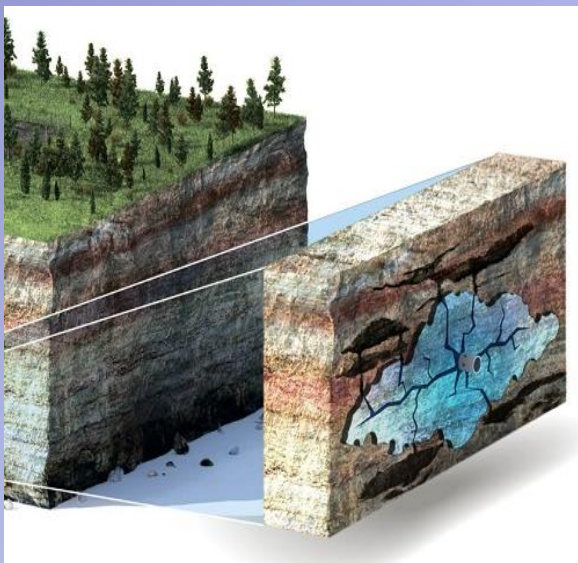


**НАО «КАРАГАНДИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБЫЛКАСА САГИНОВА»**

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

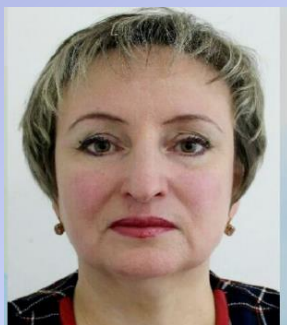


# **ЛЕКЦИЯ**

**Тема:** ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПЛАСТОВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

**Дисциплина:** Петрофизика  
нефтяного пласта

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



**Автор:**

**к.т.н., доц. Пономарева М.В.**



# План лекции

---

1. Растворимость газов в нефти
2. Давление насыщения нефти газом
3. Физические свойства нефти в пластовых условиях
4. Растворимость газов в воде



## Цель лекции

---

*Цель лекции* – рассмотреть физические свойства пластовых углеводородов; растворимость газов в нефти; давление насыщения нефти газом; растворимость газов в воде, а так же методики определения данных параметров.



## 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** физических свойств пластовых углеводородов; растворимости газов в нефти; давления насыщения нефти газом; растворимость газов в воде, а так же методик определения данных параметров.

Знание физических свойств пластовых углеводородов 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.



## Растворимость газов в нефти

---

Нефть, газ, и вода разделяются в залежах и распределяются по структуре, как правило, в соответствии с удельным весом. Однако нефть и газ не при любых условиях могут существовать в пласте отдельно.

Это определяется относительным содержанием газа в пласте, давлением, температурой и *растворимостью газов в нефти*.

Все важнейшие свойства нефти зависят от количества растворенного в ней газа. Это вязкость, сжимаемость, плотность, термическое расширение и другие.

Газонасыщенность нефтей при различных давлениях и температурах определяется обычно экспериментально (термодинамические расчеты очень сложны).



# Растворимость газов в нефти

---

При небольших давлении и температуре растворимость газа в нефти подчиняется закону *Генри*:

$$V_r = \alpha p V_{ж}$$

то есть количество газа  $V_r$ , растворенного при данной температуре в объеме жидкости  $V_{ж}$ , пропорционально давлению  $p$  газа над поверхностью жидкости.

$$\alpha = \frac{V_g}{p V_{ж}}$$

коэффициент растворимости газа  $\alpha = (4 \div 5) 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ .



## Растворимость газов в нефти

---

В реальных газах коэффициент растворимости зависит, кроме давления и температуры (чем выше температура, тем углеводородный газ хуже растворяется), от природы газа и жидкости, их состава и других факторов. Так, разные компоненты нефтяного газа обладают различной растворимостью, причем с увеличением молекулярного веса газа коэффициент растворимости возрастает. Особенно плохо растворяется азот. Чем менее растворим газ ( $N_2$ ,  $CH_4$ ), тем лучше выполняется закон Генри.

В высокомолекулярных газах при больших давлениях происходит обратное испарение компонентов нефти в сжатый газ. Растворимость газа зависит также от свойств нефти, в которой он растворяется: чем больше содержится в нефти парафиновых углеводородов, тем лучше растворимость газов, а повышение содержания ароматических углеводородов уменьшает растворимость.

**На процесс растворения газа в нефти в большей степени влияет все же состав газа, чем состав нефти.**



# Растворимость газов в нефти

---

Количество растворяющегося или выделяющегося газа зависит от характера процесса:

- 1) **контактный процесс (одноступенчатый)** – при котором весь выделившийся газ находится в контакте с нефтью;
- 2) **дифференциальный процесс** – выделяющийся газ непрерывно отводится из системы;
- 3) **ступенчатый (многократный) процесс** – по мере снижения давления выделившийся газ отводится из системы и замеряется порциями.



# Растворимость газов в нефти

Количественно процесс разгазирования характеризуют коэффициентом разгазирования – количеством газа, выделяющегося из единицы объема нефти при снижении давления на единицу, графически – кривыми разгазирования (рисунок 1). Вводится также понятие газонасыщенности нефти (объемное количество растворенного в нефти газа при фиксированных давлении и температуре). Типичные изотермы газонасыщенности приведены на рисунке 2.

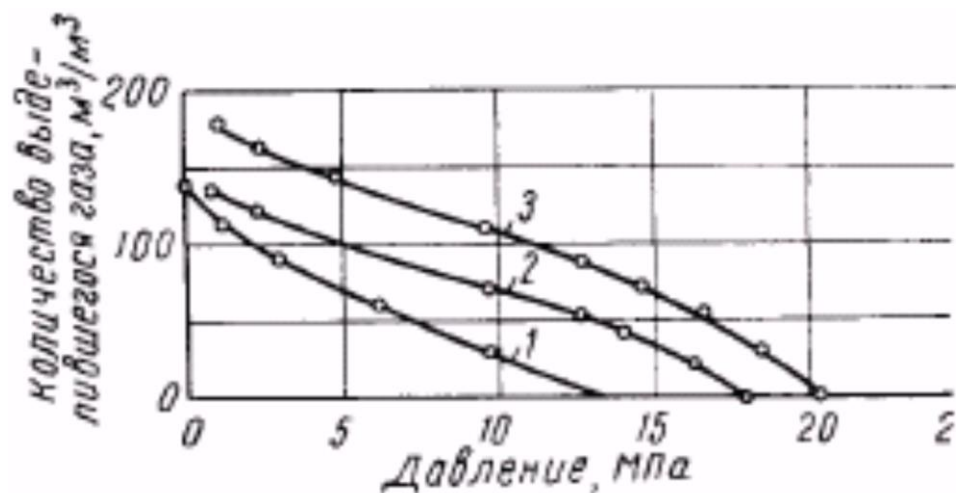


Рисунок 1

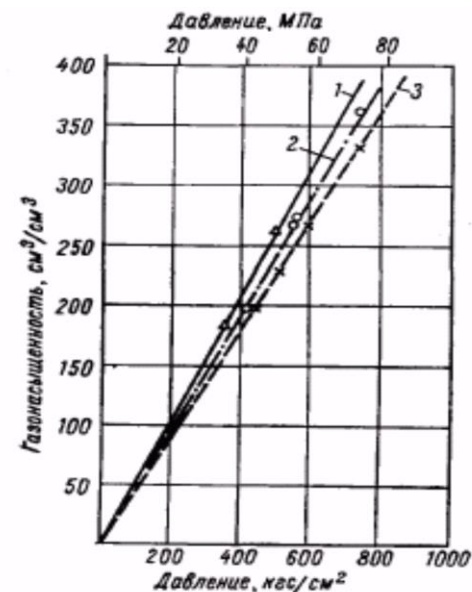


Рисунок 2



# Растворимость газов в нефти

---

**Кажущийся удельный объем растворенного газа.** Это понятие введено в рассмотрение ввиду специфических эффектов, которые происходят при растворении газа в нефти. Оказалось, что приращение объема жидкости не соответствует истинному объему растворенного в ней газа. Оно всегда меньше объема газа, зависит от количества растворенного газа, свойств газа и жидкости, давления и температуры, и связано это с силами межмолекулярного взаимодействия молекул газа и жидкости, в результате чего молекулы газа оказываются как бы внутри молекул нефти. Последние, имеют весьма сложную пространственную структуру вплоть до образования целых кластеров.

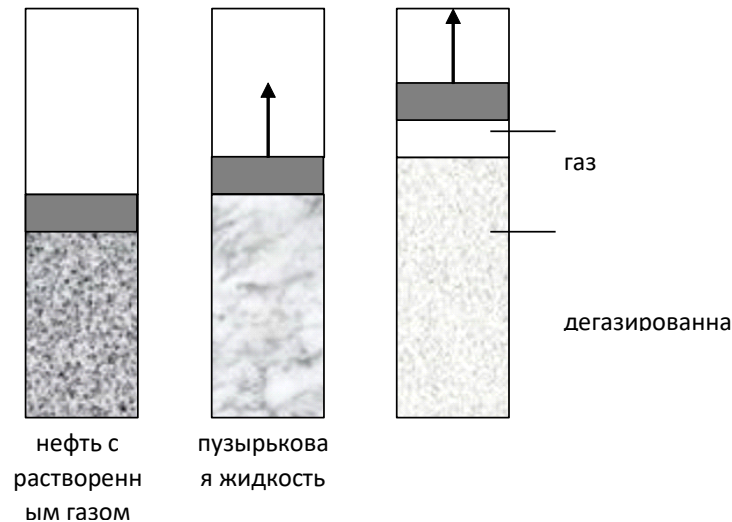
**Кажущийся удельный объем растворенного газа характеризуется отношением приращенного объема жидкости  $\Delta V_{жс}$  при растворении в ней 1 кг газа:**

$$V' = \frac{\Delta V_{жс}}{M_{г}}$$

где  $\Delta V$ -приращение объема жидкости при растворении в ней газа,  $M_{г}$ - масса растворенного газа

# Давление насыщения нефти газом

Экспериментально процесс растворения газа в нефти и выделения газа из нефти можно показать в недеформируемом сосуде с поршнем (схема разгазирования пластовой нефти):



В сосуде под поршнем находится нефть с растворенным в ней газом при некотором начальном давлении  $p_0$ . Не меняя температуру системы, выдвинем поршень вверх. При этом нефть займет больший объем, а давление под поршнем понизится, и при некотором его значении из нефти начнут выделяться пузырьки газа. Этому процессу предшествует процесс зародышеобразования новой фазы, который, является неравновесным и зависит от темпа падения давления в системе во времени. При обратном ходе поршня газ начнет растворяться в нефти до полного растворения, когда давление в системе вновь примет значение  $p_0$ .



## Давление насыщения нефти газом

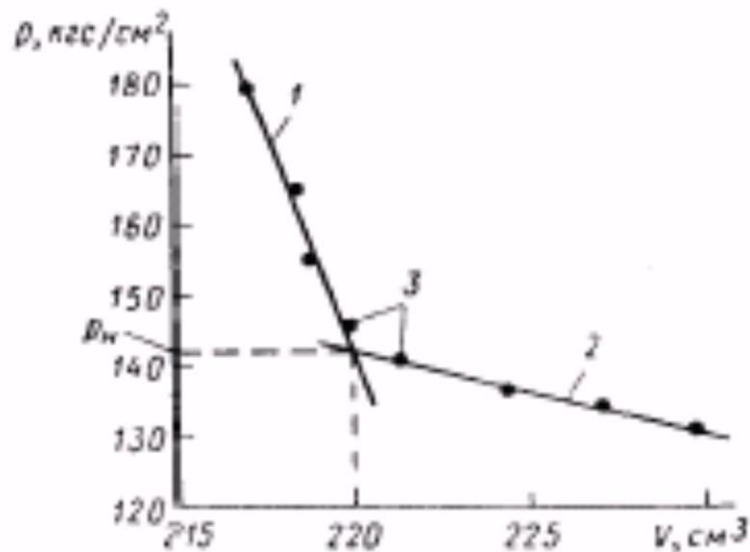
Давление, при котором из нефти выделяется первый пузырек газа, названо **давлением насыщения нефти** газом. Если продолжать выдвигать поршень вверх, то газ, выделившийся из нефти, займет весь свободный объем. Оставшаяся нефть называется дегазированной.

Описанный процесс выделения газа из нефти лежит в основе экспериментального определения давления насыщения. Для этого определенное количество газа и нефти помещают в бомбу высокого давления (бомба PVT), измеряют объем нефти вместе с растворенным в ней газом в зависимости от давления. Затем с помощью измерительного пресса проводят сжатие системы, замеряя давление в системе и ее объем.

Когда газ полностью растворен в нефти, изменение ее объема будет происходить по **закону сжимаемой жидкости** (линия 1 на рисунке 4). По мере выделения газа вся смесь становится все более сжимаемой и наклон линии 2, соответствующий этому процессу, будет резко отличаться от линии 1. Точка пересечения этих линий, которые в определенном диапазоне изменения давления можно считать прямыми, и будет соответствовать давлению насыщения  $p_n$ .

# Давление насыщения нефти газом

Зависимость давления от объема в газожидкостной системе



- 1 – жидкая фаза (нефть с растворенным в ней газом);
- 2 – двухфазная смесь (нефть и выделившийся газ);
- 3 – экспериментальные точки;  $p_n$  – давление насыщения

Рисунок 4



## Давление насыщения нефти газом

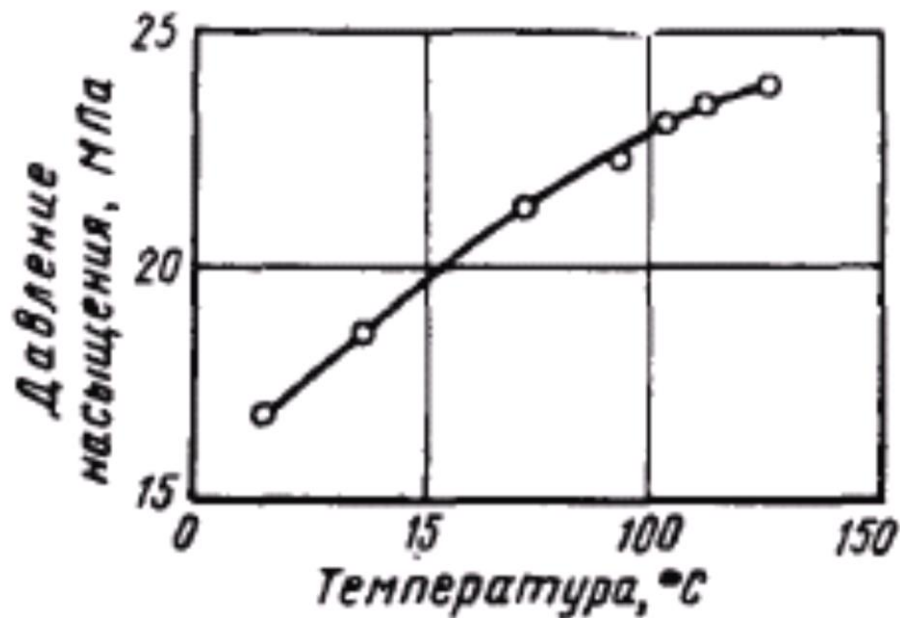
---

Исходя из описанного эксперимента, дают следующее определение **давления насыщения нефти газом** – это то максимальное давление, при котором газ начинает выделяться из нефти при изотермическом ее расширении в условиях термодинамического равновесия. Давления насыщения зависят от составов нефти и газа (повышенное содержание в газе азота существенно повышает давление насыщения), соотношения объемов нефти и газа в залежи, молекулярной массы нефти, пластовой температуры - чем выше температура, тем больше давление насыщения (рисунок 5).

В природных условиях давление насыщения может соответствовать пластовому или быть больше него. Экспериментально определенные значения давления насыщения, в отсутствие пористой среды могут отличаться от реальных пластовых. Это связано с влиянием самой породы – коллектора на процесс разгазирования нефти, а именно некоторому повышению давления насыщения.

## Давление насыщения нефти газом

Пузырьки газа вначале образуются у твердой поверхности, так как работа, необходимая для образования пузырька у стенки, меньше, чем для его образования в свободном пространстве жидкости.



Зависимость давления насыщения нефти газом от температуры

Рисунок 5



## Физические свойства нефти в пластовых условиях

---

**Сжимаемость.** Нефть (как газированная, так и дегазированная), как и все жидкости, обладает упругостью, то есть способностью изменить объем под действие внешнего давления. Упругость жидкостей характеризуется коэффициентом объемной упругости, или коэффициентом сжимаемости:

$$\beta_n = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

где  $V$  – исходный объем нефти,  $P$  – давление.





## Физические свойства нефти в пластовых условиях

---

Коэффициент сжимаемости характеризует относительное изменение единицы объема нефти при изменении давления на единицу. Он зависит от состава пластовой нефти, температуры и абсолютного давления. С увеличением количества растворенного газа и температуры коэффициент сжимаемости увеличивается.

Наиболее сильно на сжимаемость нефти влияет растворенный в ней газ. Нефти, не содержащие растворенный газ, обладают сравнительно низким коэффициентом сжимаемости:  $(0,4 \div 0,7) \text{ ГПа}^{-1}$ .

Нефти, содержащие значительное количество растворенного газа, обладают повышенным коэффициентом сжимаемости, до  $14 \text{ ГПа}^{-1}$ .



## Физические свойства нефти в пластовых условиях

**Объемный коэффициент.** Количество растворенного газа характеризуется объемным коэффициентом:

$$b = \frac{V_{пл}}{V_{дег}}$$

где  $V_{пл}$  – объем нефти в пластовых условиях;  $V_{дег}$  – объем дегазированной нефти при нормальных условиях.

Объем нефти в пластовых условиях превышает объем дегазированной нефти в связи с повышением температуры и, в особенности, с большим содержанием растворенного газа, поэтому значение объемного коэффициента может колебаться от 1 до 3 и в некоторых случаях даже превышать это значение.



## Физические свойства нефти в пластовых условиях

При снижении давления от первоначального пластового  $P_0$  до давления насыщения объемный коэффициент мало меняется, так как нефть с растворенным в ней газом ведет себя в этой области как обычная слабосжимаемая жидкость, слегка расширяясь при снижении давления. По мере снижения давления газ постепенно выделяется из нефти, и объемный коэффициент уменьшается.

**Усадка нефти.** Используя объемный коэффициент, определяют усадку нефти, то есть уменьшение ее объема в нормальных условиях по сравнению с пластовым в процентах:

$$U = \frac{b-1}{b} 100\%$$

Усадка некоторых нефтей достигает 45 – 50%.



## Физические свойства нефти в пластовых условиях

---

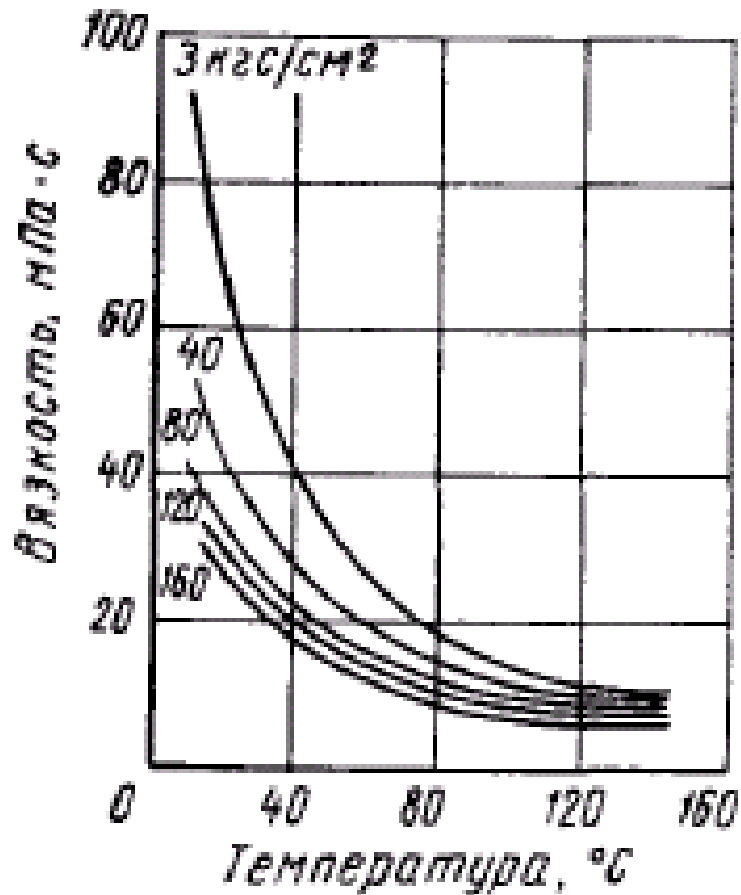
**Плотность нефти** в пластовых условиях уменьшается из-за растворенного в ней газа и в связи с повышением температуры. Однако при снижении давления ниже давления насыщения зависимость плотности нефти носит немонотонный характер, а при увеличении давления выше давления насыщения нефть сжимается и плотность несколько увеличивается.

Не все газы одинаково влияют на плотность нефти. Углеводородные газы, растворяясь в нефти, значительно понижают ее плотность. При насыщении нефти азотом или углекислым газом плотность нефти может несколько возрасти с повышением давления.

**Вязкость пластовой нефти** существенно уменьшается с повышением количества растворенного в ней углеводородного газа, повышения температуры и несколько увеличивается с повышением давления выше давления насыщения. Так же как и плотность, вязкость нефти может возрасти при растворении в ней азота.

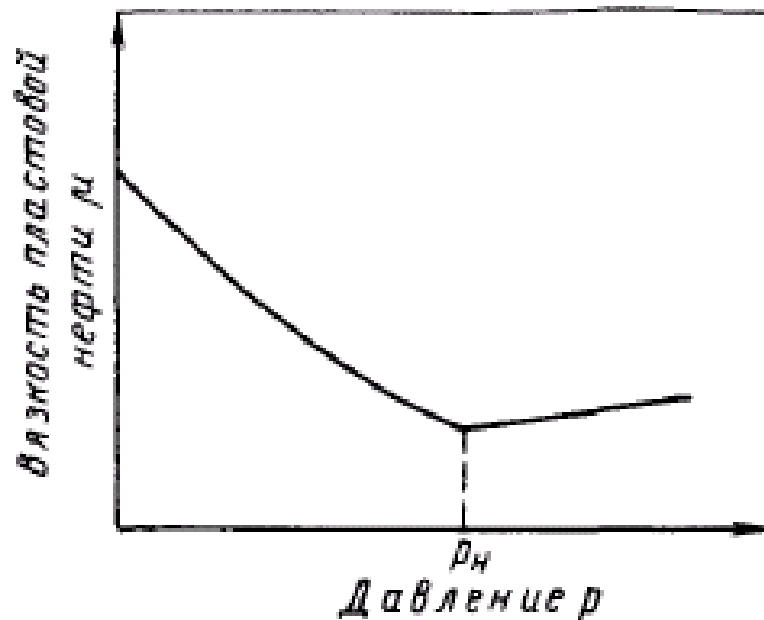
# Физические свойства нефти в пластовых условиях

Влияние растворенного газа и температуры на вязкость пластовой нефти



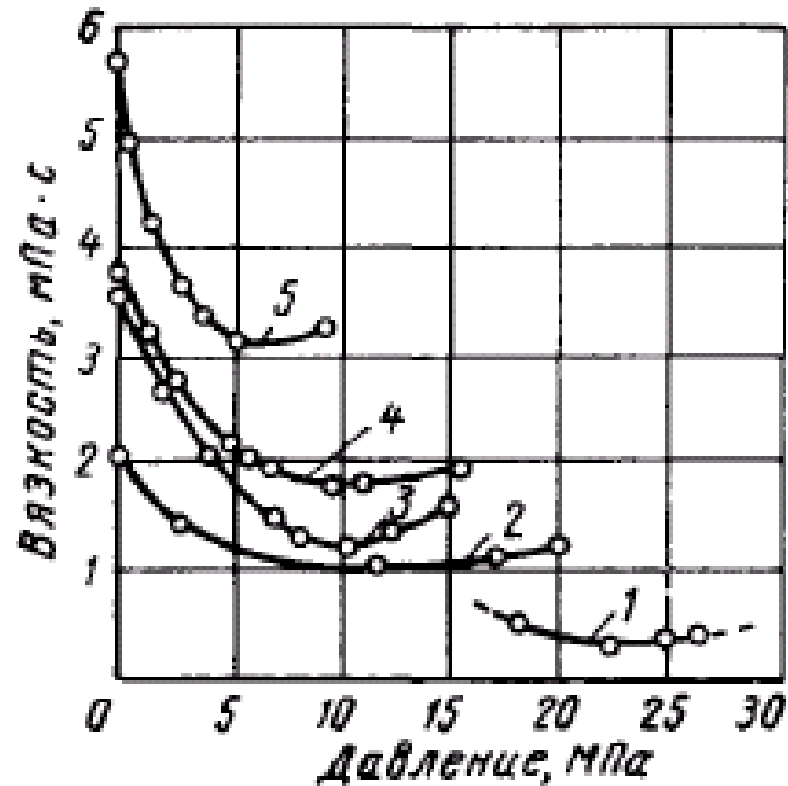
# Физические свойства нефти в пластовых условиях

Схематическая зависимость вязкости пластовой нефти от давления



# Физические свойства нефти в пластовых условиях

Зависимость вязкости реальных пластовых нефтей от давления





## Растворимость газов в воде

---

Растворимость углеводородных газов в воде по сравнению с их растворимостью в углеводородных жидкостях весьма мала, но, учитывая большие площади контакта воды с газом, например, в газовых залежах или в искусственных газохранилищах, необходимо исследовать процессы растворения газов в воде, особенно при больших давлениях.

Процессы растворения в воде для газов рассматривают, как правило, относительно его отдельных компонентов в виде объема газового компонента растворенного в единице объема воды:

$$C_i = \frac{V_i}{V_v}$$





## Растворимость газов в воде

---

или в единице массы воды:

$$b_i = \frac{V_i}{M_g}$$

или в виде молярных долей:

$$N_i = \frac{n_i}{n_g + \sum n_i}$$

$C_i$  – концентрация  $i$ -го компонента газа, растворенного в воде;  $V_i$  – объем газового компонента, приведенного к нормальным условиям;  $M_g$  – масса воды, в которой растворен компонент;  $b_i$  – удельная концентрация  $i$ -го компонента газа, растворенного в единице массы воды;  $N_i$  – молярная концентрация  $i$ -го компонента газа, растворенного в воде;  $n_i$  – число молей  $i$ -го компонента в газе;  $n_g$  – число молей воды.



## Растворимость газов в воде

---

Растворимость газов в воде зависит от степени минерализации воды и температуры. В соленой воде газ растворяется хуже, чем в дистиллированной, что по аналогии с процессом растворения сахара в воде можно объяснить тем, что в дистиллированной воде свободного пространства внутри молекул воды, которое может быть занято молекулами газа, больше, чем в соленой.

Более сложный характер имеет процесс растворения газа в воде с изменением температуры – растворимость газов вначале уменьшается до некоторого минимума, а затем растет.

Температура минимальной растворимости зависит от давления (с повышением давления увеличивается) и от размеров молекул газа (чем больше размер молекул, тем выше минимальная температура растворимости).



## Растворимость газов в воде

---

Для выражения растворимости данного компонента газа в воде используется константа равновесия:

$$K_i = \frac{N_i^g}{V_i^{ж}}$$

и  $N_i^g$   $V_i^{ж}$  – молярные доли компонента в газовой и жидкой фазах.

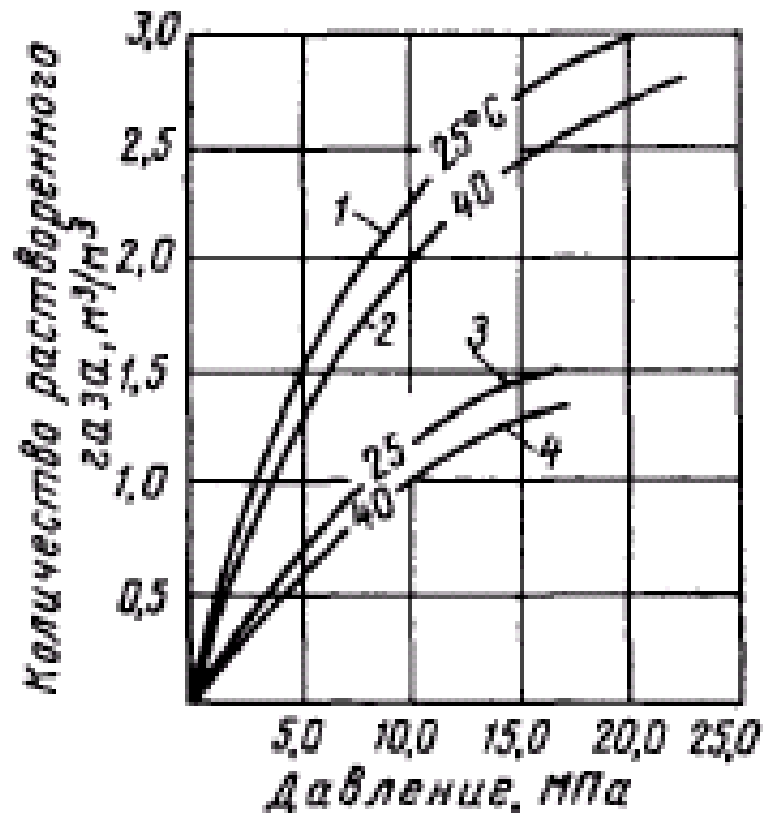
Влияние на растворимость газа содержащейся в воде соли учитывается уравнением Сеченова:

$$N_i^g = N_i^{ж} 10^{-a_i n}$$

$a_i$  – коэффициент Сеченова, характеризующий влияние данной соли на растворимость  $i$  – го компонента газа;  $n$  – концентрация соли в воде.

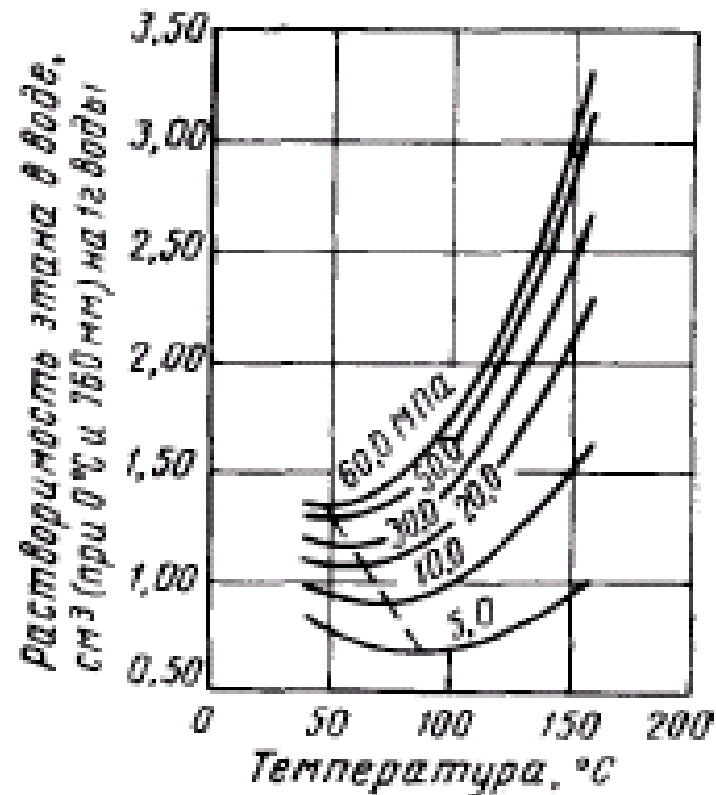
# Растворимость газов в воде

Кривые растворимости газа в дистиллированной (1,2) и соленой (раствор NaCl) воде (3,4) при различных температурах



# Растворимость газов в воде

Зависимость растворимости этана от температуры при различных давлениях





## Контрольные вопросы

---

1. В каких фазовых состояниях могут находиться флюиды в земной коре?
2. Что такое коэффициент разгазирования?
3. Почему приращение объема жидкости не соответствует истинному объему растворенного в ней газа?
4. Какое давление называется давлением насыщения нефти газом?
5. Что характеризует коэффициент сжимаемости?
6. Как определяется объемный коэффициент?
7. Что такое усадка нефти?
8. Как изменяются плотность и вязкость нефти в пластовых условиях?
9. Что характеризует вязкость нефти?
10. Что такое давление насыщения нефти газом?



## 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.