
Петрофизика

Пористость

ВИДЫ ПОРИСТОСТИ

- Горные породы, руды, каменные угли и минералы, слагающие земную кору, не являются сплошными телами. Все они обладают *емкостным пространством*, то есть содержат полости (поры), которые в условиях естественного залегания заполнены пластовой водой, газами, нефтью или смесью этих флюидов.
- По происхождению полости делятся на первичные, которые сформировались в момент образования горной породы, и вторичные, возникшие уже после образования породы, в процессе ее литогенеза.
- Первичные поры, достаточно равномерно рассеянные в массиве терригенных и карбонатных пород, называются межгранулярными или межзерновыми.
- К вторичным полостям относятся трещины, каверны или каналы выщелачивания минералов.
- *Классические примеры пород с первичными порами — это осадочные терригенные породы: пески, песчаники, глины (рис. 9, а, б, в).* Примеры пород с вторичными полостями — трещинные и трещинно-кавернозные известняки и доломиты (рис. 9, г, д, е).
- В терригенных породах могут образовываться вторичные полости (каверны и трещины) при глубоком катагенезе; в известняках, доломитах и мергелях — сохраняться первичные поры.

Коэффициент пористости

- Коэффициент пористости оценивает объем всех видов пор (полостей) в горных породах:
- (3.1) $K_p = V_p/V$, где V_p – объем полостей, заключенных в породе; V – объем породы;
- Коэффициент общей пористости
- (3.2) $K_p = (V_{п.мз} + V_T + V_{кав})/V =$
 $= K_{п.мз} + K_T + K_{кав}$, где $V_{п.мз}$, V_T , $V_{кав}$ – объемы пор (межзерновых), трещин и каверн соответственно;
 $K_{п.мз}$, K_T , $K_{кав}$ – коэффициенты межзерновой пористости, трещиноватости и кавернозности соответственно.

Форма пор

- **Форма первичных полостей** — пор:
- **ромбоэдральная** (хорошо отсортированные рыхлые и окатанные песчаники);
- **тетраэдрическая** (сильно уплотненные породы);
- **щелевидная** (глины, слюды и другие минералы с кристаллической решеткой пластинчатой структуры);
- **в виде канальцев расширяющейся или сужающейся формы** (плохо отсортированные обломочные образования);
- **пузырчатая** (ненарушенные магматические породы).
- **Форма вторичных полостей:**
- **трещиновидная** (скальные метаморфические и магматические породы);
- **каверновидная** (карбонатные разности и гипсы);
- **каналовидная** (лессы) и **ячеистая** (известковистые и кремнистые туфы).

Объем пор

- **Объем пор зависит от:**
- - формы зерен и размера зерен;
- - сортировки зерен (чем лучше отсортирован материал, тем выше пористость);
- - укладки зерен, например при кубической укладке пористость составляет $\approx 47,6\%$, при ромбической укладке – $25,96\%$;
- - однородности и окатанности зерен;
- - вида цемента: базальный цемент = $3-7\%$, поровый = $7-12\%$, пленочный = $12-16\%$, соприкасающийся вид цементации = $16-26\%$.
- *Необходимо помнить, что не все виды пор заполняются флюидами. Часть пор бывает изолирована, в основном, это внутренние поры.*

Размеры пор и каверн

- По размерам поры и каверны можно характеризовать **эффективным диаметром**, а трещины — **средней шириной (раскрытием)**.
- В основу классификации пор по размерам положено **взаимодействие твердой поверхности с насыщающей поры пластовой водой**.
- В наиболее крупных, сверхкапиллярных, порах, имеющих диаметр $d_{\text{эф}} > 10^{-4}$ м, доля воды, связанной капиллярными силами и силами адсорбции с твердой фазой, сравнительно невелика. Характерны для слабосцементированных галечников, гравия, крупно- и среднезернистых песков, обломочных разностей карбонатных пород; в зонах выщелачивания карбонатных пород они могут достигать весьма больших размеров (каверны, карсты).
- В капиллярных порах ($d_{\text{эф}} = 10^{-7} \div 10^{-4}$ м) радиус менисков, образовавшихся на границе двух фаз в результате поверхностного натяжения, таков, что они препятствуют движению воды под действием силы тяжести, т.е. вода в этих порах удерживается капиллярными силами. Типичны для сцементированных песчаников, обломочных и кристаллических известняков, доломитов.

- **Сверхкапиллярные и капиллярные поры** составляют основную емкость гранулярных коллекторов.
- **В субкапиллярных порах** ($d_{\text{эф}} = 2 \cdot 10^{-9} \div 1 \cdot 10^{-7}$ м) велика доля воды, на которую действуют адсорбционные силы со стороны твердой поверхности. Поры в этом случае заполнены рыхло- и прочносвязанной водой, которая практически не способна к перемещению в поле силы тяжести или под влиянием сил поверхностного натяжения.

Свойственны глинам, мелкокристаллическим и мелоподобным известнякам, доломитам, трепелам, пепловым туфам и другим тонкозернистым породам.

- **В микропорах** ($d_{\text{эф}} < 2 \cdot 10^{-9}$ м), диаметр которых соизмерим с толщиной слоя прочносвязанной воды, пластовая вода при температурах менее 70°C практически неподвижна.

Микропоры установлены у некоторых природных цеолитов.

Трещиноватость

- ***Трещиноватость*** наиболее характерна для плотных, низкопористых горных пород.
- Происхождение трещин чаще всего тектоническое, хотя в природе можно встретить трещины диагенеза (доломитизация карбонатов), трещины уплотнения и трещины автогидроразрыва в зонах образования аномально высоких пластовых давлений.

Типы пористости

- По характеру взаимной связи между порами и движению флюидов в породе различают:
 - общую,
 - открытую,
 - эффективную
 - и динамическую пористости.
-

Коэффициент общей пористости

- **Коэффициентом общей пористости k_p** называется объем всех полостей, как сообщающихся между собой (или открытых), так и не сообщающихся (закрытых). Количественно общую пористость рассчитывают по соотношению плотностей сухой породы и минеральных зерен:

$$(3.3) \quad k_p = (V - V_{ТВ}) / V = 1 - \delta_{п.с} / \delta_{ТВ},$$

- где V — объем сухой породы; $V_{ТВ}$ — объем твердой фазы в породе; $\delta_{п.с}$, $\delta_{ТВ}$ — плотности сухой ненарушенной породы и твердой фазы (минералогическая плотность породы) соответственно

Коэффициентом открытой пористости

- **Коэффициентом открытой пористости** оценивается объем пор, сообщающихся между собой в породе и с окружающей средой.
- (3.4) $k_{п.о} = V_{п.о} / V$, где $V_{п.о}$ — объем пор, заполненных керосином.
- Для низкоглинистых высокопористых и рыхлых пород общая и открытая пористости отличаются незначительно, тогда как для пород с большим содержанием субкапиллярных пор (например, глины) различие может быть весьма существенным.
- **Коэффициент эффективной пористости** $k_{п.эф}$ (понятие введено Л. С. Лейбензоном) характеризует полезную емкость породы для углеводородов и представляет собой объем открытых пор за исключением объема, заполненного физически связанной и капиллярно-удержанной пластовой водой:
- (3.5) $k_{п.эф} = (V_{п.о} - V_{в.св}) / V = k_{п.о} (1 - k_{в.св})$,
где $k_{в.св}$ — коэффициент водонасыщения, определяющий содержание связанной воды в единице объема пор; $V_{в.св}$ — объем связанной воды.

Коэффициент динамической пористости

- **Коэффициент динамической пористости $k_{п.д}$** показывает, в какой части объема породы при заданном градиенте давления может наблюдаться движение жидкости или газа. Этот объем определяют на содержащем остаточную воду и насыщенном керосином образце как разницу между объемом эффективных пор $(V_{п.о} - V_{в.св})$ и объемом пор $V_{н.о}$, в которых остался керосин после его вытеснения из породы другим флюидом (обычно воздухом или азотом):

- (3.6) $k_{п.д} = (V_{п.о} - V_{в.св} - V_{н.о})/V =$
- $(V_{п.эф} - V_{н.о})/V = k_{п.о} (1 - k_{в.о} - k_{н.о})$

СТРУКТУРА ЕМКОСТНОГО ПРОСТРАНСТВА

- Емкостное пространство горной породы, образованное сообщающимися между собой порами, трещинами и кавернами, является весьма сложным по своему строению и состоит из сочетания емкостей разных форм и размеров. Одни поры хорошо проводят флюиды, другие — заполнены адсорбированной и капиллярно-удержанной водой. Структура емкостного пространства изучаемой породы характеризуется распределением пор по размерам. Существуют прямые и косвенные методы изучения структуры емкостного пространства.
-

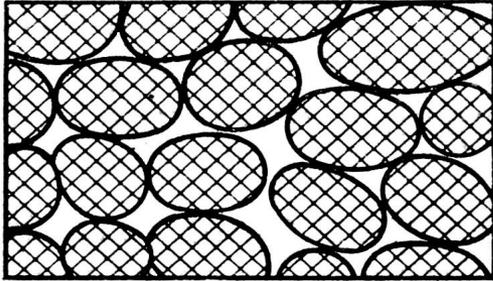
Структура порового пространства -

ЭТО

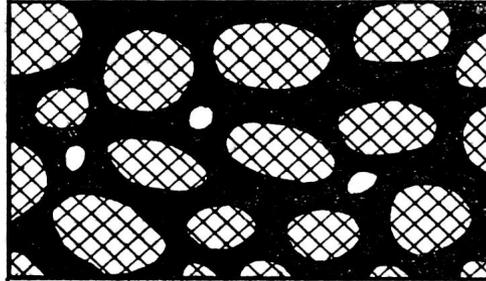
характер распределения пор по
размерам, форме и
конфигурации, а также по
взаимному расположению пор
относительно друг друга

Примеры пород с различной пористостью

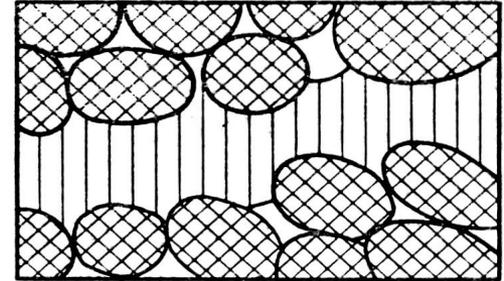
а



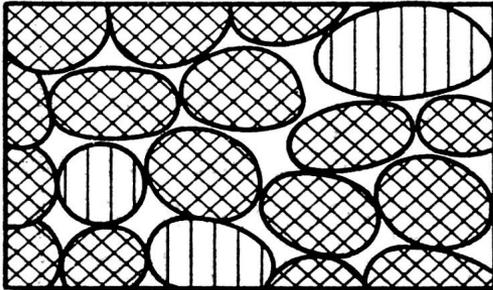
б



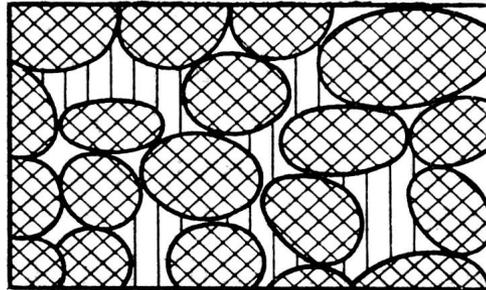
в



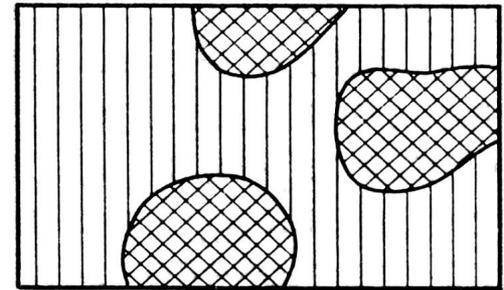
г



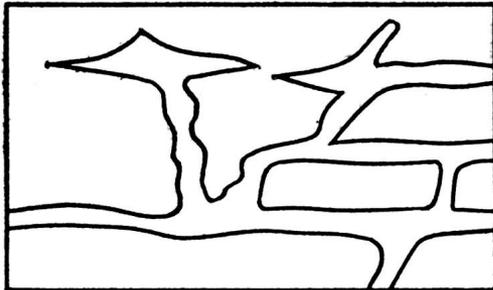
д



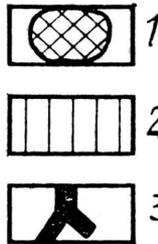
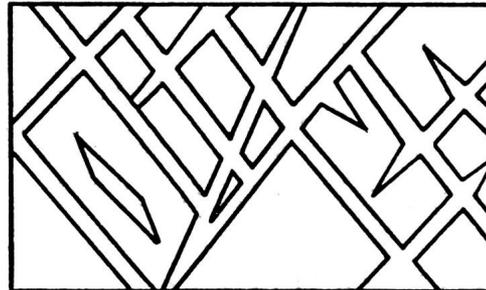
е



ж

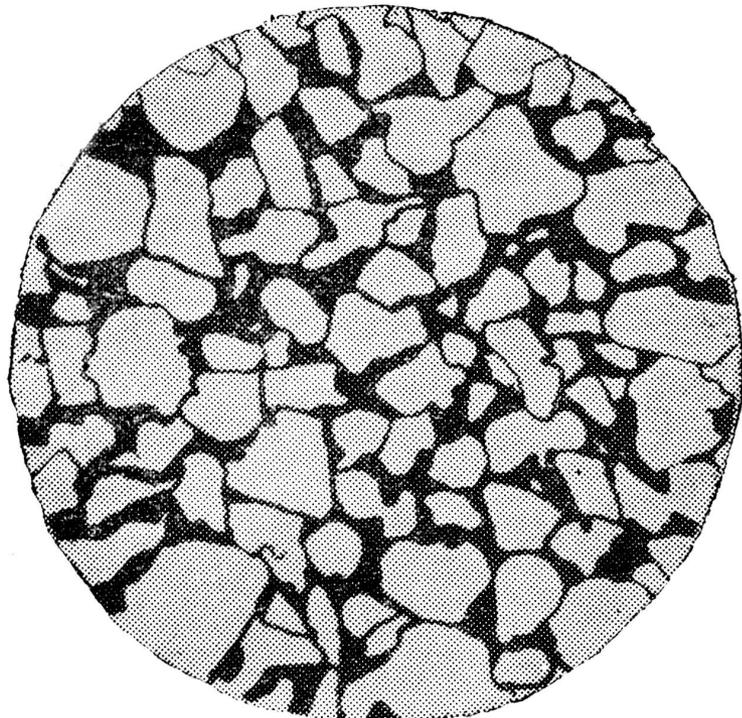


з

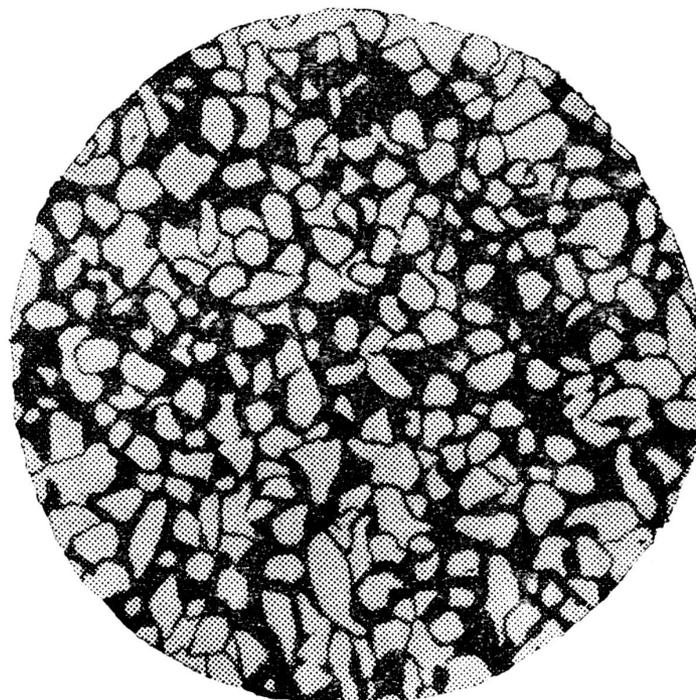


а – хорошо отсортированная порода; б - хорошо отсортированная цементов в промежутках между зернами; в - глинистый слоистый песчаник; г - полимиктовый глинистый песчаник; д - глинистый песчаник с рассеянным глинистым материалом; е - песчаная глина – неколлектор; ж - трещинно-кавернозный коллектор; з - трещинный коллектор.

Структура порового пространства



Песчаник
среднезернистый.
Эффективная
пористость 20%,
проницаемость 1,6Д



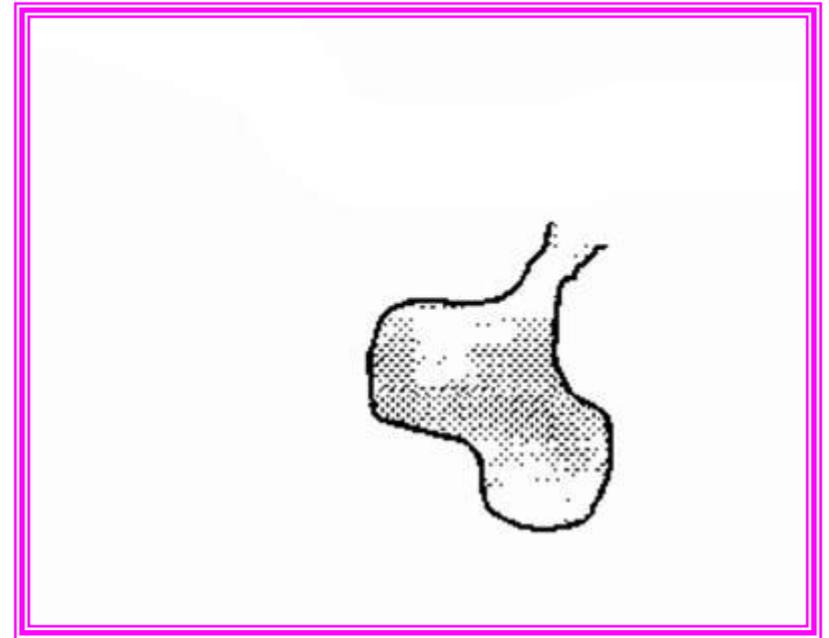
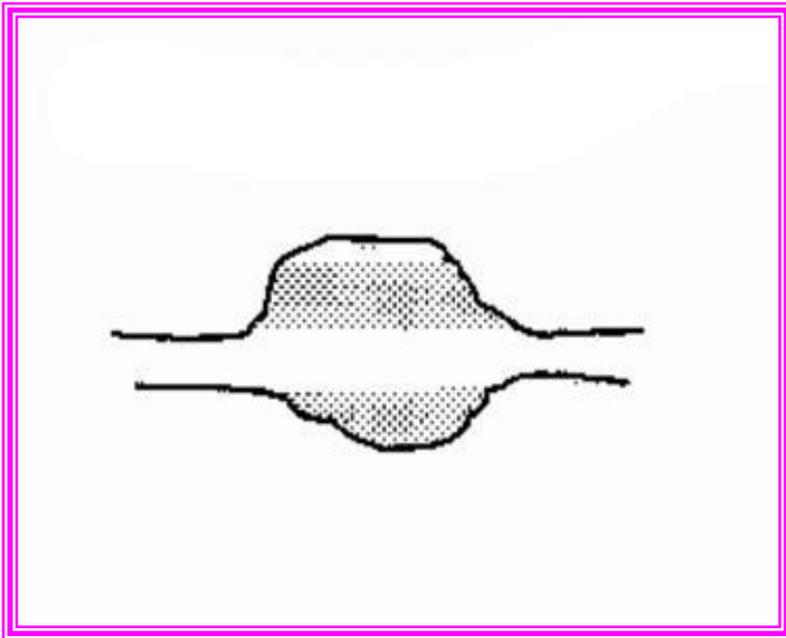
Песчаник мелкозернистый
слабосцементированный.
Эффективная пористость
30%, проницаемость 1,5Д

Поры

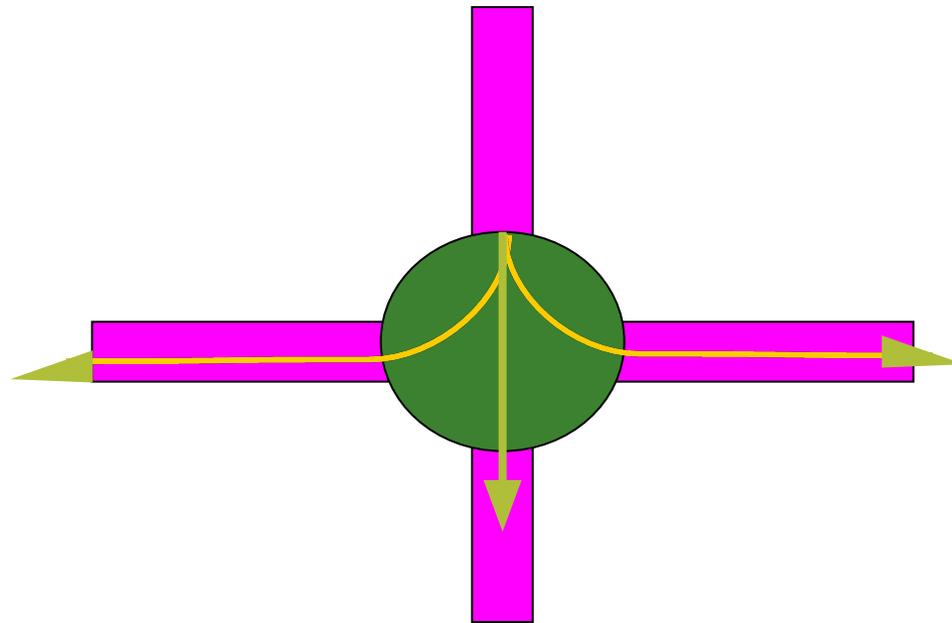


Проточные

Тупиковые

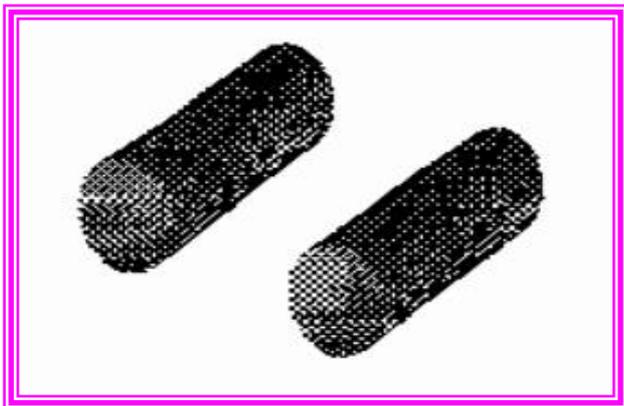


Координационное число –
количество капилляров,
подходящих к одной крупной поре.

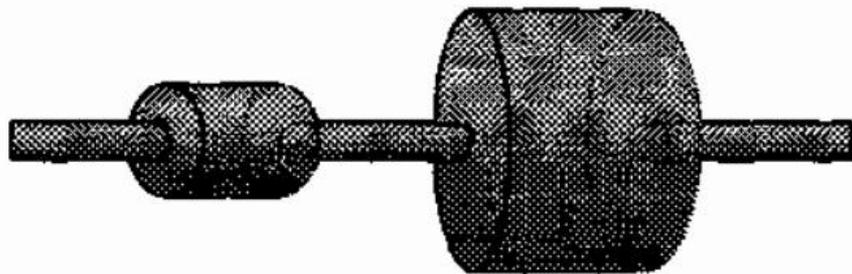
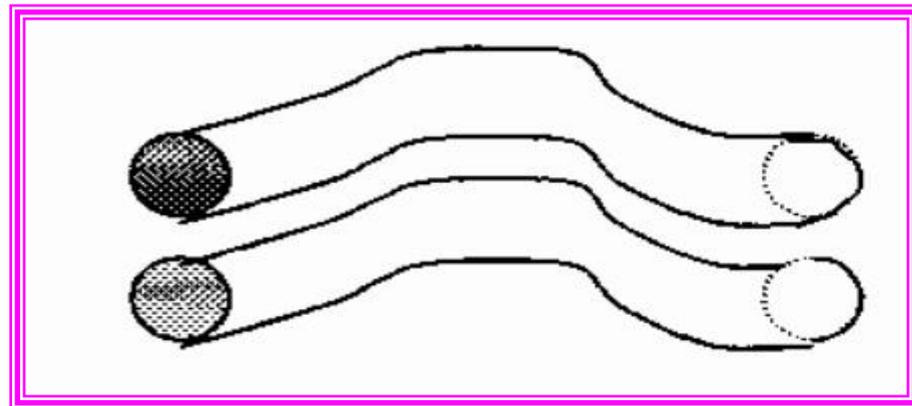


Модели

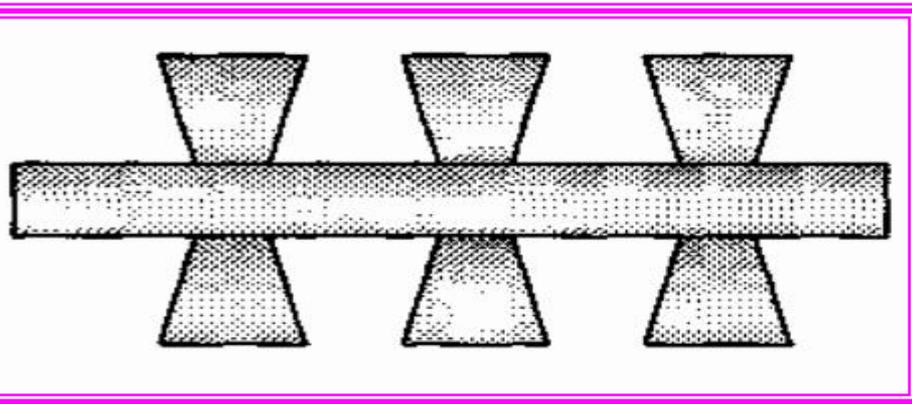
**Модель прямолинейных
параллельных капилляров**



**Модель извилистых
параллельных капилляров**

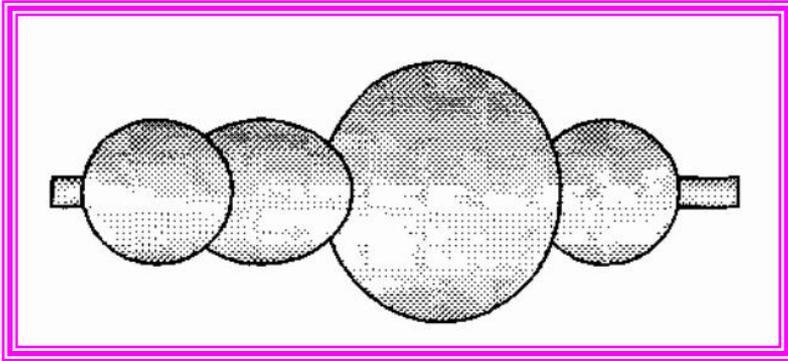


**Серийная модель из
цилиндрических полостей**

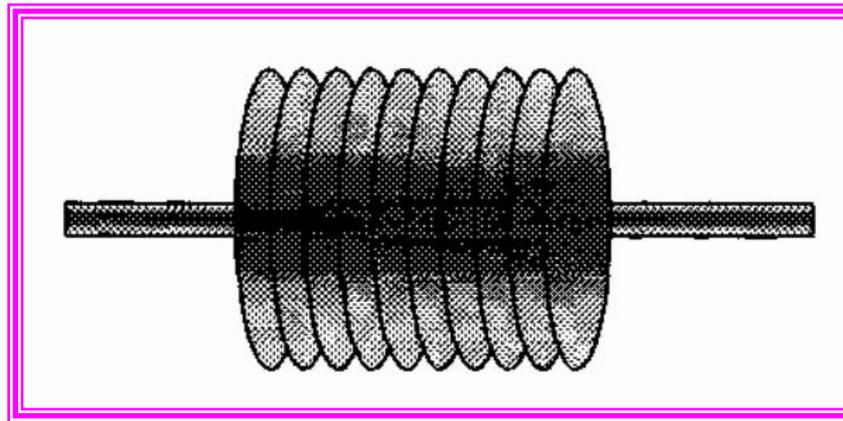
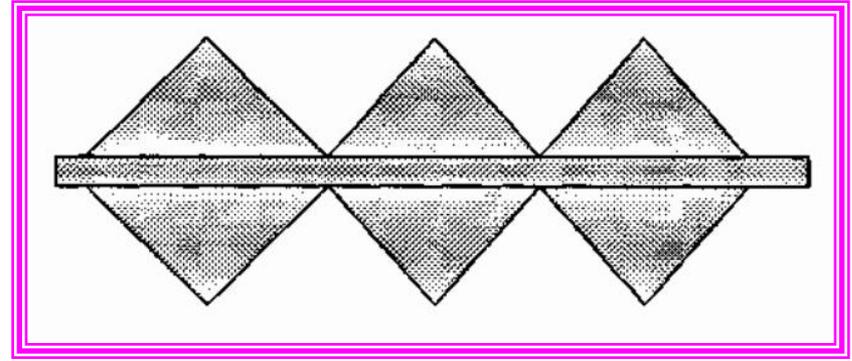


**Модель «капилляры с
тупиковыми порами»**

*Серийная модель из
сферических полостей*



*Модель «периодически
гофрированный капилляр»*



*Модель «пора с диффузной
копировкой»*

Коэффициент общей пористости *kn* некоторых минералов (по Б. П. Беликову, К. С. Александрову и Т. В. Рыжовой),%:

Минерал	Коэффициент общей пористости	Минерал	Коэффициент общей пористости
Гранат	0,09	Биотит	1,56
Гранат (пироп)	0,23	Флогопит	1,65
Диопсид	0,15	Микроклин	0,622
Авгит	2,02	Альбит	0,421
Эгирин	0,57	Олигоклаз	0,310
Диалаг	1,20	Лабрадор	0,402
Роговая обманка	0,89	Нефелин	0,151
Мусковит	2,14		

Горные породы делятся на три основные группы:

Осадочные

Изверженные

образовались в результате застывания и кристаллизации магматической массы сложного минералогического состава

Метаморфические

образовались из осадочных и изверженных пород под влиянием высоких температур, давлений и химических воздействий

образовались из продуктов разрушения литосферы

ПОРИСТОСТЬ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

- *Осадочные породы, по М. С. Швецову, можно подразделить на три большие группы: 1) обломочные; 2) хемогенные и биогенные; 3) глинистые.*
- **К обломочным относят** грубообломочные, песчаные, алевроитовые и эффузивно-осадочные породы;
- **к группе хемогенных и биогенных** пород — алюминистые, железистые, марганцовистые, кремнистые, фосфатные, карбонатные, сульфатные, соляные, каустобиолиты;
- **группа глинистых пород** подразделяются на гидрослюдистые, каолинитовые, монтмориллонитовые, хлоритовые.
- Пористость обломочных, карбонатных и глинистых пород изменяется в широких пределах. Ее конкретное значение для каждой породы определяется многими факторами, главными из которых являются:
- ***максимальная глубина погружения, содержание глинистых минералов, интенсивность вторичных процессов, температура и возраст пород.***

Классификация терригенных пород по гранулометрическому составу

- **Грубозернистые > 1 мм.**
 - **Крупнозернистые – 1 – 0,5 мм.**
 - **Среднезернистые – 0,5 – 0,25 мм.**
 - **Мелкозернистые $< 0,25$ мм.**
-

Введем понятие коэффициента необратимого уплотнения породы $\beta_n(t, T)$

$$(3.16) \quad \beta_n(t, T) = -\frac{1}{V_{п.о}} \frac{dV_{п.о}}{d(p - p_{пл})} = -\frac{1}{V_{п.о}} \frac{dV_{п.о}}{g(\delta_{п.ср} - \delta_{п.в})dh}$$

Величина коэффициента необратимого уплотнения зависит не только от литологии и структуры породы, но и от времени уплотнения осадка t и его температуры T , т.е. от конкретных геологических условий. Подставив выражение (3.16) в (3.15), получим дифференциальное уравнение для определения закономерности уплотнения осадочных пород:

$$(3.17) \quad \frac{dk_{п.о}}{(1 - k_{п.о})k_{п.о}} \approx -\beta_n(t, T) g(\delta_{п.ср} -$$

Коэффициент необратимого уплотнения пород уменьшается с глубиной.
Однако это уменьшение невелико и для практических целей можно воспользоваться его средним значением для определенных литотипов пород.

Интегрирование уравнения (3.17) позволяет получить выражение; для описания изменения пористости осадочных пород с глубиной:

$$(3.18) \quad \frac{k_{(п.о)h}}{k_{(п.о)h=0}} = \frac{\exp[-\beta_{п}(t,T)g(\delta_{п.ср}-\delta_{в.ср})h]}{1-k_{(п.о)h=0}\{\exp[-\beta_{п}(t,T)g(\delta_{п.ср}-\delta_{в.ср})h]\}}$$

где $k_{(п.о)h}$ — пористость на глубине h ; $k_{(п.о)h=0}$ — то же на поверхности.
Уравнение (3.18) хорошо описывает необратимые изменения пористости осадочных пород.

- Таким образом, несмотря на литологическое различие пород (глинистые породы, песчаники и алевролиты, известняки и мергели), первичная пористость пород необратимо и закономерно уменьшается с глубиной по одному закону. Даже коэффициент необратимого уплотнения для исследованных пород изменяется не столь уж значительно—в Зраза от $16,3 \cdot 10^{-3}$ до $48 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹.
- Однако нельзя без разбора использовать эти зависимости для прогнозной оценки пористости на глубинах, не вскрытых скважинами, — слишком велик разброс значений пористости на одной и той же глубине. Этот разброс существенно снижает достоверность экстраполяции и обусловлен в песчано-глинистых породах двумя главными причинами:
 - 1) различным содержанием глинистых и карбонатных минералов в порах породы, отложенных в процессе ее образования;
 - 2) различной интенсивностью вторичных катагенетических процессов, сопровождаемых переносом минералов в поровом пространстве породы.