичным образом, но с допущением уже трехстепенной агрегированности. Микроагрегаты, состоящие из элементарных частиц, в этом случае в свою очередь склеиваются в макроагрегаты опять-таки с гексагональной упаковкой.

Общая пористость такой системы будет равна:

$$\begin{aligned} & \text{Пористость внутримacroагрегатная} \\ & \quad + \\ & \quad \text{Пористость межmacroагрегатная} \\ & \quad + \\ & \quad \text{Пористость внутримикроагрегатная} \end{aligned}$$

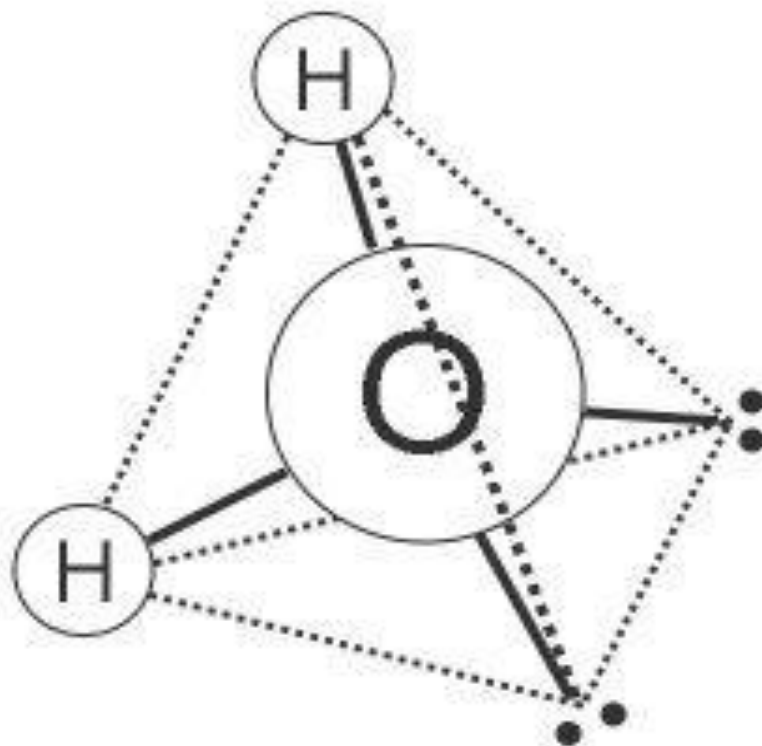
Таким образом, при трехстепенной агрегированности общая пористость оказывается равной 60 %, что соответствует наблюдаемой в природе пористости гумусовых горизонтов разных почв, в особенности черноземов.

Пористость оглеенных горизонтов

- ❖ Пористость резко уменьшается при оглеении, и в этом случае ее величина начинает приближаться к пористости «идеальной почвы» при гексагональной упаковке (25,95 %).
- ❖ Как следствие уменьшения пористости, при оглеении возрастает плотность сложения, то есть при оглеении происходит уплотнение почвенной массы.
- ❖ При оглеении разрушается микроструктура, присущая нижним почвенным горизонтам в неоглеенном состоянии, а следовательно, исчезает и межагрегатная пористость.
- ❖ Элементарные частицы укладываются более плотно, в результате чего и возникает пористость, близкая по своей величине к пористости «идеальной почвы» при гексагональной упаковке.

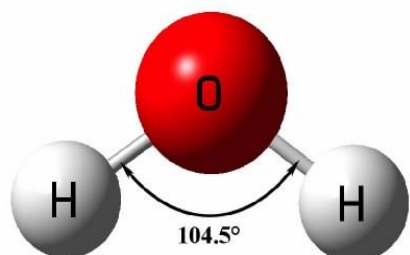
Вопрос № **2**

*Строение и свойства
воды*



Молекула воды по Гэгджинсу

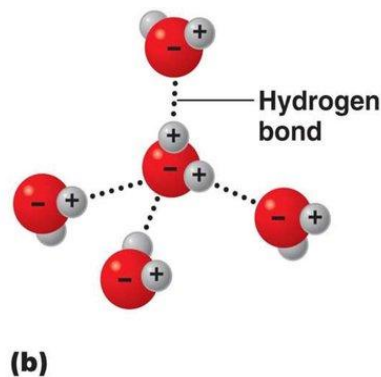
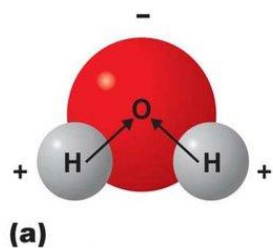
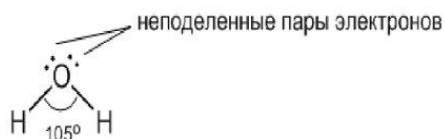
представляет тетраэдр
с четырьмя полюсами
по его вершинам: два
из них несут
положительные
заряды и два -
отрицательные. Центр
тетраэдра
соответствует центру
молекулы воды.



• а- диполь воды

• б – водородная связь

обуславливают уникальные свойства воды

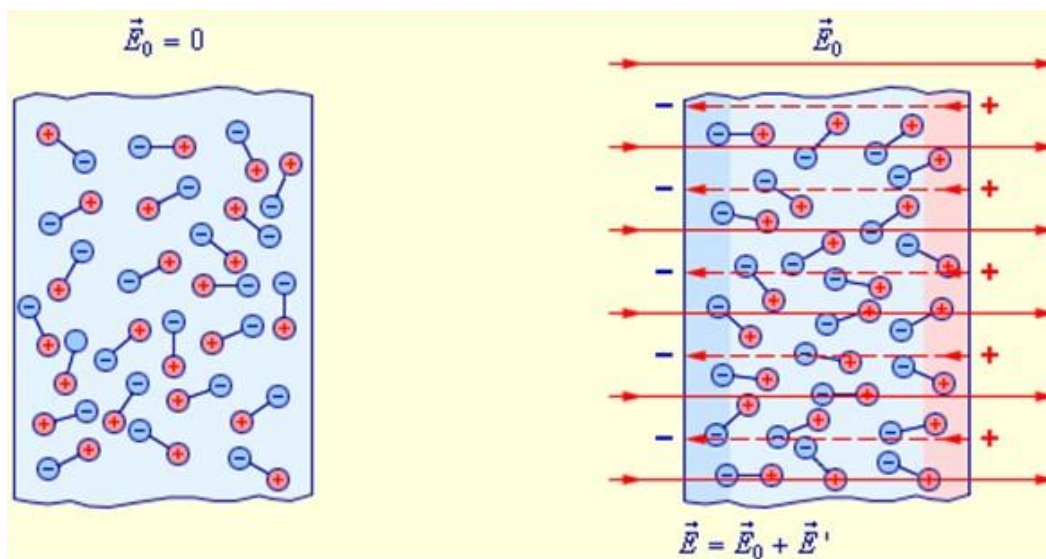


По Паулингу, структура молекулы воды имеет вид равнобедренного треугольника. Валентный угол у вершины треугольника, занятой атомом кислорода, равен 105° . Расстояние атомных ядер в связи O—H находится в пределах от 0,85 до 1,1 Å в зависимости от состояния воды (пар, жидкость, кристаллы льда или кристаллогидраты). Радиус электронной сферы кислородного атома равен 1,3-1,4 Å ; значит, ядра водородных атомов располагаются внутри этой сферы. Диаметр всей молекулы воды - 2,76 Å.

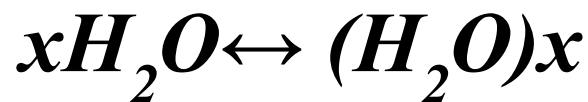
Водородная связь

Результаты определения молекулярного веса водяного пара указывают на то, что он практически состоит из свободных молекул воды (H_2O), а в жидком состоянии вода ассоциирована.

Наряду с простыми молекулами, она содержит и более сложные молекулярные агрегаты из двух-трех и более молекул.

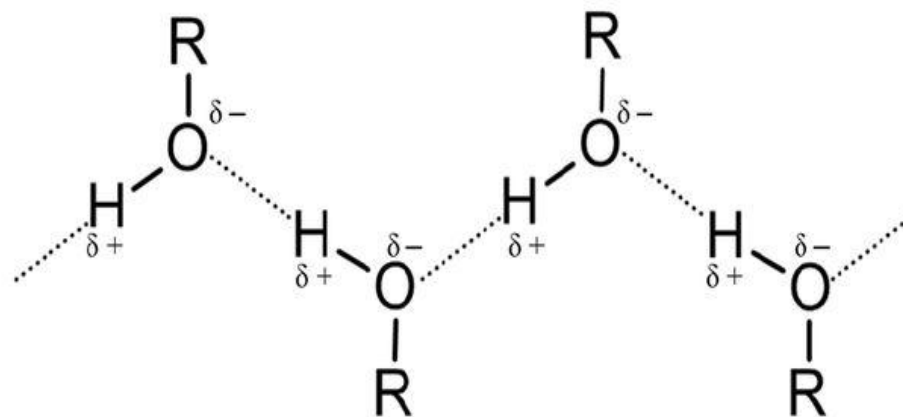
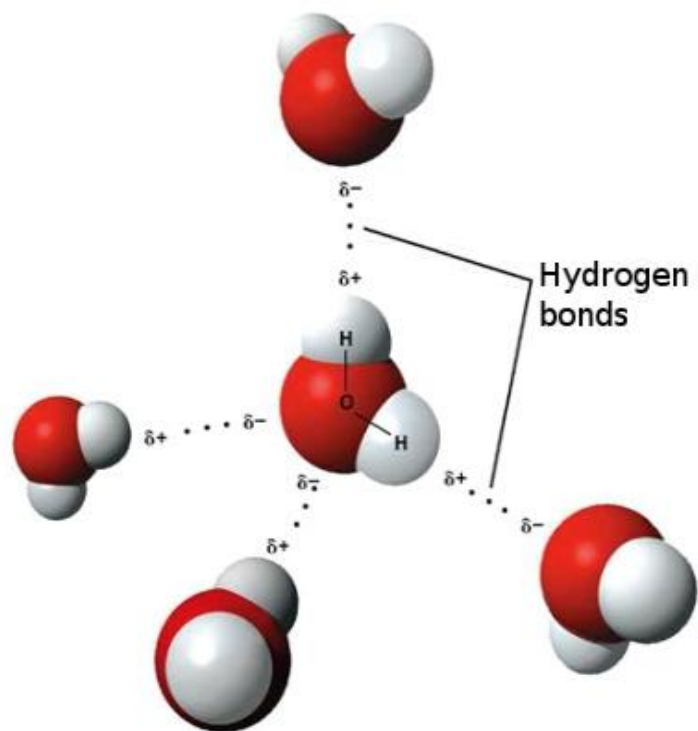


Такие агрегаты постоянно возникают и вновь распадаются, что можно выразить схемой:

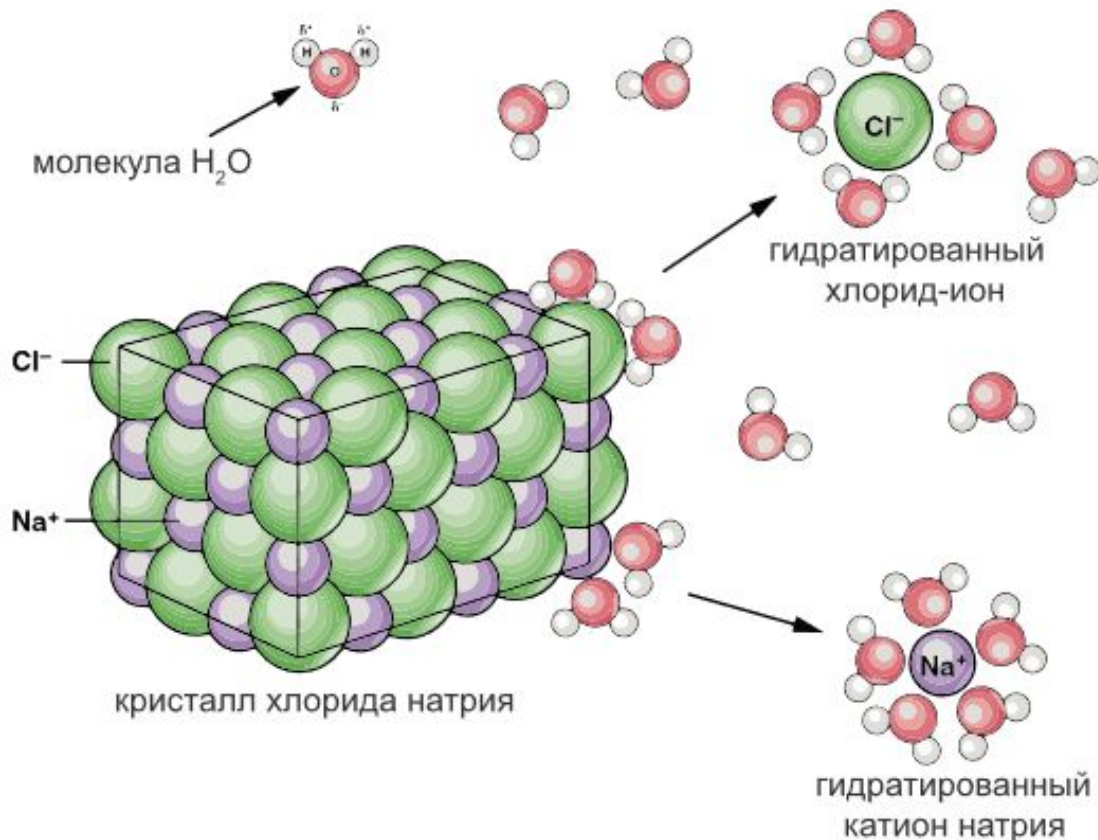


Водородная связь

Причиной возникновения молекулярных агрегатов являются так называемые водородные связи. «Водородная связь по своему характеру является, по видимому, электростатической; она образуется вследствие притяжения ковалентно связанного протона свободными электронами атома другой молекулы. При этом протон находится не посередине между связываемыми им атомами (даже если они одинаковы), а ближе к тому атому, с которым он связан ковалентно. Так, в случае воды:



Гидратация ионов



Диполи воды могут притягиваться ионами вследствие взаимного притяжения электрических зарядов, присущих, с одной стороны, иону, а с другой - полюсам гидролей. Явление это называется **гидратацией ионов** и выражается, в конечном счете, в образовании гидратной оболочки вокруг ионов, состоящей из притянутых ионом молекул воды. Учитывая различный размер ионов, можно заранее предвидеть, что величина этих гидратных оболочек будет у разных ионов различной.

Вопрос № 3

*Осмотические явления
в почвах*

Осмоз

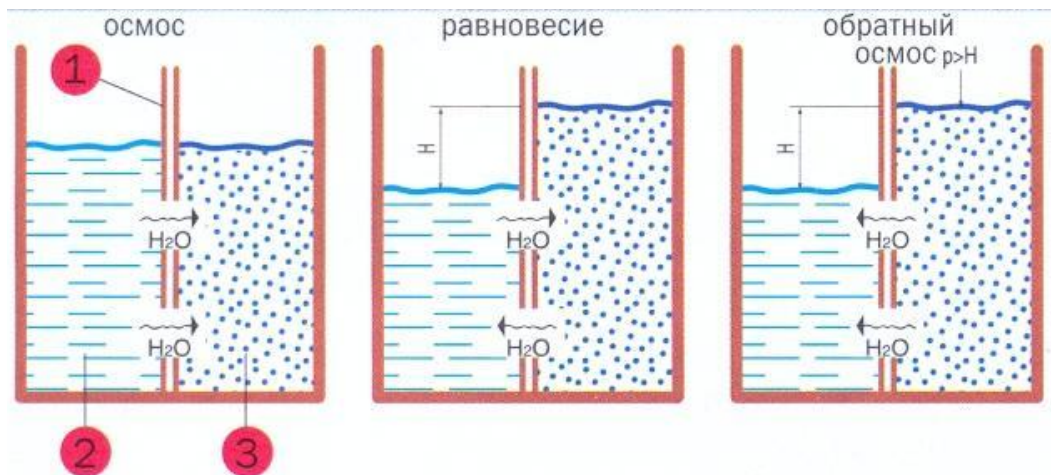


Схема возникновения обратного осмоса
(H – осмотическое давление)

1 – полупроницаемая мембрана; 2 – вода; 3 – раствор солей

Явление проникновения растворителя в раствор через полупроницаемую перепонку называется **осмосом**, а развивающееся в сосуде с полупроницаемой стенкой давление называется **осмотическим давлением**.

Если сосуд с полупроницаемой стенкой наполнить раствором какого-нибудь вещества и погрузить его в другой сосуд с чистым растворителем, то растворитель начнет проникать в сосуд с раствором. Если этому проникновению будет противопоставлена какая-либо сила, например, в виде столба ртути или какой-либо другой жидкости в манометре, присоединенном к сосуду с раствором, то можно обнаружить, что проникновение растворителя в сосуд с раствором создает в этом последнем некоторое давление.

Осмоз

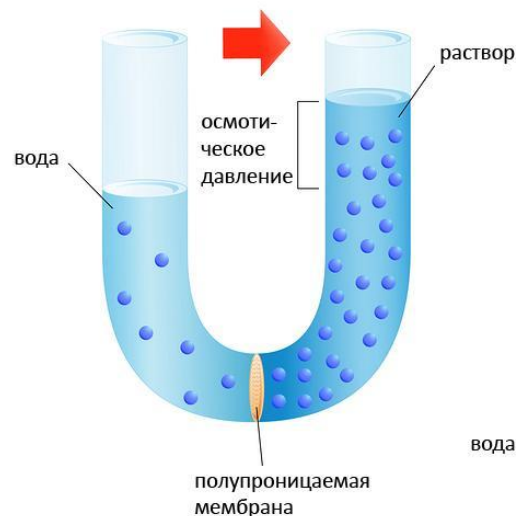
Осмотическое давление подчиняется определенным количественным закономерностям, установленным Вант-Гоффом.

Величина осмотического давления подчиняется тому же закону, что и величина давления газа,

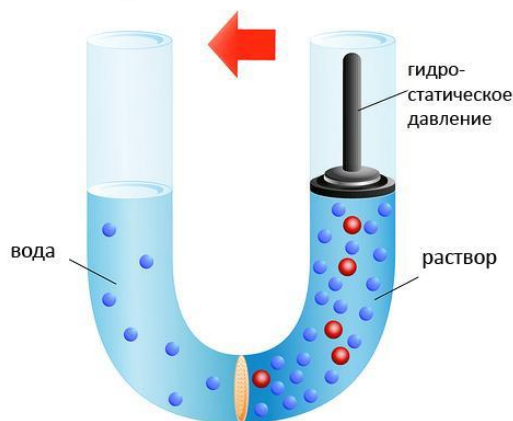
$$P = RcT,$$

где P - осмотическое давление растворенного вещества, R - газовая постоянная, c - концентрация раствора, T - абсолютная температура.

Осмоз



Обратный осмос



Причиной осмотического давления является то притяжение, которое оказывают частицы растворенного вещества в воде. Это притяжение заставляет проникать воду в сосуд с полупроницаемой стенкой, когда в нем будет находиться раствор, и он будет погружен в воду. По этому воззрению агентом, вызывающим осмотическое давление, является взаимное притяжение между частицами растворенного вещества и растворителя.

Суть осмотического давления

- ❖ Если считать, что осмотическое давление есть разность давлений диффузии чистого растворителя и растворителя в растворе, то величина осмотического давления будет равна разности между энергией молекул чистого растворителя и энергией его же молекул в растворе.
- ❖ В основе явления осмоса лежит связывание молекул растворителя с молекулами или ионами растворенного вещества. Количественно же под осмотическим давлением следует понимать **величину гидростатического давления**, которую необходимо приложить к раствору, для того чтобы уравновесить его с чистым растворителем, отделенным от него полупроницаемой мембраной.

Приложение осмотического давления к почве

В почве с явлениями осмоса мы сталкиваемся в двух главных случаях.

Взаимодействие воды и обменных катионов. Обменные катионы притягиваются поверхностью почвенных коллоидных частиц. Одновременно эти катионы притягивают к себе из почвенного раствора дипольные молекулы воды, которые стремятся окружить каждый обменный катион со всех сторон, создать вокруг него водную оболочку и, отжать, отчленить его от поверхности почвенной частицы. Вот это отжимающее усилие можно рассматривать как проявление осмотического давления.

Почвенный раствор имеет неодинаковую концентрацию в разных участках почвенной толщи. В этом случае наблюдается не только диффузия растворенных веществ из участков с более высокой их концентрацией к участкам с более низкой концентрацией, но одновременно и встречная диффузия воды в обратном направлении.

Оба эти процесса в своей основе имеют взаимодействие между молекулами или ионами почвенного раствора и дипольными молекулами воды, т. е. оба эти процесса по своей природе являются осмотическими. Существенное значение эти явления могут иметь лишь при более или менее высокой концентрации почвенного раствора и значительной разнице концентраций. Одновременное существование обоих указанных процессов экспериментально было показано А. Ф. Лебедевым.

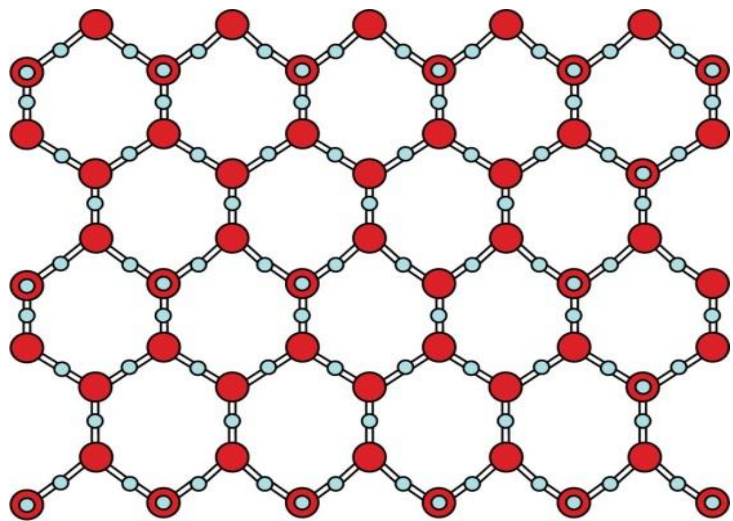
Вопрос № 4

*Капиллярные явления в
почвах*

Капиллярные явления имеют в своей основе:

1. молекулярное давление и пленочное натяжение в поверхностных слоях жидкости;
2. образование мениска при взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела в узких порах;
3. изменение давления в жидкости непосредственно под мениском в сторону плюса или минуса и, в соответствии с этим, передвижение жидкости (поднятие по капилляру вверх или опускание в нем).

Состояние молекул воды внутри жидкости

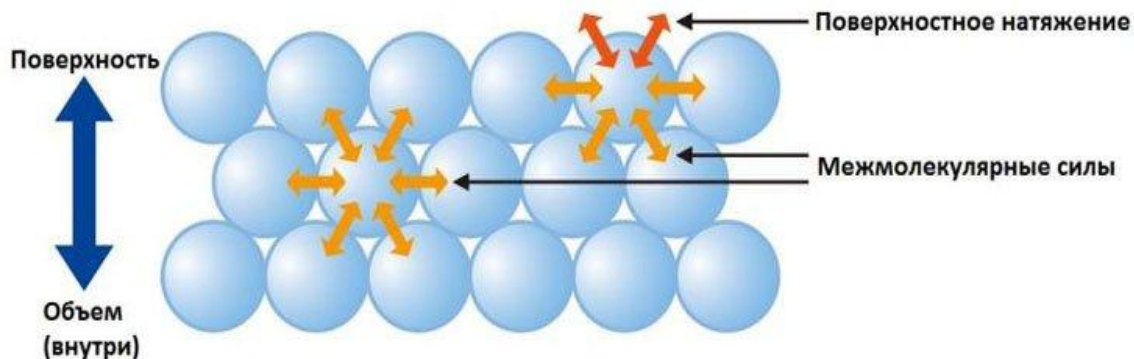


Спокойное состояние
молекул воды внутри
жидкости

- ❖ Из-за того, что расстояния между соседними молекулами воды малы в жидкости создается так называемый «ближний порядок» - спокойное состояние.
- ❖ В спокойном состоянии молекулы воды внутри жидкости взаимно притягиваются соседними молекулами – находятся равновесии.
- ❖ В спокойном состоянии каждая молекула окружена со всех сторон другими молекулами и испытывает одинаковое притяжение во всех направлениях.
- ❖ Равновесие нарушается (размывается) по мере удаления от данной молекулы.

Состояние молекул воды на поверхности жидкости

- ❖ Поверхностные слои молекул испытывают на себе притяжение нижележащих и соседних (в горизонтальной плоскости) молекул воды.
- ❖ Атмосфера, как среда менее плотная по составу молекул, не может оказать противодействие этим силам.
- ❖ Силы притяжения, направленные вниз по нормали к поверхности, стремятся увлечь поверхностные молекулы внутрь жидкости.
- ❖ Силы молекулярного притяжения, развитые в плоскости поверхностного слоя и касательные к нему, создают в этом слое натяжение, аналогичное натянутой упругой мембране, стремящейся сократить свою поверхность.
- ❖ Силовое напряжение отдельных молекул в поверхностной пленке жидкости уменьшается по мере приближения их к нижней границе зоны молекулярного действия.
- ❖ Чем «глубже» молекула воды залегает в силовом слое, тем более мощный слой пленки натяжения остается выше ее, и он противодействует втягиванию данной молекулы внутрь жидкости.



Поверхностное натяжение жидкости

Силы поверхностного натяжения и молекулярного давления тесно связаны между собой.

По Гауссу, для вывода молекул жидкости из глубины на поверхность и увеличения поверхности необходимо преодолеть молекулярное давление и пленочное натяжение.

Очевидно, для изменения поверхности жидкости S на величину dS нужно совершить работу, равную dr . Оказывается, что работа dr пропорциональна приращению поверхности dS , поэтому можно написать равенство:

$$dr = an \cdot dS$$

где a - работа для вывода одной молекулы на поверхность; n - число молекул в 1 см^2 поверхностного слоя жидкости.

Величина $an = \sigma$ называется *коэффициентом поверхностного натяжения* жидкости:

$$dr = \sigma \cdot dS \text{ и } \sigma = \frac{dr}{dS}$$

Поверхностное натяжение жидкости

*Сила, с которой поверхность стремится сократиться, отнесенная к единице длины контура на поверхности или действующая на единицу длины линии, являющейся границей поверхности жидкости, перпендикулярно к ней и по касательной к поверхности жидкости, называется **поверхностным натяжением**.*

Сила f , действующая таким образом на линию, длина которой m , равна:

$$f = \sigma \cdot m$$

Величина σ может быть выражена в мг/мм.

Капиллярная постоянная

- Капиллярная постоянная жидкости численно равна капиллярному натяжению поверхности жидкости, т. е. равна той силе, которую надо приложить к единице длины какого-нибудь контура на поверхности, чтобы уравновесить поверхностное натяжение.
- Капиллярную постоянную находят из уравнения:

$$a^2 = \frac{2\sigma}{\delta}$$

где a^2 - капиллярная постоянная; σ - поверхностное натяжение жидкости; δ - плотность жидкости

- Капиллярную постоянную (a^2) выражают в мм²:

$$a^2 = h \cdot r$$

где r - радиус капилляра, h - высота поднятия жидкости в капилляре.

Капиллярная постоянная

- Если $r = 1$, то $a^2 = h$ или капиллярная постоянная данной жидкости численно равна высоте подъема этой жидкости в трубке, радиус канала которой равен 1 мм и стенки которой жидкостью вполне смачиваются.
- Поверхностное натяжение всех жидкостей уменьшается с повышением температуры.
- При критической температуре для каждой жидкости поверхностное натяжение обращается в нуль.

Молекулярное давление

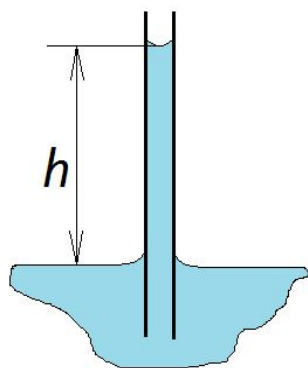
Для точного вычисления молекулярного давления до сих пор не найдено соответствующих методов. Приблизительно оно может быть вычислено по формуле:

$$P = \frac{k \cdot T}{\beta}$$

где P - молекулярное давление; k - коэффициент теплового расширения жидкости; β - коэффициент ее сжимаемости; T - абсолютная температура.

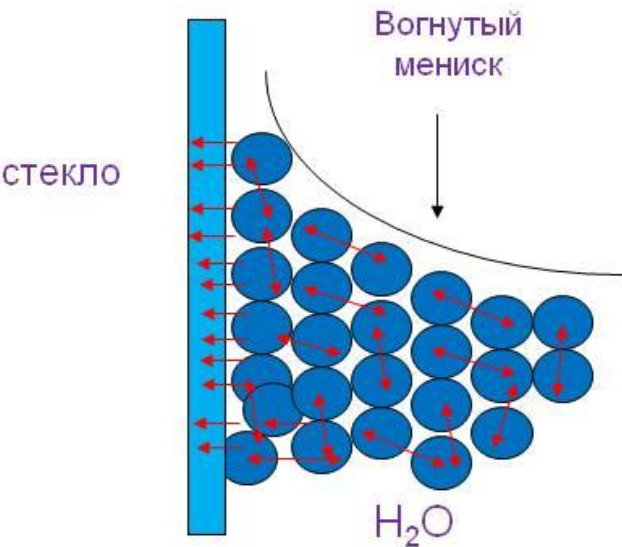
Величины поверхностного натяжения и молекулярного давления входят составляющими в ряд расчетных формул при вычислении высоты капиллярного подъема влаги (Лапласа, Жюрена и др.).

Явление смачивания капилляров



- При соприкосновении жидких тел с поверхностью тел твердых наблюдается смачивание или несмачивание твердых тел.
- Смачивание зависит от силы молекулярного притяжения между молекулами жидкости и молекулами жидкого и твердого тела.

- **Смачивание жидкостью твердого тела** наблюдается если взаимодействие между молекулами жидкости слабее, нежели притяжение их к поверхности твердого тела, то в процессе теплового движения молекулы жидкости, соприкасаясь с твердым телом, будут вырываться из жидкой среды и прилипать к поверхности твердого тела, ползти по его стенке вверх, вниз или в стороны в зависимости от положения участков жидкости и твердого тела.

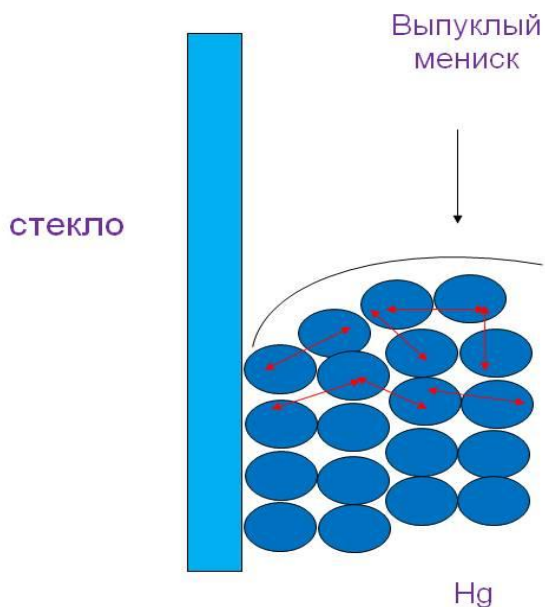
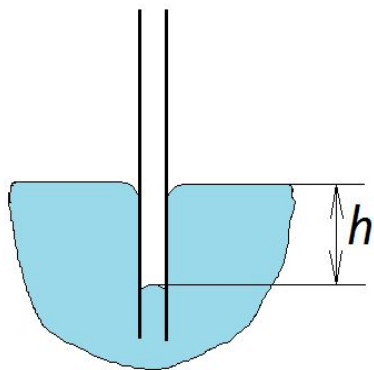


Смачивание

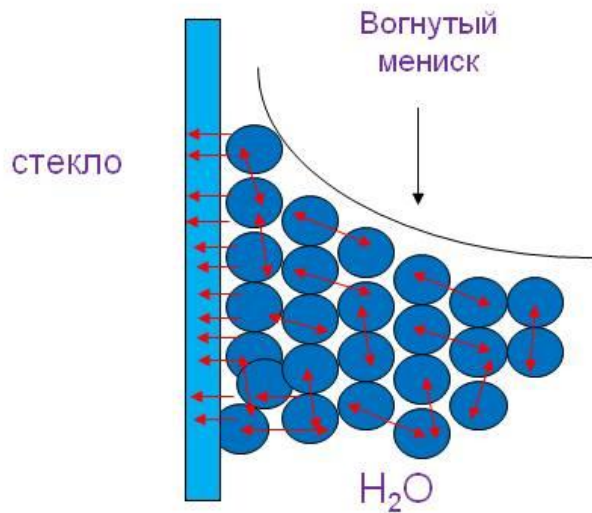
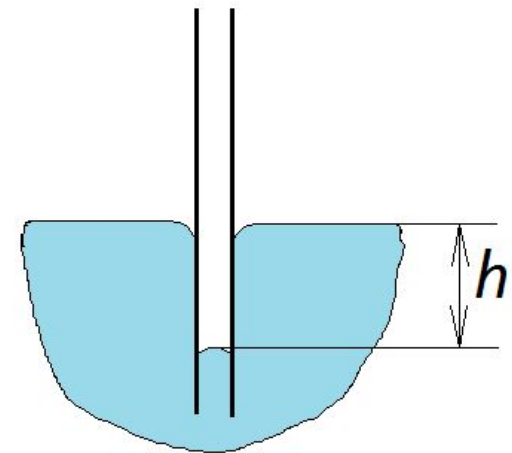
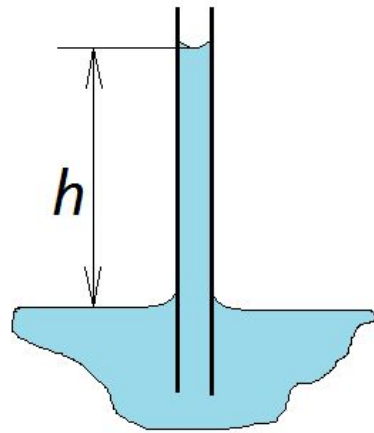
Случай несмачивания капилляров

Несмачивание жидкостью твёрдого тела

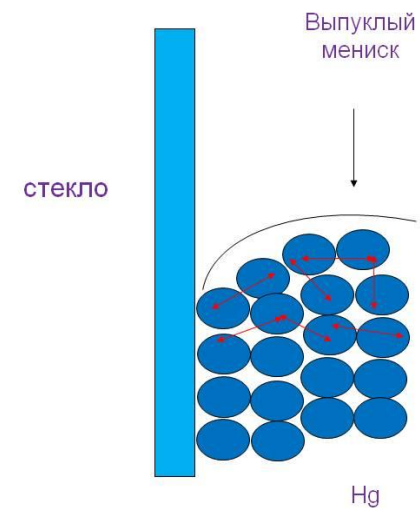
наблюдается, когда молекулы жидкого тела сильнее взаимодействуют между собой, нежели с поверхностью твёрдого тела, они отталкиваются от твёрдого тела, образуя выпуклую сферическую поверхность.



Несмачивание

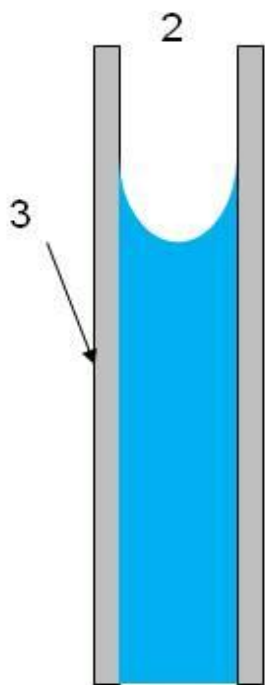


Смачивание



Несмачивание

Образование угла смачивания капилляров

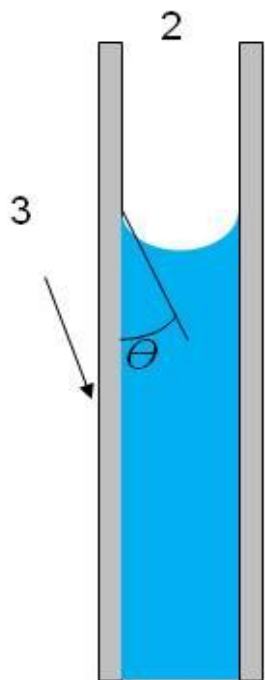


полное
смачивание
 $\Theta = 0$

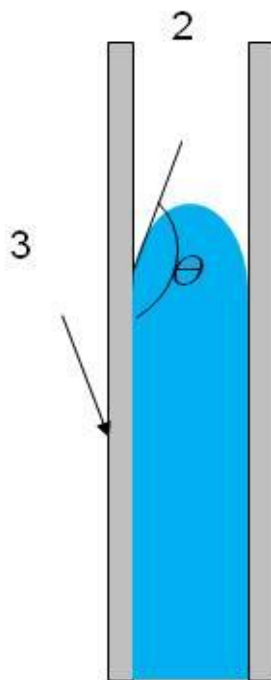
Цифрами обозначено: 1-
жидкость, 2 – атмосфера,
3 – твердое тело

- По границе контакта атмосфера - поверхность жидкости - погруженная в жидкость часть твердого тела между касательными плоскостями к поверхности твердого тела и к поверхности жидкости образуется двугранный угол, получивший название *угла смачивания* или *краевого угла* (Θ).
- Чем совершеннее жидкость смачивает поверхность твердого тела, тем краевой угол меньше:
- При полном смачивании, например, бензин, масло - сталь, $\Theta = 0$ - мениск в капилляре сильно вогнут

Образование угла смачивания капилляров



Неполное
смачивание
 $\theta < 90^\circ$

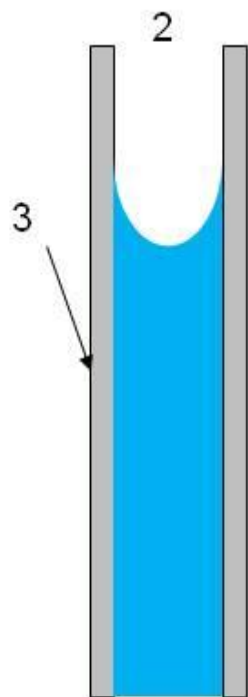


Отсутствие
смачивания
 $\theta > 90^\circ$

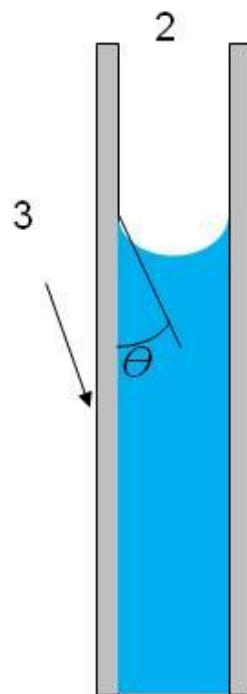
- При неполном смачивании (вода – минеральная часть почвы) $\theta < 90^\circ$ - мениск в капилляре вогнут
- При отсутствии смачивания (например, вода - парафин, ртуть - стекло) $\theta > 90^\circ$ - мениск в капилляре выпуклый

Цифрами обозначено: 1- жидкость,
2 – атмосфера, 3 – твердое тело

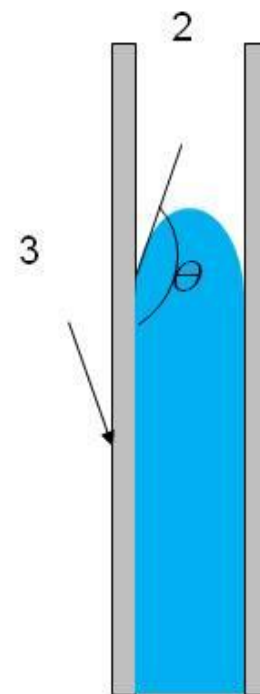
Образование угла смачивания капилляров



полное
смачивание
 $\theta = 0$



Неполное
смачивание
 $\theta < 90^\circ$



Отсутствие
смачивания
 $\theta > 90^\circ$

Цифрами обозначено: 1- жидкость,
2 – атмосфера, 3 – твердое тело

Выражение смачивания капилляров

Смачивание количественно выражается величиной B .

$$B = \cos \theta = \frac{\sigma_{3.2} - \sigma_{3.1}}{\sigma_{1.2}} = \frac{\beta}{\sigma_{1.2}}$$

Где $\sigma_{3.2}$ и т.д. - поверхностные энергии на границах: твердое тело (3) - воздух (2); твердое тело (3) - жидкость (1); жидкость (1) - воздух (2).

- Смачивание тем больше (а краевой угол тем меньше), чем больше молекулярное сродство смачивающей жидкости и поверхности твердого тела, т. е. чем больше понижение поверхностного натяжения твердого тела.
- В почвенных условиях угол смачивания обычно меньше 90° . На величине его сказываются свойства твердой фазы почвы и почвенного раствора.

Смачивание в капиллярах

- В зоне смачивания по периферии твердого тела распределяется вода максимальная гигроскопическая и пленочная.
- В случае заполнения жидкостью пор с малым диаметром (для условий вода - стекло $d < 8$ мм) зона влияния краевых углов распространяется на весь просвет капилляра, образуя вогнутый или выпуклый мениск.
- Если диаметр капилляра превосходит двойную толщину пленки жидкости, адсорбированной или десорбированной твердым телом, то под влиянием поверхностного натяжения жидкости в капилляре возникает новая ее форма - капиллярная, которая обладает свойствами, отличными от жидкости пограничного слоя.
- При наличии смачивания мениск будет вогнутый; при отсутствии его – выпуклый.
- Образование менисков в капилляре, заполненном жидкостью, изменяет давление в жидкости непосредственно под мениском.
- В случае вогнутого мениска давление под ним меньше, нежели под плоской поверхностью жидкости и, наоборот, выпуклый мениск обуславливает давление, превышающее токовое под плоской поверхностью.

Формула Лапласа

Закономерности поведения жидкости в капиллярах получили математическое выражение в формуле Лапласа:

$$P = K + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

где P - нормальное давление, производимое поверхностным слоем жидкости; K - нормальное давление на плоской поверхности; σ - поверхностное натяжение жидкости; R_1 и R_2 - радиусы кривизны двух главных нормальных сечений поверхности мениска. Они считаются положительными, когда направлены внутрь жидкости (при выпуклом мениске), и отрицательными, когда направлены в атмосферу (при вогнутом мениске).

Если взять простейший случай, когда капилляр представляет собой цилиндр, то R_1 и R_2 будут между собой равны, и формула Лапласа примет следующий вид:

$$P = K + \sigma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right) = K + \frac{2\sigma}{R}$$

Применение формулы Лапласа

Поверхность плоская. Она может рассматриваться как часть шаровой поверхности с бесконечно большим радиусом

$$P = K + \frac{2\sigma}{\infty} = K$$

Нормальное давление плоской поверхности жидкости соответствует давлению (K) при одной атмосфере.

Поверхность мениска выпуклая. Формула Лапласа примет вид:

$$P = K + \frac{2\sigma}{R}$$

т. е. нормальное давление под выпуклым мениском больше, нежели под плоской поверхностью на величину

Поверхность мениска в капилляре вогнутая. Этот случай исключительно важен для передвижения капиллярной воды в почвах и грунтах. В этом случае формула Лапласа имеет вид:

$$P = K + \sigma \left(\frac{1}{-R} + \frac{1}{-R} \right) = K - \frac{2\sigma}{R}$$

Уравнение Жюрена

Под влиянием отрицательного давления под вогнутым мениском жидкость должна подняться в капилляре на такую высоту h , чтобы давление приподнятого жидкого столба на единицу площади, лежащей на высоте наружной, по отношению к капилляру, горизонтальной поверхности жидкости, сделалось бы равным величине $\frac{2\sigma}{R}$

$$\text{Следовательно } \frac{2\sigma}{R} = h \cdot d$$

где: h – высота поднятия жидкости в капилляре; d – плотность жидкости.

$$\text{Но, } R = \frac{r}{\cos\theta} \text{ следовательно, } h \cdot d = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad \text{и} \quad h = \frac{2\sigma \cos\theta}{rd}$$

Если жидкость вполне смачивает поверхность твердого тела, то краевой угол (θ) будет равен нулю, а его косинус единице. Тогда последнее уравнение примет вид:

$$h = \frac{2\sigma}{rd}$$

Закон Жюрена

Согласно уравнению Жюрена высота поднятия жидкости в капилляре (при смачивании ею поверхности твердого тела) прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения и обратно пропорциональна радиусу капилляра и плотности жидкости.

Высота (h) столба жидкости, заполняющей капилляр, не зависит от размеров тех частей капилляра, которые лежат ниже мениска. Однако если эти части имеют более широкий диаметр, чем мениск, то весь капилляр должен быть предварительно заполнен жидкостью.

Из уравнения Д. Жюрена следует: что чем тоньше капилляр, тем выше должна подняться вода. В самом общем случае это справедливо, но справедливо только в определенных пределах, в особенности, когда дело касается реальных почв.