



Уравнения материального баланса.
Уравнение Бернулли, уравнение
неразрывности.

Повторение

Тест

Материальный баланс

Материальный баланс

Основные положения

МБ – это инструмент, который **позволяет определить**:

- **режим разработки**
- **запасы и размер газовой шапки**
- **параметры поведения пласта** в процессе разработки
- значение **КИН**

В основе уравнения МБ закон сохранения массы

В процессе добычи пластовое давление снижается, в результате чего:

- поровый объем пласта станет меньше
- нефть и связанная вода расширятся
- при снижении давления ниже давления насыщения нефть
- уменьшит объем за счет выхода растворенного газа
- свободный газ расширится
- вода будет продвигаться в пласт

Расчет МБ основан на сравнении начальных и текущих условий состояния пласта

Материальный баланс

Основные положения

Простейшей формой динамической модели является материальный баланс.

Материальный баланс – простая концепция, подчиняющаяся закону сохранения масс, согласно которому **извлеченный объем равен сумме изменения первоначального объема и привнесенного объема** (в пласте, например).

$$V_{\text{извлеченный}} = \Delta V_{\text{первоначальный}} + V_{\text{привнесенный}}$$

Данные, необходимые для расчета материального баланса:

- давление (замеры пластового давления)
- объемы флюидов (учет добычи нефти и воды)
- свойства флюидов (PVT)
- свойства породы

Запомнить! Уравнения записываются либо в пластовых условиях , либо в поверхностных

Вспомнить

- Что такое объемный коэффициент? Объемный коэффициент нефти $B_o > 1$? Почему?
- Что такое насыщенность (S_o , S_w – насыщенность нефтью, водой)? Что такое S_{wir} – связанная вода?
- Что такое давление насыщения P_b ?
- Что такое R_s – содержание растворенного газа в нефти?

Задача «Материальный баланс»

Пользуясь методом материального баланса, рассчитайте пластовое давление для месторождения, которое разрабатывается в течение 5 лет. Данные:

Геологические запасы	7000000 т
Накопленная добыча нефти	350000 т
Эффективная сжимаемость	0.00021 1/атм
Объёмный коэффициент нефти	1.12
Объёмный коэффициент воды	1
Начальное пластовое давление	220 атм
Плотность нефти	0.88 г/см ³
Текущее пластовое давление	?

Материальный баланс

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

N – балансовые запасы нефти (м^3)

N_p – накопленная добыча нефти (м^3)

W_p – накопленная добыча воды (м^3)

W_{inj} – накопленная закачка воды (м^3)

W_e – приток воды из-за контура (м^3) (aquifer | аквифер)

G_p – накопленная добыча газа (м^3)

B_o, B_w, B_g – объемный коэффициент нефти, воды, газа ($\text{м}^3/\text{м}^3$)

C_o, C_w, C_f – сжимаемость нефти, воды, породы

S_o, S_w – насыщенность нефтью, водой

S_{wir} – связанная вода

R_s – содержание растворенного газа в нефти

ΔP_r – изменение давления от начального пластового (атм)

V_o, V_w, V_f – объем нефти, объем воды, объем пор (м^3)

Подстрочный индекс «i» обозначает начальные условия

Материальный баланс.

Вывод уравнения материального баланса

Из пласта добывается нефть ($N_p B_o$), давление в пласте (P_r) ниже начального (P_{ri}) на ΔP , но выше давления насыщения (P_b), недонасыщенный пласт $P_{ri} > P_r > P_b$.

Если нет притока воды и нет добычи воды.

$$\text{В пластовых условиях: } V_{fi} \cdot (S_{oi} + S_{wi}) - V_f \cdot (S_o + S_w) = N_p B_o$$

$$V_{fi} \cdot (S_{oi} + S_{wi}) - V_{fi} \cdot (S_o + S_w) + V_{fi} \cdot (S_o + S_w) - V_f \cdot (S_o + S_w) = N_p B_o$$

Объем на начальный
момент

Объем на настоящий момент

V_f, V_{fi} – текущий и начальный поровые объемы компонента

N_p -добытый объем нефти в поверхностных условиях

W_i - закаченный объем воды в поверхностных условиях

$$V_{fi} \cdot (S_{oi} - S_o) + V_{fi} \cdot (S_{wi} - S_w) + \Delta V_f = N_p B_o$$

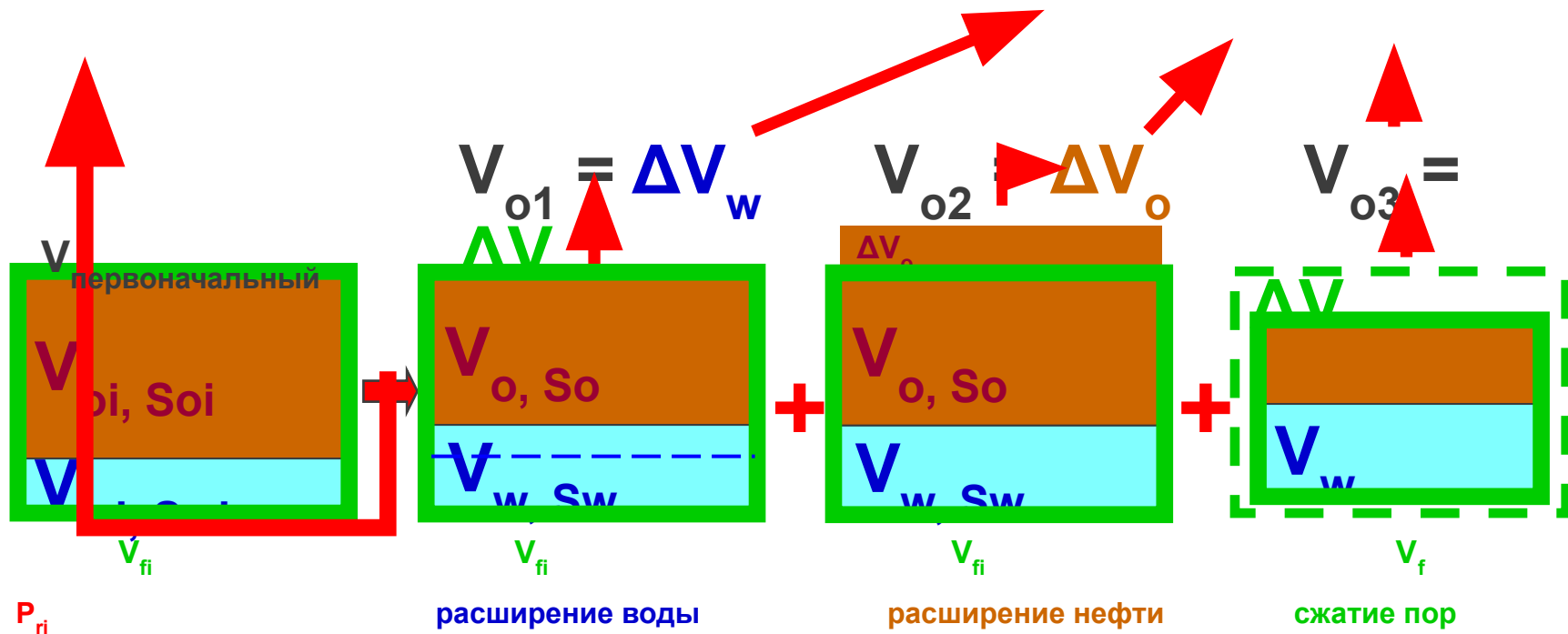
расширение компонент
(при постоянном
поровом объеме)

сжатие пор

Материальный баланс.

Вывод уравнения материального баланса

$$N_p B_o = V_{\text{извлеченный}} = \Delta V_{\text{первоначальный}} = \Delta V_w + \Delta V_o + \Delta V_f$$



Материальный баланс.

Вывод уравнения материального баланса

$$N_p B_o = \Delta V_w + \Delta V_o + \Delta V_f$$

накопленная добыча нефти равна сумме изменений объемов воды, нефти и пор

$$V_{fi} = V_{oi} / S_{oi} = V_{wi} / S_{wi} = V_o / S_o = V_w / S_w$$

Изменение объема воды ΔV_w равно произведению объема воды V_w на сжимаемость воды C_w и на изменение давления ΔP :

$$\Delta V_w = V_w * C_w * \Delta P$$

Объем воды V_w равен

$$V_w = V_{oi} / S_{oi} * S_w$$

в скобках сокращаем S_{wi} , $\Delta V_w = V_{oi} * (S_w / S_{oi}) * C_w * \Delta P$

цель математических преобразований:

выразить изменение объема воды через **начальный объем нефти** и **начальную нефтенасыщенность**

Материальный баланс. Вывод уравнения материального баланса

$$N_p B_o = \Delta V_w + \Delta V_o + \Delta V_f$$

накопленная добыча нефти равна сумме изменений объемов воды, нефти и пор

Изменение объема нефти ΔV_o равно произведению объема нефти V_o на сжимаемость нефти C_o и на изменение давления ΔP :

$$\Delta V_o = V_o * C_o * \Delta P$$

Объем нефти V_o равен произведению начального объема нефти V_{oi} на коэффициент изменения насыщенности нефти S_o / S_{oi} :

$$V_o = V_{oi} * (S_o / S_{oi})$$

Следовательно,

$$\Delta V_o = V_{oi} * (S_o / S_{oi}) * C_o * \Delta P$$

Материальный баланс. Вывод уравнения материального баланса

$$N_p B_o = \Delta V_w + \Delta V_o + \Delta V_f$$

накопленная добыча нефти равна сумме изменений объемов воды, нефти и пор

Изменение объема пор ΔV_f равно произведению начального объема пор V_{fi} на сжимаемость породы C_f и на изменение давления ΔP :

$$\Delta V_f = V_{fi} * C_f * \Delta P$$

Начальный объем пор V_{fi} можно выразить как отношение начального объема нефти V_{oi} к начальной нефтенасыщенности S_{oi} :

$$V_{fi} = V_{oi} / S_{oi}$$

Следовательно,

$$\Delta V_f = V_{oi} / S_{oi} * C_f * \Delta P$$

Материальный баланс.

Вывод уравнения материального баланса

$$N_p B_o = \Delta V_w + \Delta V_o + \Delta V_f$$

накопленная добыча нефти равна сумме изменений объемов воды, нефти и пор

$$\begin{aligned}\Delta V_w &= V_{oi} * S_w / S_{oi} * C_w * \Delta P \\ \Delta V_o &= V_{oi} * S_o / S_{oi} * C_o * \Delta P \\ \Delta V_f &= V_{oi} / S_{oi} * C_f * \Delta P\end{aligned}$$

$$N_p B_o = (V_{oi} / S_{oi} * C_f * \Delta P) + (V_{oi} * S_o / S_{oi} * C_o * \Delta P) + (V_{oi} * S_w / S_{oi} * C_w * \Delta P)$$

из всех трех скобок вынесем $V_{oi} * \Delta P$

$$N_p B_o = V_{oi} \Delta P * (C_f / S_{oi} + C_o S_o / S_{oi} + C_w S_w / S_{oi})$$

$$N_p B_o = V_{oi} * \Delta P * ((C_f + C_o S_o + C_w S_w) / S_{oi})$$

Определим $C_e = (C_f + C_o S_o + C_w S_w) / S_{oi}$, (эффективная сжимаемость).

Начальный объем нефти V_{oi} равен произведению запасов нефти N на начальный объемный коэффициент нефти B_{oi} , $V_{oi} = N * B_{oi}$.

$$N_p B_o = N * B_{oi} * \Delta P * C_e$$

- **Недонасыщенный пласт** – давление в пласте выше давления насыщения ($P_r > P_b$)

- **Нет притока воды и нет добычи воды**

При этих условиях уравнение материального баланса имеет следующий вид:

$$N_p V_o = N * V_{oi} * \Delta P * C_e$$

Ответ в задаче

Материальный баланс.

Вывод уравнения материального баланса

- **Недонасыщенный пласт** – давление в пласте выше давления насыщения ($P_r > P_b$)
- **В пласт есть приток воды** (закачка и приток из законтурной области - аквифер), из пласта добывается нефть и вода

При этих условиях в уравнении материального баланса необходимо учитывать компоненту «закачанная и подтянутая вода, оставшаяся в рассматриваемом пласте»:

$$W_e + (W_{inj} - W_p) * B_w$$

уравнение материального баланса принимает следующий вид:

$$N_p B_o = N * B_{oi} * \Delta P * C_e + W_e + (W_{inj} - W_p) * B_w$$

Материальный баланс. Вывод уравнения материального баланса

Насыщенный пласт – давление в пласте ниже

давления насыщения ($P_r < P_b$), из нефти выделяется газ

Ниже давления насыщения в уравнении материального баланса необходимо учитывать расширение свободного газа выделившегося из нефти.

$$C_e = (C_f + C_o S_o + C_w S_w) / S_{oi} = C_o S_o / S_{oi} + (C_f + C_w S_w) / (1 - S_{wi})$$

Расширение нефти запишем в явном виде (не через сжимаемость). При этих условиях уравнение материального баланса выглядит так:

$$\begin{aligned} & N_p B_o + G_p B_g - N_p R_s B_g = \\ & = N(B_o - B_{oi} + (R_{si} - R_s) B_g) + N B_{oi} \Delta P (C_w S_w + C_f) / (1 - S_{wi}) + \\ & + W_e + (W_{inj} - W_p) B_w + G_{inj} B_g \end{aligned}$$

Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли

Закон (уравнение) Бернулли является следствием [закона сохранения энергии](#) для стационарного потока [идеальной](#) (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости:

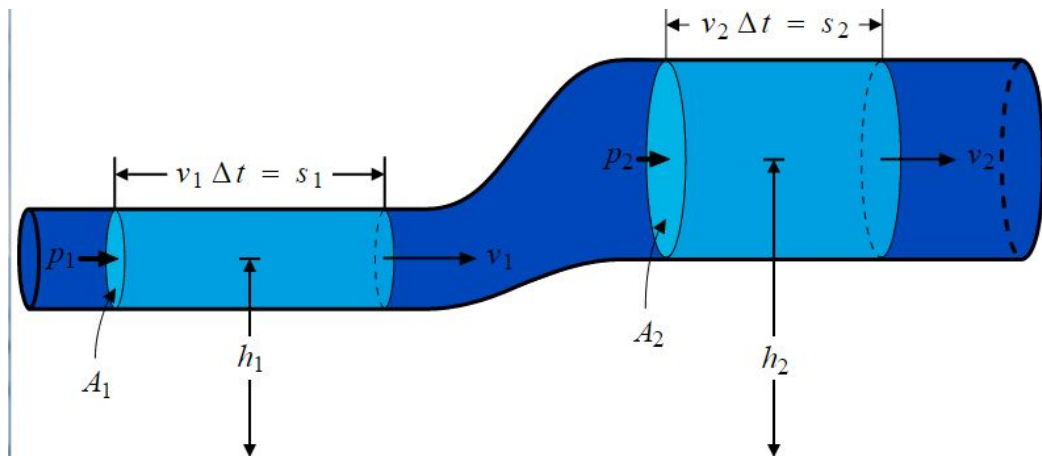
$$\underbrace{\frac{\rho v^2}{2}}_{\text{Кинетическая энергия}} + \underbrace{\rho g h + P}_{\text{Потенциальная энергия}} = \text{const}$$

Кинетическая энергия
Потенциальная энергия

v – скорость потока

ρ – плотность жидкости

P – давление



Уравнение неразрывности

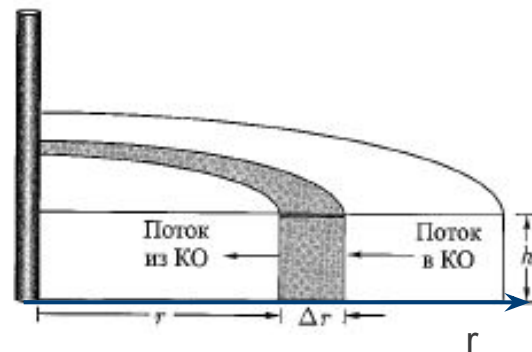
$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} \text{масса жидкости} \\ \text{в КО при } t + \Delta t \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{масса жидкости} \\ \text{в КО при } t \end{array} \right\} \\ &= \left\{ \begin{array}{l} \text{масса жидкости, поступающая} \\ \text{в КО за } \Delta t \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{масса жидкости, покидающая} \\ \text{в КО за } \Delta t \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{\varphi\rho|_{r+\Delta r} - \varphi\rho|_r}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi r h} \frac{[-q\rho|_{r+\Delta r} + q\rho|_r]}{\Delta r}$$

$$q = 2\pi r h u$$

$$\frac{\Delta(\varphi\rho)}{\Delta t} = \frac{1}{r} \frac{\Delta(\rho u r)}{\Delta r}$$

уравнение неразрывности



КО – кольцевая область

После этой лекции я должен знать

1. **Что такое материальный баланс (концепция)**
2. **В каких условиях записываются извлеченные и пластовые объемы компонент**
3. **Уравнение материального баланса для случая недонасыщенного пласта с учетом добычи нефти, воды, закачки воды и притока законтурной воды**
4. **Уравнение Бернулли**
5. **Уравнение неразрывности**