

Физика горных пород

Лекция 7 – Жидкости и газы в горных породах

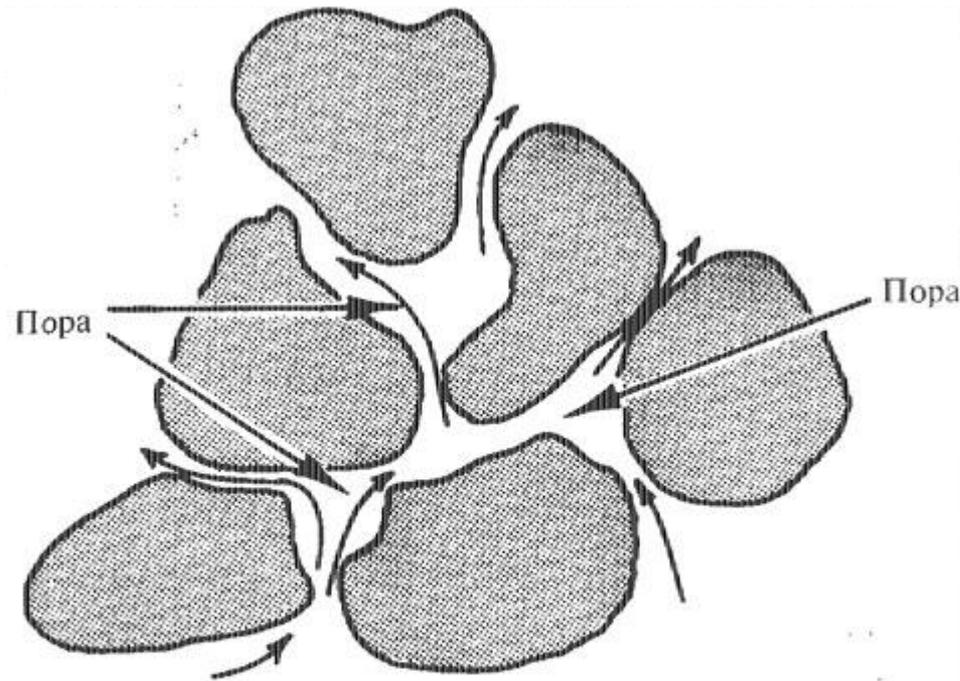
Лектор: Шульгин Павел Николаевич

<http://do.dstu.education>

<http://sggs-donstu.ucoz.ru/>

Жидкость и газ в горных породах

- В массиве горных пород практически всегда находятся поры и трещины. Они могут быть заполнены жидкостями и газами (вода, нефть, воздух, метан и др.).



- Наиболее часто в них присутствует **вода**.

Виды воды в горных породах



При этом выделяют следующие виды ВОДЫ:

- **Химически связанная вода;**
- **Физически связанная вода;**
- **Свободная вода.**

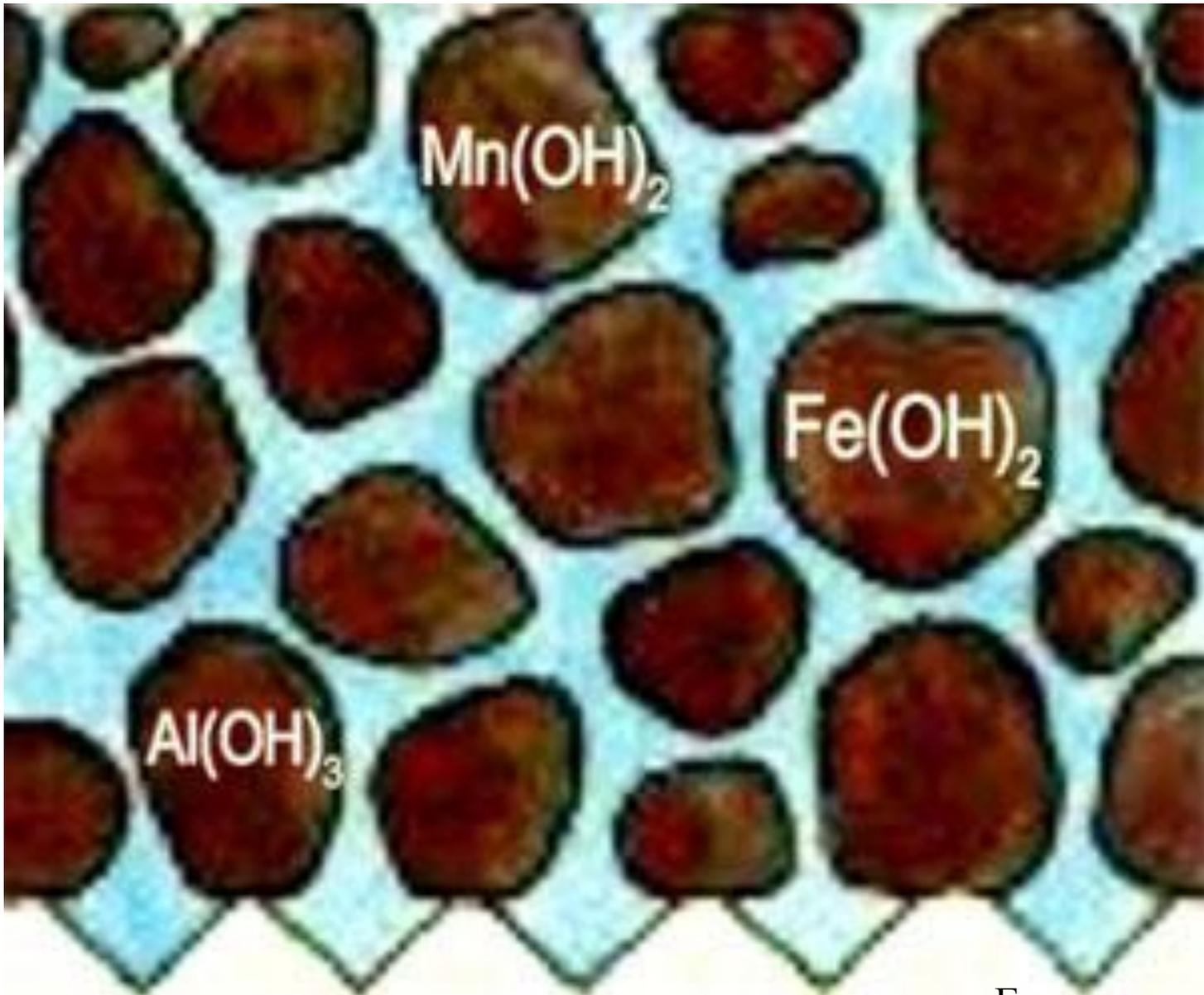
1. Химически связанная вода

- ВХОДИТ в состав кристаллической решетки минералов.
- Удаление этой воды приводит к разрушению минерала, превращая его в другое безводное соединение.

- Химически связанная вода включает конституционную и кристаллизационную влагу.
- **Конституционная вода** входит в состав органических и органо-минеральных соединений, а также минералов в виде групп ОН (гидроксиды).
- **Кристаллизационная вода** содержится в кристаллогидратах различных солей: гипс, мирабилит, битофит и т. д.

- Если вода находится в виде молекул, в кристаллической решетке, то такая вода называется **кристаллизационной**.
- Кристаллизационная вода, как правило, удаляется при температуре 200-600°C.
- Она характерна, например, для гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Гидроксид марганца



Гидроксид алюминия

Гидроксид железа

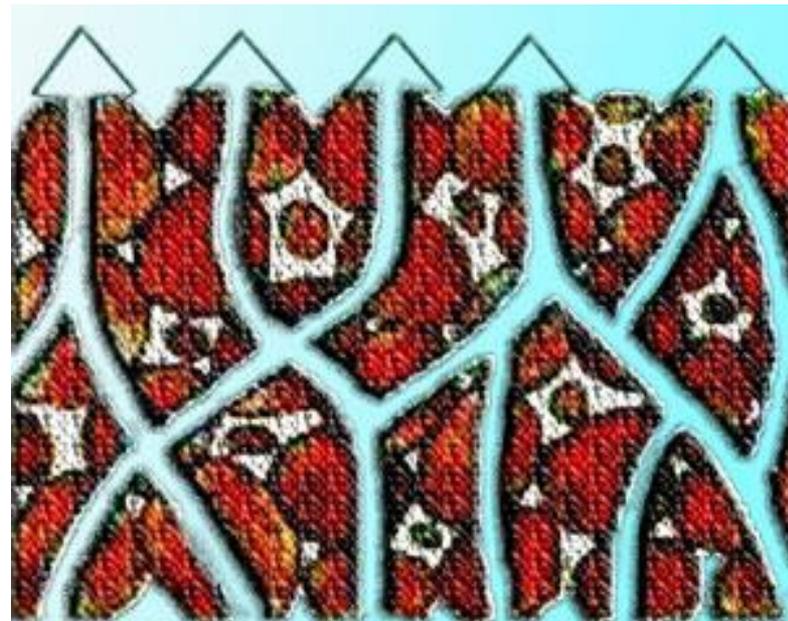
- Вода образующаяся при нагреве из входящих в кристаллическую решетку гидроксильных ионов (OH^- и H^+) называется **конституционной**.
- Температура выделения конституционной воды выше, чем кристаллизационной (до 1300 град. С).
- Она характерна для многих минералов, например, талька ($\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$), каолинита ($\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$) и др.

- Наличие в породах **химически связанной воды** проявляется только при ее нагревании.
- Тем не менее, она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах.

- При удалении **химически связанной воды** из минерала нарушается кристаллическая решетка, при этом происходит **ослабление и разрушение** породы.
- Некоторые породы, например **глины**, при удалении воды, **упрочняются**.

- **Парообразная вода** — водяной пар, который содержится в почвенном воздухе. Почвенный воздух настолько насыщен парами воды, что даже незначительное понижение температуры приводит к процессу конденсации влаги. Взаимодействие «парообразная вода — жидкая вода» постоянно находится в динамике: от высокотемпературных участков — к более холодным. Именно этот процесс поступательного движения воды является важнейшим источником снабжения растений.

- Он особенно заметен в условиях заасфальтированных городских улиц. На фоне умеренного климата типична следующая картина: в теплые периоды года парообразная вода атмосферы устремляется в холодные слои почв и почвообразующих пород с возможной ее конденсацией. И, наоборот, в зимнее время происходит зеркальный процесс — движение пара из глубоких слоев и его конденсация в



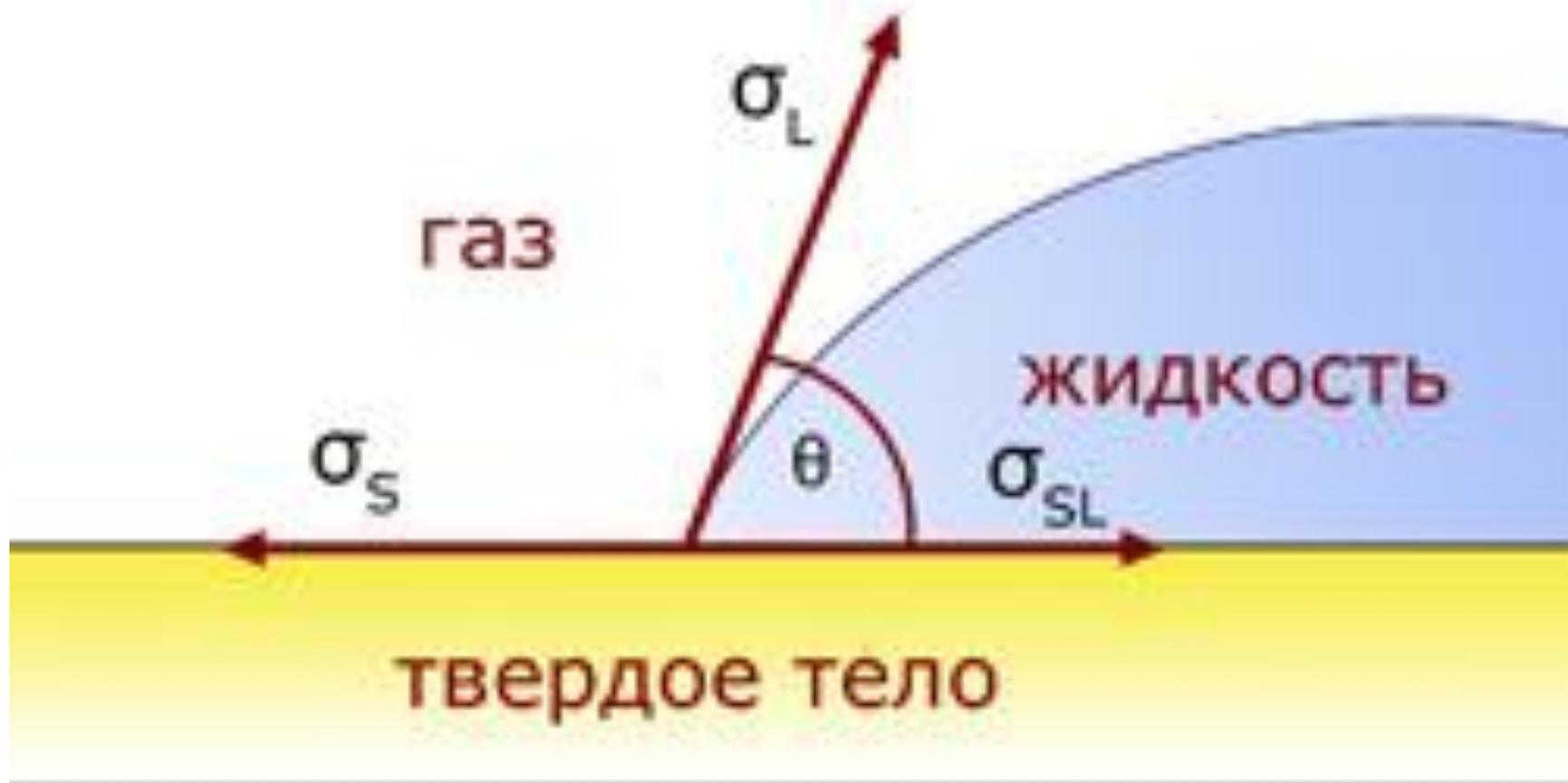
Физически связанная вода

- соединена **силами молекулярного сцепления** (притяжения) с твердыми частицами породы.
- Она обволакивает их пленкой воды.
- Ее количество в породе зависит от **смачиваемости** пород.

Смачиваемость

- - это способность горной породы покрываться пленкой жидкости.
- Она характеризует их **адсорбционную способность**, т.е. способность **концентрировать** (адсорбировать) на своей поверхности молекулы жидкости за счет электростатического притяжения.

- Величина смачивания твердой поверхности жидкостью характеризуется **краевым углом θ** между плоскостью твердого тела и касательной к поверхности капли, проведенной из точки касания капли с телом.



Гидрофильная
поверхность
 $0^\circ < \Theta < 90^\circ$



Гидрофобная поверхность
 $90^\circ < \Theta < 150^\circ$



Супергидрофобная
поверхность
 $150^\circ < \Theta < 180^\circ$



- Большинство горных пород относится к хорошо смачиваемым водой породам (гидрофильным $\theta < 90$)
- Встречаются частично или полностью несмачиваемые водой породы (гидрофобные, $\theta > 90$) - сера, угли, битуминозные песчаники и некоторые другие породы.



- Методы измерения краевого угла смачивания:
 - метод лежащей капли
 - метод пластины Вильгельми
 - метод поднятия по капилляру (метод Вашбурна)
 - метод отраженного света

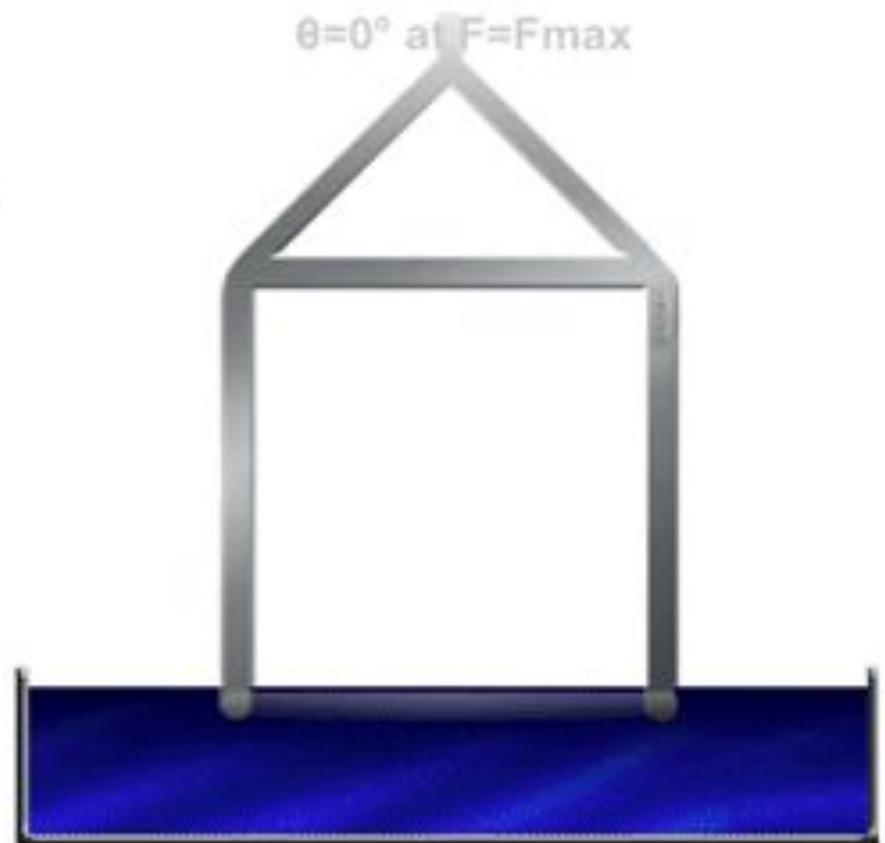
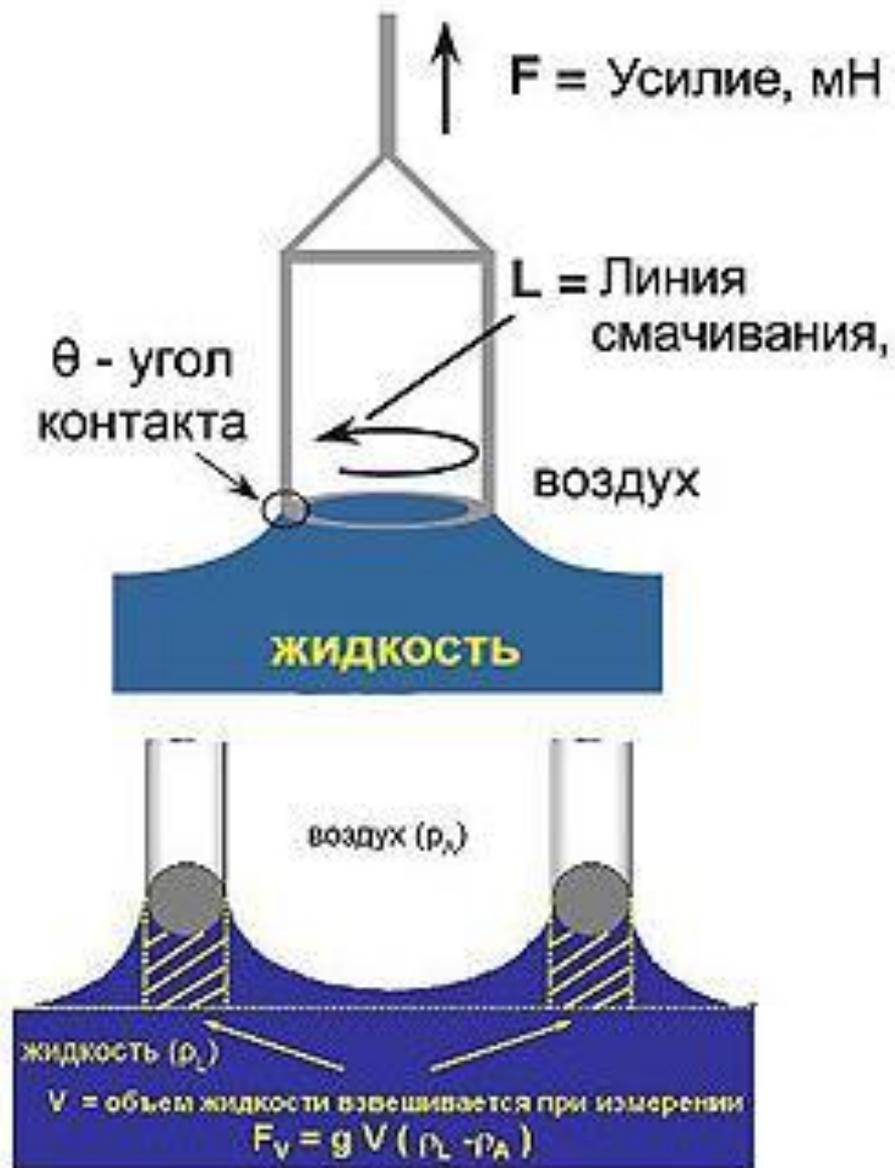
- В методе лежащей капли измеряется угол между твердой поверхностью и жидкостью в точке контакта трех фаз. Соотношение сил межфазного и поверхностного натяжения в точке контакта трех фаз может описываться уравнением Юнга, на базе которого можно определить краевой угол



- **Метод кольца Дью Нуи.**

Метод пластины Вильгельми

- Это классические методы для определения поверхностного/межфазного натяжения, который основан на измерении максимального усилия (F) для отрыва кольца с известной геометрией (длиной смачивания, L), сделанного из хорошо смачиваемого материала (угол смачивания = 0°). При подъёме кольца жидкость стремится стечь с него, что приводит к постепенному утончению плёнки жидкости и отрыву кольца



- Метод поднятия по капилляру - частный случай динамического метода пластины Вильгельми был разработан для характеристики смачиваемости порошков и пучков волокон по степени проникновения жидкости (адсорбции).
- Метод основан на измерении прироста массы образца во времени (m^2/t). Порошок или волокнистый материал (трава) помещается в стеклянную трубку с фильтром на одном конце. Эта трубка опускается в жидкость (с известным поверхностным натяжением), которая проникает через фильтр и смачивает порошок/волокна.



- **Адсорбционная способность пород**
(АДСОРБЦИЯ - процесс поглощения газов, паров, веществ из раствора или газовой смеси поверхностным слоем жидкости или твердого тела — адсорбентом (активированным углем и др.) **возрастает при наличии в них растворимых солей, глинистых минералов, а также с увеличением удельной поверхности твердой фазы.**

- **Физически связанная вода**
удаляется из породы при
нагревании до 105-110 град. С.

- Количество **физически связанной воды** в породах оценивается показателями:
- **максимальной гигроскопичности**
- и
- **максимальной молекулярной влагоемкости.**

Максимальная гигроскопичность -

$$W_r$$

- - это наибольшее количество влаги, которое способна **адсорбировать** (концентрировать) горная порода из воздуха с относительной влажностью 94%.
- Она характеризует **адсорбционную способность породы**.

Молекулярная или пленочная влажгоемкость $-W_m$

- - это вода, удерживаемая силами молекулярного притяжения на поверхности частиц породы.

- Отличительной особенностью **молекулярной влагоемкости** является ее способность передвигаться под действием молекулярных сил.

- **Физически связанная (сорбированная) вода** существует в двух вариантах: прочносвязанная и рыхлосвязанная влага
- **Физически прочносвязанная (гигроскопическая) вода** адсорбируется твердыми частицами почвы из водяных паров почвенного воздуха. Она прочно удерживается силами электростатического притяжения. Предельное количество воды, которое может быть поглощено из парообразного состояния при относительной влажности воздуха, близкой к 100% называют **максимальной гигроскопичностью (МГ)**.
- **Физически рыхлосвязанная (пленочная) вода** представляет собой многомолекулярную пленку вокруг твердых частиц. Вода находится как бы в вязко-жидкой форме. Подвижность такой воды —

3. Свободная вода

в породах может находиться в виде:

- **капиллярной воды**,
удерживаемой в мелких порах силами капиллярного притяжения;
- **гравитационной воды**,
заполняющей крупные поры и передвигающейся в породах под действием сил тяжести и напора.

- **1. Капиллярная вода** находится в капиллярах или на стыках (точках соприкосновения) частиц. Она может находиться:
 - **В разобращенном или неподвижном состоянии** как, **влажность разрыва капилляров (ВРК)**, при которой подвижность капиллярной воды в процессе снижения влажности резко уменьшается. Такая вода — неподвижна.
 - **В капиллярно-подвижном виде**, когда все капилляры заполнены.

Полной влагоемкостью

- называется максимальное количество связанной, капиллярной и гравитационной воды, которое способна вместить в себя порода.

$$W_n = \frac{(m_w - m_0)}{m_0} \cdot 100$$

где m_w – масса породы, максимально насыщенной водой;
 m_0 – масса сухой породы.

- **Водоотдача** - способность породы отдавать воду под механическим воздействием.
- Она представляет собой разность между полной W_n и молекулярной W_m влагоемкостями.

$$\xi = W_n - W_m$$

- **Таким образом, чем больше молекулярная влагоемкость пород, тем меньше их коэффициент водоотдачи.**
- **Слабая водоотдача пород обычно снижает производительность, затрудняет осушение месторождения, транспортирования и дробления полезного ископаемого.**

Коэффициент проницаемости

$$K_{\text{пр}}$$

- характеризует способность пород пропускать сквозь себя воду.
- Его можно определить из уравнения Дарси:

$$V = K_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta L} \cdot \frac{1}{\eta}$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta F} \cdot \eta$$

где $V=Q/S$ – скорость фильтрации;

Q – расход воды через площадь S в единицу времени;

ΔF – перепад давления на пути фильтрации;

ΔL – толщина фильтруемого слоя;

η - вязкость жидкости (пуаз кг сек/м²).

- **Практической единицей измерения проницаемости является **дарси** - это величина проницаемости образца породы площадью 1см^2 , длиной 1 см , через который, при перепаде давления в 1 атм , проходит в 1 сек 1см^3 жидкости с вязкостью в 1 пуаз .**

- В горном деле чаще всего используют **коэффициент фильтрации**:

$$K_{\phi} = K_{np} \cdot \frac{\rho}{\eta}$$

где ρ – плотность жидкости (воды)

**В зависимости от величины
коэффициента фильтрации, породы
разделяют на:**

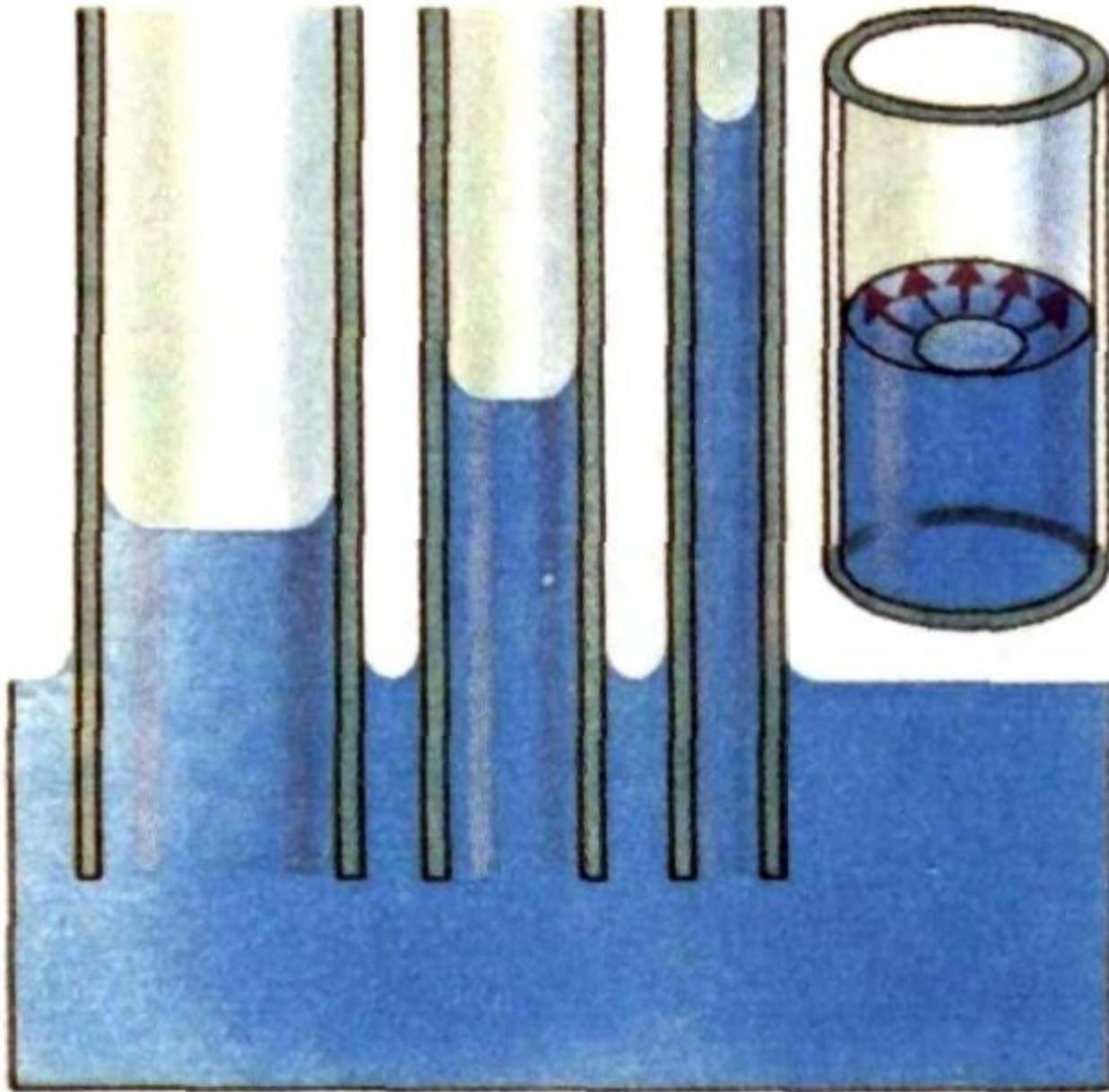
- водоупорные ($K_{\phi} < 0,1$ м/сутки);
- слабопроницаемые ($0,1 < K_{\phi} < 10$);
- среднепроницаемые ($10 < K_{\phi} < 500$);
- легкопроницаемые ($K_{\phi} > 500$ м/сутки).

- На проницаемость существенное влияние оказывает средний диаметр пор, который можно определить по формуле, выведенной на основании закона Пуазеля:

$$D = \sqrt{\frac{32 \cdot K_{np}}{P}}$$

- где **P** - пористость

- По **сверхкапиллярным порам** жидкость движется под действием сил тяжести или напора по обычным законам гидродинамики.
- В **капиллярных** порах движение жидкости происходит вследствие сил капиллярного притяжения.
- **Субкапиллярные** поры практически жидкость не пропускают.



- Так, например, глины обладают водоупорными свойствами, несмотря на то, что их пористость достигает 50% и более.
- Это связано с тем, что поры в глинах по своим размерам относятся к **субкапиллярным**.

- Капиллярная вода встречается в трёх состояниях:
- Капиллярно-подвешенная вода, заполняющая капиллярные поры при увлажнении сверху (дождь). Своему названию она обязана своей способности «висеть», над сухим слоем, не стекая.
- Капиллярно-подпертая вода, которая образуется при подъёме воды снизу от горизонта грунтовых вод по капиллярам на определённую высоту. Эта вода содержится непосредственно над водоносным горизонтом и гидравлически с ним связана.
- Капиллярно-посаженная (подвешено-подпертая) вода образуется в слоистой грунтовой толще мелкозернистого слоя при подсыпке ее слоем крупнозернистой₄₈ над пределом изменения этих слоев

Свободная вода

- **Гравитационная вода** — свободная форма воды в породах, передвигающаяся под действием сил тяжести.
- Занимает крупные поры. Принимает участие в формировании уровня грунтовых вод.
- Гравитационная вода — явление временное.



- Вид воды определяет возможность выбора способов осушения месторождений.
- Наиболее легко поддаются дренажу (осушению) гравитационные воды, значительно труднее - капиллярные воды (электродренажем).



Различия в свойствах свободной и связанной воды

Температура замерзания связанной воды ниже, чем свободной (-1 до -100°C).

Связанная вода характеризуется существенно отличными значениями вязкости, теплоемкости, электропроводности и др.

Связанная вода имеет значительно более низкую растворяющую способность.

Связанная вода не передает гидростатического давления и не передвигается под действием силы тяжести.

ВОДА В ЖИДКОМ И ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

СВЯЗАННАЯ

ХИМИЧЕСКИ

КОНСТИТУЦИОННАЯ

КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ

ФИЗИЧЕСКИ

ПРОЧНОСВЯЗАННАЯ

РЫХЛОСВЯЗАННАЯ

СВОБОДНАЯ

КАПИЛЛЯРНАЯ

КАПИЛЛЯРНО-ПОДВЕШАННАЯ

КАПИЛЛЯРНО-ПОСАЖЕННАЯ

КАПИЛЛЯРНО-ПОДПЁРТАЯ

ГРАВИТАЦИОННАЯ

ПРОСАЧИВАЮЩАЯСЯ

ВОДА ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Тиксотропия

- В некоторых породах, содержащих физически связанную воду, при сотрясении происходит переход последней в свободную. Это явление носит название **ТИКСОТРОПИИ**.
- **Тиксотропии** подвержены влажные, глинистые грунты, содержащие более 2% частиц размером менее 0,002 мм.

- Явление **тиксотропии** может быть вызвано механическим встряхиванием, вибрацией, ультразвуком, электрическим током.
- По окончании воздействия появившаяся вода трансформируется в физически связанную и восстанавливается структура грунта

- Воздействие жидкости на горную породу может быть **динамическим** и **статическим**.
- **Динамическое воздействие**, как правило, приводит к механическому разрушению и перемещению горных пород;
- **Статическое** - к набуханию, размягчению, растворению.

- **Набухание** - это способность породы увеличивать свой объем при насыщении водой. Обычно характеризуется коэффициентом набухания, равным отношению объема набухшей породы V_H к ее первоначальному объему V_0 , т.е.:

$$K_H = V_H / V_0 > 1$$

- **Набуханию** подвержены глины и глинистые породы. У остальных пород набухание практически отсутствует. Коэффициент набухания глин колеблется от 8 до 1,5.

- Воздействие воды на породы может привести к их **растворению**.
- **Хорошей растворимостью** обладают галоиды, меньшей растворимостью - ангидриды и гипс.
- Доломиты и известняки относятся к **слаборастворимым** породам.
- Кварциты, сланцы, граниты и другие метаморфические породы практически **нерастворимы**.
- Растворимость горных пород увеличивается, если в них циркулируют водные растворы различных кислот.

- Гидравлические и газодинамические параметры пород зависят от внешних факторов: **температуры** и **давления**.
- **Повышение** температуры **снижает** вязкость жидкостей, а проницаемость соответственно **возрастает**.

- **Гидравлические параметры используются в расчетах:**
- **по осушению месторождений и сооружению водоотлива,**
- **по определению устойчивости бортов карьера и откосов отвала.**

- Если в горных породах циркулирует нефть, то процессы накопления и распространения нефти в них характеризуются соответственно **нефтеемкостью** и **нефтепроницаемостью**.
- В случае наличия в породах газов - **газопроницаемостью, газоотдачей** и т.д. - показателям, по существу не отличающимися от гидравлических.

- **Гидравлические и газодинамические свойства вмещающих пород приобретают решающую роль при разработке нефтяных и газовых скважин.**
- **Нашло применение на шахтах ослабление угольного массива нагнетанием воды в пласт под давлением. В этом случае усиливается влияние некоторых гидравлических свойств - водопроницаемости, смачиваемости, влагоемкости.**

- **Упрочнение пород** также связано с гидравлическими свойствами горных пород. В этом случае нагнетают различные растворы: цемент, гидрогель кремневой кислоты, битум, смолы и др. Частички скрепляющего вещества, проникая в поры горной породы, закупоривают их, цементируя воедино зерна и повышая общую прочность породы, снижая при этом водопроницаемость.

