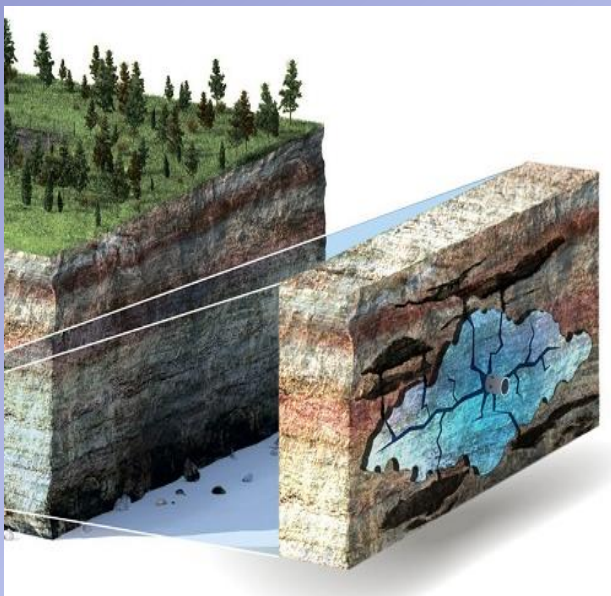


**НАО «КАРАГАНДИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБЫЛКАСА САГИНОВА»**

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



# **ЛЕКЦИЯ**

**Тема:** ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПРИРОДНЫХ ФЛЮИДОВ

**Дисциплина:** Петрофизика  
нефтяного пласта

**Образовательная программа:**  
7М07201 «Геофизические методы  
поисков и разведки МПИ»



**Автор:**

**к.т.н., доц. Пономарева М.В.**



# План лекции

---

1. Виды залежей природных флюидов
2. Пластовые жидкости и газы
3. Состав и классификация нефтей
4. Состав и классификация природных газов
5. Физические свойства нефтей
6. Свойства природных газов



## Цель лекции

---

*Цель лекции* – рассмотреть виды залежей природных флюидов; пластовых жидкостей и газов; состав и классификацию нефтей и природных газов; изучить физические свойства нефтей и природных газов, а так же методики их определения.



## 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 видов залежей природных флюидов; пластовых жидкостей и газов; состава и классификации нефтей и газов, а так же методики их определения. Знание физико-химических свойств природных флюидов позволяет осуществить наиболее эффективную и рентабельную нефтедобычу, поэтому их изучение 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.



## Виды залежей природных флюидов

---

Виды нефтегазовых залежей различают не только по их строению, но и по содержанию в них флюидов, их соотношению и фазовому состоянию. В продуктивных отложениях земной коры содержатся вода и углеводороды. В зависимости от состава, температуры и давления они могут находиться в залежи в различных состояниях – **твердом, газообразном, жидком и в виде газожидкостных смесей.**

Если газа в залежи много по сравнению с объемом нефти, то газ располагается в виде **газовой шапки**, причем в ней содержится и часть жидких углеводородов нефти в виде паров.

Кроме того, под высоким давлением в пласте плотность газа становится приблизительно равной плотности легких углеводородов, при этом и тяжелые углеводороды могут частично растворяться в газе.



## Виды залежей природных флюидов

---

Если газа в залежи мало по сравнению с объемом нефти, а давление достаточно высокое, газ полностью растворяется в нефти (до 1000 м<sup>3</sup> газа в 1 м<sup>3</sup> нефти) и тогда газонефтяная смесь залегает в **однородном (жидком) состоянии**.

В зависимости от условий залегания и количественного соотношения нефти и газа, залежи подразделяются на следующие виды:

1. Нефтяные (с различным содержанием нефтяного газа)
2. Газонефтяные (с большой газовой шапкой)
3. Чисто газовые
4. Газоконденсатные (добывают светлые углеводороды с большим газовым фактором: более 1000 м<sup>3</sup> газа на 1 тонну нефти)
5. Газогидратные
6. Битумные



## Виды залежей природных флюидов

---

Существование газогидратных залежей доказано в последние годы. Газ в таких залежах содержится в твердом (гидратном) состоянии. Это обусловлено свойством газа, при определенных давлениях и температуре, соединяться с водой и образовывать гидраты. Районы распространения газогидратных залежей в основном приурочены к зоне распространения многолетней мерзлоты.

Глубина их залегания 2-2,5 тыс.м. В битумных залежах углеводороды находятся в твердом или малотекучем состоянии.

Но чаще всего четких границ между типами залежей нет, а в процессе разработки физическое состояние и свойства углеводородов постоянно меняются, поэтому необходимо знать все эти изменения в широком диапазоне давлений и температур.



## Пластовые жидкости и газы

---

Основными веществами, находящимися в земной коре, являются вода и углеводороды. В этих веществах могут содержаться в виде примесей многие элементы и химические соединения. Установлено 425 углеводородных соединений, в которых соотношение углерода к водороду соответствует 5:1, а 0,02% в составе природных углеводородов составляет практически все элементы из таблицы Менделеева.

Подземные воды почти всегда являются минерализованными, то есть содержат в растворенном состоянии соли. В углеводородных газах, насыщающих горные породы, в качестве примесей могут находиться **сероводород  $H_2S$ , углекислый газ  $CO_2$ , инертные газы.** Общее количество солей в подземных водах колеблется от долей % до 40-50% по весу (рассолы), а в морской воде – 3-4% соли.





## Пластовые жидкости и газы

---

Наиболее распространены соли **серной  $H_2SO_4$ , угольной  $H_2SO_3$ , азотной  $HNO_3$  кислоты** (то есть с металлами Na, K, Mg, Ca, Fe и др.). Кроме того, в водах могут быть йод и бром.

Основной ряд углеводородов, представленных в нефтяных и газовых залежах соответствует порядковому номеру  **$n=18$**  и более.

Все они при нормальных условиях (давлении 1 атм, температура  $20^{\circ}C$ ) находятся в **различных фазовых состояниях**:

**$C_1 \div C_2$  (метан, этан, этилен  $C_2H_4$ ) – газы;**

**$C_3 \div C_4$  (пропан, бутан, пропилен  $C_3H_6$ , бутилен  $C_4H_8$ ) – находятся в парообразном состоянии, при повышенных давлениях – жидкости;**

**$C_5 \div C_{17}$  – жидкости (бензиновая фракция);**

**$n \geq C_{18}$  – твердые соединения.**



## Состав и классификация нефтей

---

Наиболее широко в нефти представлены углеводороды трех классов:

**1) Метановый** (парафиновый) ряд – алканы общего состава  $C_nH_{2n+2}$ . Углеводороды парафинового ряда характеризуются значительной химической инертностью. Это свойство обусловлено сохранением их в естественных условиях в нефтях в течение геологических периодов. Они присутствуют во всех фракциях. Содержание в нефти углеводородов метанового ряда составляет примерно 20%.

**2) Полиметиленовые** (нафтеновые) углеводороды – циклоалканы  $C_nH_{2n}$  (например,  $C_3H_6$  – циклопропан). Существуют также углеводороды с такой же формулой  $C_nH_{2n}$ , но не являющиеся циклическими – это так называемый олефиновый ряд (первый член  $C_2H_4$  – этилен), они более химически активны, чем парафины, поэтому реже встречаются в природных нефтях.



## Состав и классификация нефтей

---

Имеются также ненасыщенные олефины: диолефины с формулой  $C_nH_{2n-2}$ , самый простой из них – ацетилен  $C_2H_2$ .

Циклопарафины стабильны в химическом отношении и часто встречаются в природных нефтях. Содержание в нефти нафтеновых углеводородов колеблется от 25 до 75%.

**3) Ароматические**, то есть углеводороды циклического строения с бензольным кольцом  $C_nH_{2n-6}$ . Эти соединения достаточно стабильны и часто встречаются в природных нефтях.

Содержание в нефти ароматических углеводородов составляет 15-20%.



# Состав и классификация нефтей

---

## 4) Другие органические соединения.

В состав природных нефтей входят, хоть и в небольших количествах (0,1-2%) кислородные соединения, главным образом в состав нафтеновых и жирных кислот. Эти вещества способны входить в соединения со щелочами, содержащимися в воде, и образовывать растворимые в воде мыла – поверхностно активные вещества (ПАВ).

**Асфальто-смолистые вещества (АСВ)** – неотъемлемая часть большинства нефтей, представляющие собой гетерогенные (серо-, кислород- и азотсодержащие) соединения различного строения и молекулярной массы. Их массовая доля от 4-5 до 20% и более. Высокое содержание этих веществ в нефтях осложняет процесс их переработки, а содержание их в топливах и маслах способствует коксообразованию и нагарообразованию.



## Состав и классификация нефтей

---

При отгонке из нефти легких фракций смолы и асфальтены остаются в виде густой смолистой массы (гудрона).

Характерные особенности **асфальто-смолистых веществ** – значительные молекулярные массы (у смол она колеблется в интервале 465 – 1080, у асфальтенов – от 1200 до 3250). Эти соединения являются, как правило, полярными и парамагнитными.

Парамагнетизм нефтей связан с асфальтеновой фракцией, при этом парамагнитной может быть почти каждая молекула в асфальтенах. В смолах и асфальтенах сосредоточены большая часть присутствующих в нефти гетероэлементов и практически все металлы. Предполагается, что асфальтены имеют кристаллическую структуру с аморфными включениями, а окружающие их сольватные слои состоят из диамагнитных молекул смол.



# Состав и классификация нефтей

---

Смолы в чистом виде – жидкие или полужидкие вещества от темно-желтого до коричневого цвета с плотностью от 1000-1070 кг/м<sup>3</sup>. Именно смолам нефть обязана своей темной окраской.

Особенность смол – способность превращаться в асфальтены (на свету, более интенсивно – при нагревании и продувке воздухом). Асфальтены, в отличие от смол, набухают с увеличением объема и дают коллоидные растворы.

**Парафины** (углеводородный ряд C<sub>17</sub>-C<sub>35</sub>) – бесцветная кристаллическая масса, не растворимая в воде, плотность их – от 907 до 915 кг/м<sup>3</sup> при 15<sup>0</sup>С, температура застывания (плавления): 27-71<sup>0</sup>С.



# Состав и классификация нефтей

---

**Церезины** (углеводородный ряд  $C_{36}-C_{55}$ ) – смесь изопарафинов, которые кристаллизуются в виде мелких игл, т.е. не так прочны как парафины, температура плавления: 65-88 °С.

Большая проблема современной нефтедобывающей промышленности – это борьба с отложениями парафинов в скважинах и призабойной зоне пластов.

## 5) Неорганические соединения.

Сернистые соединения содержатся почти во всех нефтях. В одних нефтях сера может находиться в свободном виде, в других – в виде соединений (сероводорода), меркаптанов (RSH), сульфидов, тиофенов и др.

Наличие серы в нефтепродуктах – явление отрицательное: снижается качество топлива, происходит коррозия оборудования.



# Состав и классификация нефтей

---

**Азотистые соединения** – органического происхождения. Наибольшее количество азота находится в тяжелых остатках перегонки нефти. Наличие в бензинах азотистых соединений – явление нежелательное и вредное. В то же время они могут быть использованы в виде добавок к смазочным маслам, как ингибиторы коррозии.

**Минеральные примеси** – ванадий, фосфор, калий, никель, йод и другие также присутствуют в природных нефтях.

Содержащиеся в нефтях органические и неорганические соединения влияют на свойства поверхностей раздела в пласте и на закономерности движения флюидов.





# Состав и классификация нефтей

---

По содержанию твердых углеводородов и примесей нефть разделяют на следующие классы

По количеству серы	...смола	...парафина
Малосернистые $\leq 0,5\%$	Малосмолистые $< 18\%$	Малопарафиновые $< 1,5\%$
Сернистые $0,5 \div 2\%$	Смолистые $18 \div 35\%$	Парафиновые $1,5 \div 6\%$
Высокосернистые $> 2\%$	Высокосмолистые $> 35\%$	Высокопарафиновые $> 6\%$



## Состав и классификация нефтей

---

В настоящее время установлено, что в нефтях присутствует более 60 элементов, из них около 30 относятся к металлам. Среди отдельных металлов, содержание которых превышает  $10^{-5}$  %, доминируют: **V** – до  $10^{-2}$  %, **Ni, Fe, Zn, Na, K, Ca, Mn** – до  $10^{-3}$  %, **Hg** –  $10^{-5}$  %. Суммарное содержание в нефтях металлов в среднем колеблется от 0,01 до 0,04 % (масс).

Металлсодержащие соединения нефти и нефтяных систем по своей химической природе – это соли металлов с веществами кислотного характера, элементоорганические и ароматические соединения. Они образуют так называемые металпорфириновые комплексы, содержание которых особенно велико в высоковязких нефтях (до 20 мг/100г нефти) и битумах (до 1 мг/100г).



## Состав и классификация нефтей

---

Ванадилпорфирины в составе асфальтенов вносят значительный вклад в поверхностную активность нефтей, при этом собственная поверхностная активность асфальтенов может быть небольшой.

Природные газы состоят, в основном, из углеводородов гомологического ряда метана  $C_nH_{2n+2}$  и неуглеводородных компонентов: углекислого газа ( $CO_2$ ), азота ( $N_2$ ), сероводорода ( $H_2S$ ), соединений, называемых меркаптанами ( $RSH$ ), аналогичными по строению спиртам, а также ртути и инертных газов (гелий, аргон, криптон, ксенон).



# Состав и классификация природных газов

---

Классификация углеводородных газов в зависимости от их состава может быть представлена тремя группами:

- 1) Сухой газ – метан, этан, этилен.
- 2) Жидкий газ – пропан-бутановая фракция.
- 3) Газовый бензин – пентан, гексан и т.д.

В зависимости от объекта добычи природные газы подразделяют на следующие группы:

- 1) Газы из чисто газовых месторождений (сухой газ).
- 2) Газы, добываемые вместе с нефтью – попутные нефтяные газы (смесь сухого газа, жидкого и газового бензина).

Газы, добываемые из газоконденсатных месторождений, – смесь сухого газа и жидкого конденсата (тяжелых фракций бензина и более тяжелых масляных фракций).



## Физические свойства нефтей

---

**Плотность** нефти составляет 700-1000 кг/м<sup>3</sup> (при нормальных условиях).

С повышением температуры плотность нефти уменьшается, поэтому для приведения ее к нормальным условиям вводят температурную поправку:

$$\rho_{20} = \rho_t + \alpha(t - 20)$$

где  $\alpha$  - коэффициент объемного расширения нефти (0,0006 <  $\alpha$  < 0,0008).



# Физические свойства нефтей

---

Вводят также **относительную плотность** нефти:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_n^{20}}{\rho_B^4}$$

Здесь -  $\rho_n^{20}$  плотность нефти при 20 °С,  
 $\rho_B^4$  - плотность воды при 4 °С.

Зависимость плотности нефти от давления (то есть глубины залегания) - неоднозначна.



# Физические свойства нефтей

---

## Вязкость

1) **Динамическая вязкость** определяется, как известно, из уравнения Ньютона:

$$F = -\mu \frac{dv}{dx} S$$

Здесь  $F$  – сила трения между слоями жидкости при ее движении;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $dv/dx$  – градиент скорости в направлении, перпендикулярном потоку жидкости;  $S$  – площадь соприкосновения слоев.

Величина, обратная динамической вязкости, называется текучестью:

$$\phi = \frac{1}{\mu}$$

2) **Кинематическая вязкость:**

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$



## Физические свойства нефтей

---

3) **Относительная (условная) вязкость** – показывает во сколько раз кинематическая вязкость нефти при 20<sup>0</sup>С больше вязкости воды при 4<sup>0</sup>С. Единицы измерения условной вязкости – градусы условной вязкости  $^{\circ}\text{ВУ}_t$ , определяющее отношение времени истечения из вискозиметра 200 см<sup>3</sup> нефти ко времени истечения 200 см<sup>3</sup> воды при температуре 20 °С.

В пластовых условиях физические свойства нефти существенно отличаются от поверхностных. Это связано с повышением давления и температуры, а так же – способностью нефти растворять в себе газ при высоких давлениях. Поэтому с увеличением давления вязкость нефти уменьшается за счет растворенного в ней газа (более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже).





# Физические свойства нефтей

---

С повышением температуры вязкость нефти уменьшается в соответствии с формулой Френкеля для однородной жидкости:

$$\mu_{жс} = \mu_0 e^{\frac{\Delta E}{\kappa T}}$$

где  $\Delta E$  – энергия активация, необходимая для перехода частиц жидкости из одного состояния равновесия в другое;  $\kappa$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

На практике, пользуются экспериментально определяемой зависимостью коэффициента динамической вязкости от температуры. Чаще всего это зависимость вида:

$$\mu_{жс} = \mu_0 e^{-\gamma(T-T_0)}$$

где  $\gamma$  – показатель степени, характерный для данной конкретной нефти в измеренном диапазоне температур  $T - T_0$ ;  $\mu_0$  – вязкость нефти при температуре  $T_0$ .



# Свойства природных газов

---

**Газ в месторождении** – это всегда смесь, которая характеризуется массовыми или молярными концентрациями компонентов.

*Массовая концентрация какого-либо компонента:*

$$c_i^m = \frac{m_i}{\sum m_i} \cdot 100\%$$

$m_i$  – масса  $i$ -го компонента в смеси.

*Молярная концентрация:*

$$c_i^n = \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot 100\%$$

$n_i$  – число молекул  $i$ -го компонента в смеси.



## Свойства природных газов

---

Можно ввести и объемную концентрацию:

$$c_i^v = \frac{V_i}{\sum V_i} \cdot 100\%$$

где  $V_i$  — объем  $i$ -го компонента в смеси.

**Плотность газа** может быть найдена по его средней молекулярной массе, которая определяется по молекулярному составу:

$$M_{см} = \frac{C_1^n \cdot M_1 + C_2^n \cdot M_2 + \dots + C_n^n M_n}{100} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^n M_i}{100}$$

где  $M_i$  — молекулярная масса компонентов.



## Свойства природных газов

---

В пластовых условиях необходимо пересчитать плотность газа на пластовое давление

Известно, что при адиабатическом расширении или сжатии газа имеет место изменение его температуры.

$$\rho_{пл} = \frac{\rho_0 P_0}{P_{пл}}$$

Этот эффект – понижения температуры  $\Delta T$  при снижении давления  $\Delta p$  при адиабатическом расширении газа – называют также эффектом Джоуля–Томсона. Математически он выражается следующим уравнением:

$$\Delta T = \alpha \cdot \Delta p$$

где  $\alpha$  – коэффициент Джоуля–Томсона, для газов, в отличие от жидкостей, величина обычно положительная, имеющая порядок 10К/МПа.



# Свойства природных газов

---

## Вязкость газов

Из кинетической теории идеальных газов известно, что вязкость газа может быть определена аналитически по формуле:

$$\mu = \frac{\rho v \lambda}{3}$$

где  $v$  - средняя скорость движения молекул,  $\lambda$  - средняя длина пути свободного пробега молекул.

Если давление в газе увеличивается, то его плотность также увеличивается, а длина свободного пробега молекул уменьшается.

При этом скорость молекул газа не меняется, вязкость газа также не меняется.



## Свойства природных газов

---

Если в газе увеличивается температура, скорость его молекул значительно возрастает, тогда как плотность и длина свободного пробега остаются неизменными.

Это приводит к увеличению вязкости газа, что отличает поведение газа при высоких температурах от нефти.

Если в газе одновременно увеличиваются и давление и температура, то вязкость газа в целом уменьшается, как и у жидкостей, так как в реальных газах вязкость обусловлена перелетом молекул из слоя в слой и при больших давлениях этот процесс так же затруднен, как и у жидкостей.

При повышении температуры скорость молекул увеличивается, перелет легче и вязкость газа уменьшается.



## Контрольные вопросы

---

1. В каких фазовых состояниях могут находиться флюиды в земной коре?
2. На какие основные виды подразделяют продуктивные залежи в зависимости от фазового состояния и соотношения углеводородов?
3. Какие залежи относят к газоконденсатным и газогидратным?
4. Как классифицируют нефти по групповому составу?
5. В чем особенность физических свойств АСВ нефти?
6. Как зависят плотность и вязкость нефти от давления и температуры?
7. Как зависят плотность и вязкость газа от давления и температуры?
8. Как рассчитывают плотность смеси газов?



## 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.