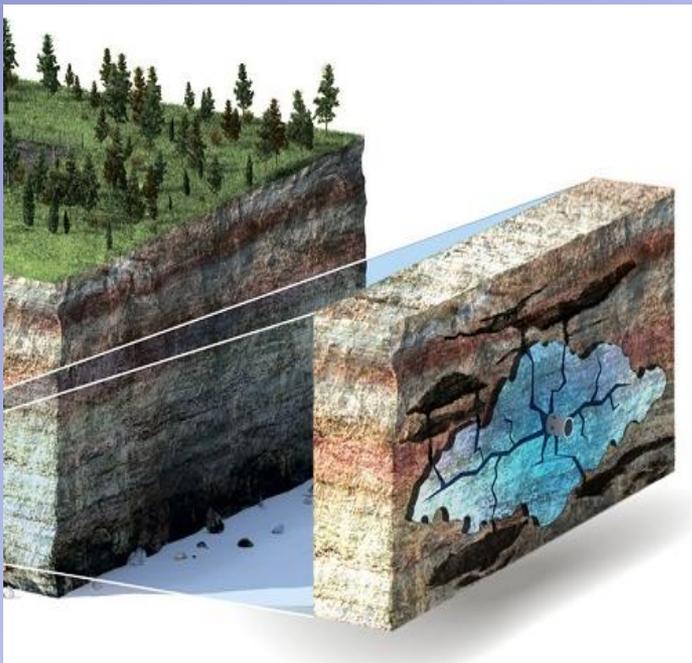


**НАО «КАРАГАНДИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБЫЛКАСА САГИНОВА»**

**Кафедра «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»**



# **ЛЕКЦИЯ**

**Тема: КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА  
НЕФТЕГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТОВ**

**Дисциплина: Петрофизика  
нефтяного пласта**

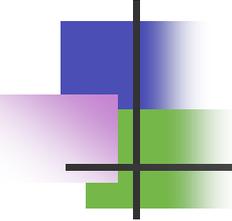


**Автор:**

**к.т.н., доц. Пономарева М.В.**

**Образовательная программа:**

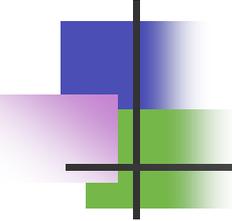
**7М07201 «Геофизические методы поисков  
и разведки МПИ»**



# План лекции

---

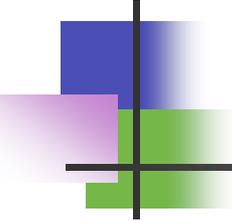
1. Структура пористых сред
2. Гранулометрический состав горных пород
3. Седиментационный (седиментометрический) анализ
4. Коэффициент неоднородности горных пород
5. Карбонатность горных пород



## Цель лекции

---

*Цель лекции* – рассмотреть основные структуры горных пород, их гранулометрический состав и карбонатность; методику проведения и применение седиментационного (седиментометрического) анализа; методику расчета коэффициента неоднородности.



## Роль и место темы лекции в дисциплине, связь с другими дисциплинами

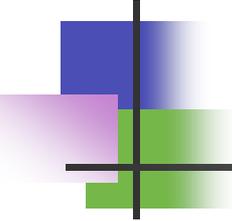
---

Дисциплина «Петрофизика нефтяного пласта» дает понятие об основных физических и физико-химических свойствах пластов-коллекторов, связей петрофизических величин между собой и с геофизическими параметрами, методики определения того или иного петрофизического свойства нефтяных пластов.

Эти знания необходимы для углубленного изучения коллекторских свойств нефтегазонасыщенных пластов, таких как гранулометрический состав и карбонатность.

Физические свойства коллекторов - в решающей степени определяют показатели и эффективность разработки нефтяных и газовых месторождений. **Поэтому изучение фильтрационных, коллекторских и физических свойств пород нефтегазовых пластов, методик и способов их определения является весьма важной и актуальной задачей.**

Знания полученные при изучении материалов данной лекции используются при изучении таких дисциплин как «Интерпретация промыслово-геофизических исследований», «Спецкурс эксплуатации нефтегазовых месторождений», при прохождении профессиональных практик и написании магистерской диссертации.

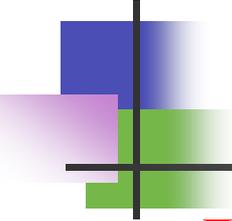


# Структура пористых сред

---

**Физические свойства коллекторов** - пород нефтегазоносных пластов в решающей степени определяют показатели и эффективность разработки нефтяных и газовых месторождений. В настоящее время широкое распространение получили **лабораторные, гидродинамические и геофизические методы** изучения физических свойств горных пород.

**Гидродинамические и геофизические методы** исследования позволяют получить информацию о физических свойствах пород-коллекторов в районе эксплуатации скважин и дают интегральные, обобщенные характеристики.



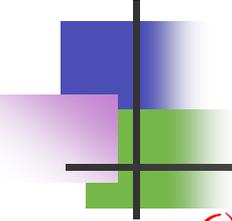
# Структура пористых сред

---

**Лабораторные методы** основаны на исследовании керна материала, являются наиболее точными и дают информацию о физических свойствах небольших по размерам объемов пород.

Фильтрационные, коллекторские и физические свойства пород нефтегазовых пластов характеризуются следующими основными параметрами:

- 1) гранулометрический (механический) состав;
- 2) пористость;
- 3) проницаемость;
- 4) удельная поверхность;
- 5) карбонатность;



# Структура пористых сред

---

6) капиллярность;

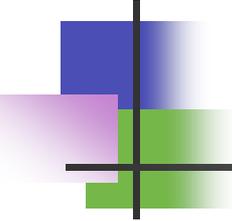
7) механические свойства (плотность, упругость, пластичность, сопротивление разрыву, сжатию и другим видам деформации, сжимаемость);

8) термические свойства (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, термическое расширение);

9) электрофизические свойства;

10) магнитные и радиоактивные свойства.

Так как условия формирования осадков разнообразно, коллекторские свойства пластов различных месторождений могут изменяться в широких пределах.



# Структура пористых сред

---

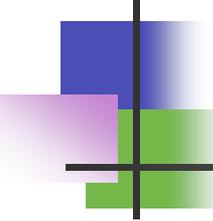
Характерная особенность большинства коллекторов – **слоистость их строения и изменения свойств пород во всех направлениях.**

Свойства пород находятся в тесной зависимости от химического состава, структурных и текстурных особенностей их строения. Химический состав пород и происхождение пор во многом определяют структуру порового пространства – **конфигурацию, размеры и сообщаемость пор.**

**Основными коллекторами являются породы осадочного происхождения.** Они обычно характеризуются слоистостью, часто содержат органические остатки, иногда обладают разным кристаллическим строением при однородности минерального состава.

# Структура пористых сред





# Структура пористых сред

---

По своему происхождению осадочные породы подразделяются на три большие группы:

1. **Обломочные** – породы, являющиеся продуктом разрушения различных горных пород; они сохраняются в рыхлом или сцементированном состоянии при процессах **диагенеза** (стадия формирования осадка путем постепенного уплотнения) и **эпигенеза** (видоизменение породы при продолжающемся прогибании земной коры). К ним относятся валуны, конгломераты, пески, галька.

2. **Химические** – горные породы, образованные из химических веществ, выпавших из воды на дно водоемов. Соли (каменная соль, калийная соль) и гипс – это самые распространенные примеры осадочных горных пород химического происхождения. К ним также относятся некоторые виды известняков и доломитов.

3. **Органогенные** – горные породы возникшие в результате жизнедеятельности организмов.

Они образуются из остатков растений и животных, отлагающихся на дне водоемов. К ним относятся известняк, уголь, нефть, горючие сланцы, торф, ракушечник, мел.

# Структура пористых сред

**Структура породы** определяется преимущественно размером и формой зерен. По размерам различают структуры:

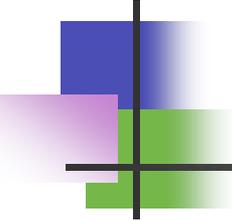
*псефиты* – порода состоит из обломков средним диаметром более 2 мм;

*псаммиты* – размер зерен составляет 0,1 ÷ 2 мм;

*алевриты* – размер зерен составляет 0,01 ÷ 0,1 мм;

*пелиты* – порода состоит из частиц 0,01 мм и менее.





## Структура пористых сред

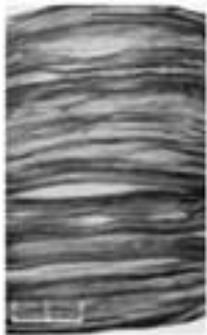
---

К **текстурным** особенностям породы относят **слоистость, характер размещения и расположения пород, взаиморасположение и количественное соотношение цемента и зерен породы** и некоторые другие черты строения. Роль цемента часто выполняют глинистые вещества.

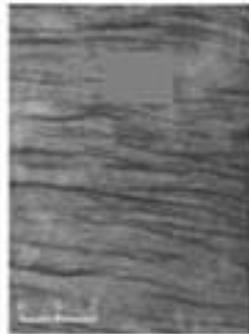
Текстура горной породы характеризуется расположением и распределением ее составных частей. Основным текстурным признаком осадочных пород является их **слоистость**.

**Слоистость бывает горизонтальная, косая и неправильная.** Характер слоистости влияет на фильтрационные свойства пород в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также на выбор методов воздействия на призабойную зону пласта (например, применение гидроразрыва пласта с целью увеличения притока пластовых флюидов в скважину).

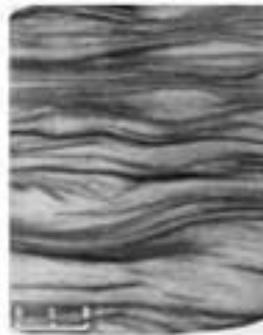
# Структура пористых сред



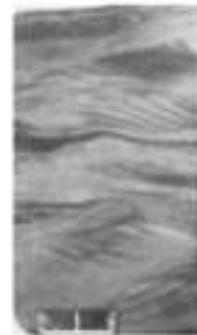
горизонтальная  
и пологоволни-  
стая



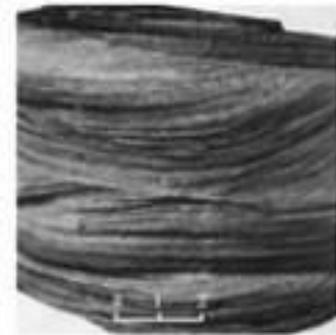
косоволнистая  
прерывистая



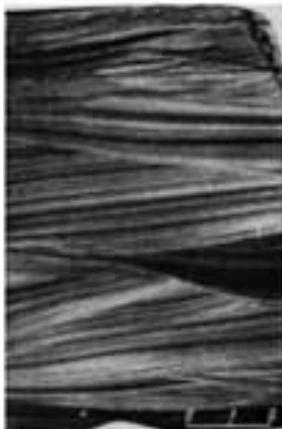
пологоволнистая  
и мелкая  
косоволнистая



волнистая  
перекрестная  
срезанная



горизонтально-  
косая с изогнутыми  
слоями



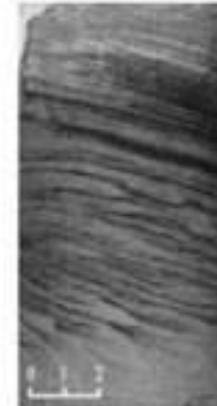
косая с перекрестными  
сериями слоев



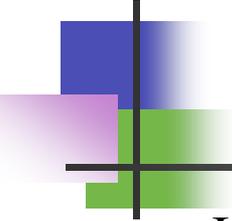
горизонтальная  
и косая  
прямолинейная



косая, с парал-  
лельными се-  
риями слоев



перистая  
(пучковидная)



# Структура пористых сред

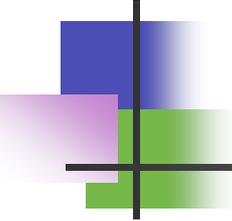
---

К **текстурным** свойствам породы относятся также взаиморасположение и количественное соотношение цемента и обломочных зерен (состав и структура цементирующих веществ влияет на коллекторские свойства пород).

**Цементом** называются минеральные вещества, заполняющие в породе промежутки между крупными зернами и обломками и связывающие их между собой.

**По вещественному составу цементы разделяются на два основных типа: мономинеральный и полиминеральный.** Чаще всего в песчано-алевритовых породах встречается полиминеральный цемент.

Наиболее распространены различные глинистые цементы, меньше – цементы хемогенного происхождения (карбонаты, сульфаты, окислы и гидроокислы различных элементов, накапливающиеся путем осаждения из растворов).



# Гранулометрический состав горных пород

---

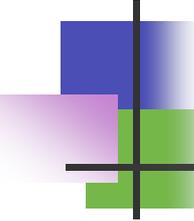
Количественное содержание в породе частиц различной величины называется гранулометрическим (механическим) составом горных пород и применяется только для терригенных слабосцементированных коллекторов.

Размер частиц горных пород изменяется от коллоидных частичек до галечника и валунов. Размеры их для большинства нефтесодержащих пород колеблются в пределах 0,01 ÷ 1 мм.

**Методика гранулометрического анализа для различных пород различна:**

1. В рыхлых породах распределение по размерам зерен проводят путем рассеивания на ситах (ситовой анализ).
2. В более мелких (коллоидно-дисперсных) – по скорости оседания частиц в жидкости (седиментационный или седиментометрический анализ).
3. В сцементированных породах изучаются шлифы породы под микроскопом.

**Механический состав определяют ситовым и седиментометрическим (седиментационным) анализом, а также шлифовым анализом.**



## Ситовый анализ

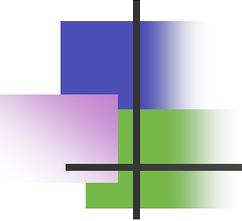
---

**Ситовый анализ** сыпучих горных пород применяют для определения содержания фракций частиц размером от 0,05 до 10 мм. Проксерагированный и высушенный образец нефтесодержащей породы (40-50г) раздробляется на кусочки и обрабатывается 10%-м раствором соляной кислоты для удаления карбонатов. После этого порода растирается в фарфоровой чашке резиновой пробкой с одновременным промыванием водой для удаления глинистой фракции.

Отмытая от глинистой фракции проба высушивается и рассеивается на ситах.

**Сита бывают трех видов: шелковые, проволочные и штампованные.**

Количественное содержание фракций определенного размера рассчитывают на бескарбонатную породу. После каждого анализа производят проверку на потерю веса фракции при рассеиве.



# Седиментационный (седиментометрический) анализ

Седиментационный (или седиментометрический) анализ проводится для фракций частиц размером менее 0,05 мм.

Разделение таких коллоидно-дисперсных частиц по фракциям основано на различной скорости осаждения частиц разного размера в вязкой жидкости.

Расчет скорости свободного падения частиц порода в жидкости производится по формуле Стокса для частиц сферической формы:

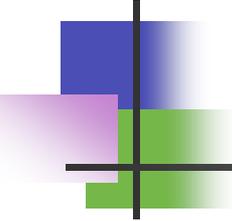
$$v = \frac{gd^2}{18\nu} \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} - 1 \right) \quad (1)$$

$v$  – скорость осаждения частиц;  $d$  – диаметр частиц;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $\rho_n$  – плотность твердой частицы;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Формула (1) может быть записана и следующим образом:

$$v = \frac{gd^2}{18\mu} (\rho_n - \rho_{ж}) \quad (2)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости.



# Седиментационный (седиментометрический) анализ

---

Для проведения ориентировочных расчетов последнюю формулу можно упростить, представив плотность жидкости равной плотности воды  $\rho_{ж}=1\text{г/см}^3$ , плотность породы  $\rho_n=2.65\text{ г/см}^3$ , вязкость воды при  $15^0\text{С}$   $\mu=0.0114\text{сПз}$ . Тогда **формула Стокса** принимает вид:

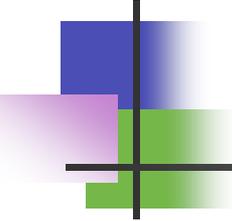
$$d = 0,1127 \sqrt{v} \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр частиц в мм,  $v$  – скорость падения частиц в см/с.

При выводе **формулы Стокса** учитывается, что при движении частицы в вязкой жидкости действует сила сопротивления, определяемая **законом Стокса**:

$$F_s = 6\pi \mu r v \quad (4)$$

Применение данной формулы имеет ряд ограничений.



# Седиментационный (седиментометрический) анализ

---

Допущения, налагающие ограничения на применение закона Стокса:

- частицы должны быть шарообразной формы;
- движение их должно происходить достаточно медленно в вязкой и несжимаемой жидкости и в бесконечном удалении от стенок и дна сосуда;
- частицы должны осаждаться с постоянной скоростью, не превышающей некоторого предельного значения;
- частицы должны быть твердыми и иметь гладкую поверхность;
- не должно быть скольжения на границе между движущейся частицей и дисперсионной средой;
- частицы должны быть достаточно большими по сравнению с молекулами дисперсионной среды.

# Коэффициент неоднородности горных пород

Результаты анализа гранулометрического состава пород изображаются в виде графиков суммарного состава (рисунок 1) и распределения зерен породы по размерам (рисунок 2).

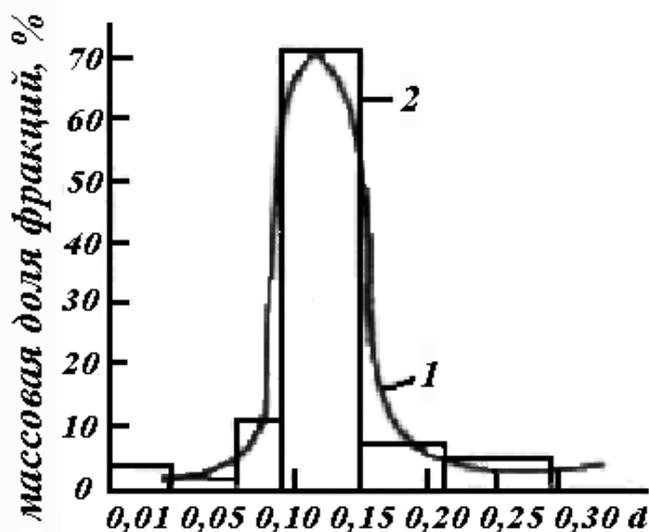


Рисунок 1 - Кривая распределения зерен породы по размеру (1), гистограмма (2)

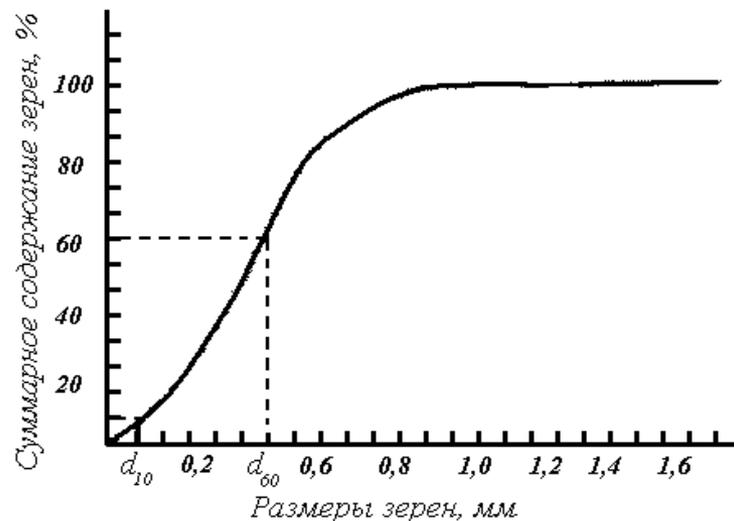
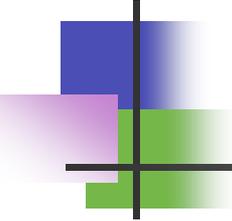


Рисунок 2 - Кумулятивная (интегральная) кривая суммарного гранулометрического состава зерен породы



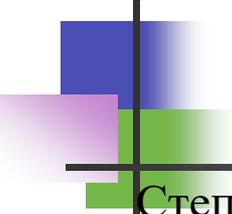
# Коэффициент неоднородности горных пород

---

Для построения графика распределения зерен породы по размерам (**гистограммы**) по оси абсцисс откладываются диаметры частиц, а по оси ординат - массовое содержание в % каждой фракции в породе.

При построении суммарного гранулометрического анализа по оси ординат откладывают суммарные массовые доли фракции в процентах, а по оси абсцисс - диаметры частиц или их логарифмов.

Такие графики называют **кумулятивными (интегральными) кривыми гранулометрического состава**. Если при построении такого графика суммировать содержание частиц, меньших данного диаметра, то получится кривая, показанная на рисунке 2. Для определения **коэффициента неоднородности по Газену** на этой кривой отмечают на оси ординат точки, соответствующие 60%-му и 10%-му суммарному содержанию частиц и определяют соответствующие им на оси абсцисс диаметры  $d_{60}$  и  $d_{10}$ .



# Коэффициент неоднородности горных пород

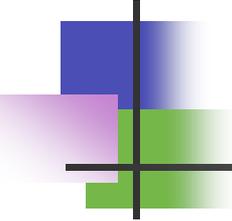
Степень неоднородности породы (речь идет, разумеется, о терригенных коллекторах) характеризуется отношением:

$$K_{н/о} = \frac{d_{60}}{d_{10}}.$$

**Коэффициент неоднородности горной породы по Газену** определяется отношением диаметра частиц, составляющих со всеми частицами меньшего диаметра 60% от массы фракций, к диаметру частиц, составляющих со всеми частицами меньшего диаметра 10% от массы фракций.

Чем больше коэффициент неоднородности, тем более разнородной по гранулометрическому составу является порода. Для однородного песка кривая суммарного состава выражается крутой линией, а для неоднородного - пологой.

По кривой распределения зерен выявляют диапазон размеров фракций, которые в основном слагают породу. Коэффициенты неоднородности пород, слагающих нефтяные и газовые месторождения, обычно колеблются в пределах 1 ÷ 6.



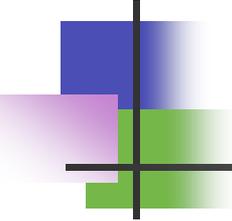
# Карбонатность горных пород

---

Под карбонатностью горных пород подразумевается суммарное содержание в них солей угольной кислоты: соды  $Na_2CO_3$ , поташа  $K_2CO_3$ , известняка  $CaCO_3$ , доломита  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ , сидерита  $FeCO_3$ .

Содержание этих солей в породах колеблется в широких пределах. Одни породы целиком состоят из карбонатов, другие не содержат их совсем или содержат в небольшом количестве в виде цементирующего материала.

К первой группе в основном относятся известняки и доломиты, ко второй – кварцевые песчаники многих нефтяных и газовых месторождений. Определение вещественного состава и количества карбонатов в горных породах имеет большое значение для выяснения условий осадконакопления, формирования вторичных пустот в виде пор и каверн, для корреляций пород, а также для выбора оптимальных условий термического кислотного воздействия на них.



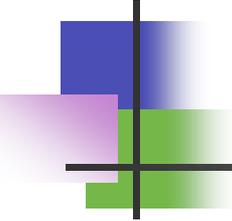
# Карбонатность горных пород

---

Породы продуктивных пластов, содержащие значительное количество карбонатов, могут быть с успехом подвергнуты обработке соляной кислотой с целью увеличения проницаемости призабойной зоны скважины и интенсификации добычи нефти.

Определение карбонатности горных пород основано на химическом разложении в них карбонатов и на учете углекислого газа, выделяющегося при их разложении.

Связанные с этим определением подсчеты ведутся по отношению к  $\text{CaCO}_3$ , так как известняк составляет основную часть рассматриваемых карбонатов.



## Карбонатность горных пород

---

При этом, как правило, воздействуют на карбонатную породу соляной кислотой, осуществляя химическую реакцию вида:

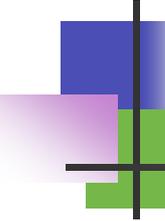


Исходя из этой формулы, можно определить карбонатность породы в процентах в пересчете на  $\text{CaCO}_3$ , например, по найденному объему  $\text{CO}_2$ :

$$K = \frac{V \cdot P}{4,4a}$$

где  $K$  - содержание  $\text{CaCO}_3$  (карбонатов) в породе, %;  $V$  - найденный объем углекислого газа, в  $\text{см}^3$ ;  $P$  - масса 1  $\text{см}^3$  углекислого газа в мг при температуре и барометрическом давлении в момент отсчета, мг;  $a$  - масса исследуемого образца породы, г.

Для определения  $P$  пользуются таблицей, в которой приводятся его значения при различных температурах и барометрических давлениях.



# Методы определения карбонатности горных пород

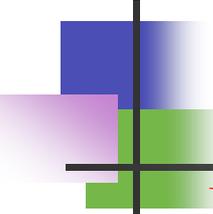
---

Для учета содержания  $CO_2$  при определении карбонатности пород существует три способа.

Первый способ основан на титровании раствора  $HCl$  при взаимодействии его с карбонатами по реакции:



По расходу  $HCl$  на разложение карбонатов судят о количестве выделившегося углекислого газа, а, следовательно, о содержании карбонатов в данной породе в переводе на  $CaCO_3$ .



# Методы определения карбонатности горных пород

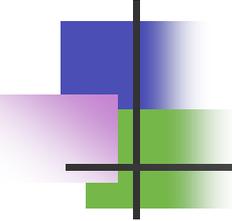
Второй способ определения карбонатности пород основан на **весовом определении  $CO_2$** .

Взвешивают остаток породы, освобожденный от  $CO_2$ , либо сам  $CO_2$ , который для этого улавливают специальным прибором с известью. В обоих случаях определения могут производиться **"сухим"** или **"мокрым"** способом.

Сущность определения  $CO_2$  "сухим" способом по остатку породы после разложения в ней карбонатов заключается в следующем.

Подлежащую исследованию навеску породы массой 1-2 г помещают в тигель и медленно нагревают на горелке до постоянной массы. Разница масс породы до и после прокаливания дает количество выделившегося из него  $CO_2$ .

Оба способа определения карбонатности пород сухим способом страдают тем недостатком, что они применимы только для анализа тех пород, которые не содержат, кроме  $CO_2$ , никаких других летучих веществ.



# Методы определения карбонатности горных пород

---

Они не могут быть применены для определения карбонатности керна, поскольку прокаливание кернов до  $800-1000^{\circ}\text{C}$  может вызвать удаление из них не только углекислого газа, но и какого-то количества содержащейся в них адсорбционной и кристаллизационной воды. Этих недостатков лишено определение карбонатности пород "мокрым" способом.

Карбонатность пород "мокрым" способом, так же как и "сухим", определяется двояко: взвешиванием остатка породы до и после разложения в ней карбонатов или взвешиванием самого углекислого газа.

**Метод весового определения углекислого газа в карбонатных породах "мокрым" способом достаточно точен.** В отличие от способа титрования здесь не требуется больших затрат времени. Однако точность этого способа достижима только в том случае, если в породах содержится большое количество углекислого газа. При малом же содержании углекислого газа, как, например, иногда это бывает в терригенных породах, этот способ может оказаться менее точным, чем способ, основанный на титровании.

# Методы определения карбонатности горных пород

Большим преимуществом обладает третий способ – объемный или газометрический способ определения содержания углекислого газа в породах, получивший весьма широкое распространение при исследовании почв. Для определения содержания углекислых солей в породах объемным способом существует много приборов. К числу таких приборов относится, в частности, прибор Кларка, сравнительно широко применяемый при анализе кернов, рисунок 3.

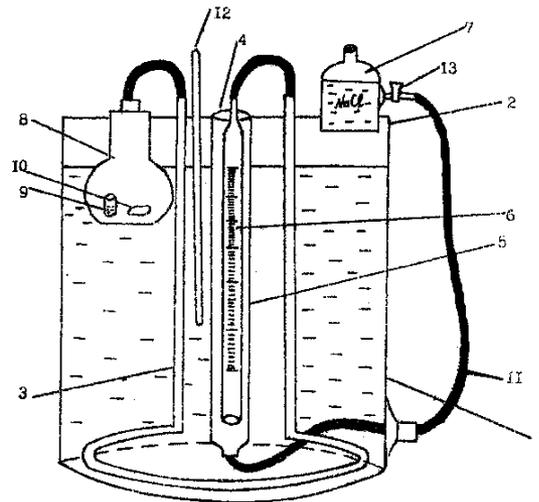
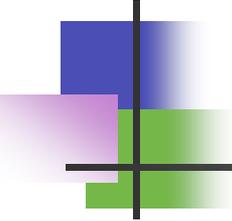


Рисунок 3 – Прибор Кларка для определения карбонатности горных пород

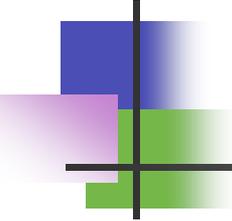
Основными частями прибора для определения карбонатности являются: цилиндрический сосуд – 1, реакционная колба – 8, змеевик – 3, мерная колба – 6



# Контрольные вопросы

---

1. Что называется удельной поверхностью горных пород?
2. Каковы типы пустот коллекторов?
3. Как подразделяются поры по размерам и сообщаемости?
4. Что подразумевается под гранулометрическим составом горных пород?
5. Какими методами определяется механический состав породы?
6. Как изменяется размер частиц горных пород?
7. В чем суть ситового метода?
8. В чем суть разделения коллоидно-дисперсных частиц по фракциям?
9. Как графически отображается гранулометрический состав горных пород?
10. Что такое коэффициент неоднородности?
11. Что понимают под карбонатностью горных пород?
12. Какие существуют способы определения карбонатности, их достоинства и недостатки?



## Рекомендуемая литература

---

1. Мухаметова З.С., Физика нефтяного и газового пласта. Электронный учебно-методический комплекс, 2-ое издание, переработанное, Уфа, 2013.
2. Физика пласта: Учебное пособие / Авт.-сост. Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2017.
3. Мирзажданзаде А.Х., Аметов И.М., Ковалев А.Г. Физика нефтяного и газового пласта. М., Недра, 2012.
4. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. М., Недра, 2012.
5. Ковалева Л.А. Физика нефтегазового пласта. – Учебное пособие. Уфа, РИО БашГУ, 2013.
6. Воронина Н.В., Чупров В.В. Лабораторный практикум по дисциплине Физика пласта, Ухта: УГТУ, 2017.
7. Ермилов О.М. и др. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа. М., Недра, 2012.
8. Технология добычи нефти и газа. Лабораторный и расчетный практикум для студентов специальности 185 «Нефтегазовая инженерия и технологии»/В.Г. Топоров, С.Ф. Поверенный, Е.П. Варавина, Е.А. Яцкевич. – Х.: НТУ «ХПИ», 2018.