

**МАТЕРИАЛЬНЫЙ**

**БАЛАНС**

# МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

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).

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

## ПРИМЕР Архимеда

Любое моделирование должно поддерживаться проверкой с использованием метода материального баланса.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ:

$N$  – балансовые запасы нефти ( $m^3$ )

$N_p$  – накопленная добыча нефти ( $m^3$ )

$W_p$  – накопленная добыча воды ( $m^3$ )

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

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

$G_p$  – накопленная добыча газа ( $m^3$ )

$B_o, B_w, B_g$  – объемный коэффициент нефти, воды, газа ( $m^3/m^3$ )

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

$S_o, S_w$  – насыщенность нефтью, водой

$S_{wir}$  – связанная вода

$R_s$  – содержание растворенного газа в нефти

$R_p$  – накопленное газосодержание

$\Delta P_r$  – изменение давления от начального пластового (атм)

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

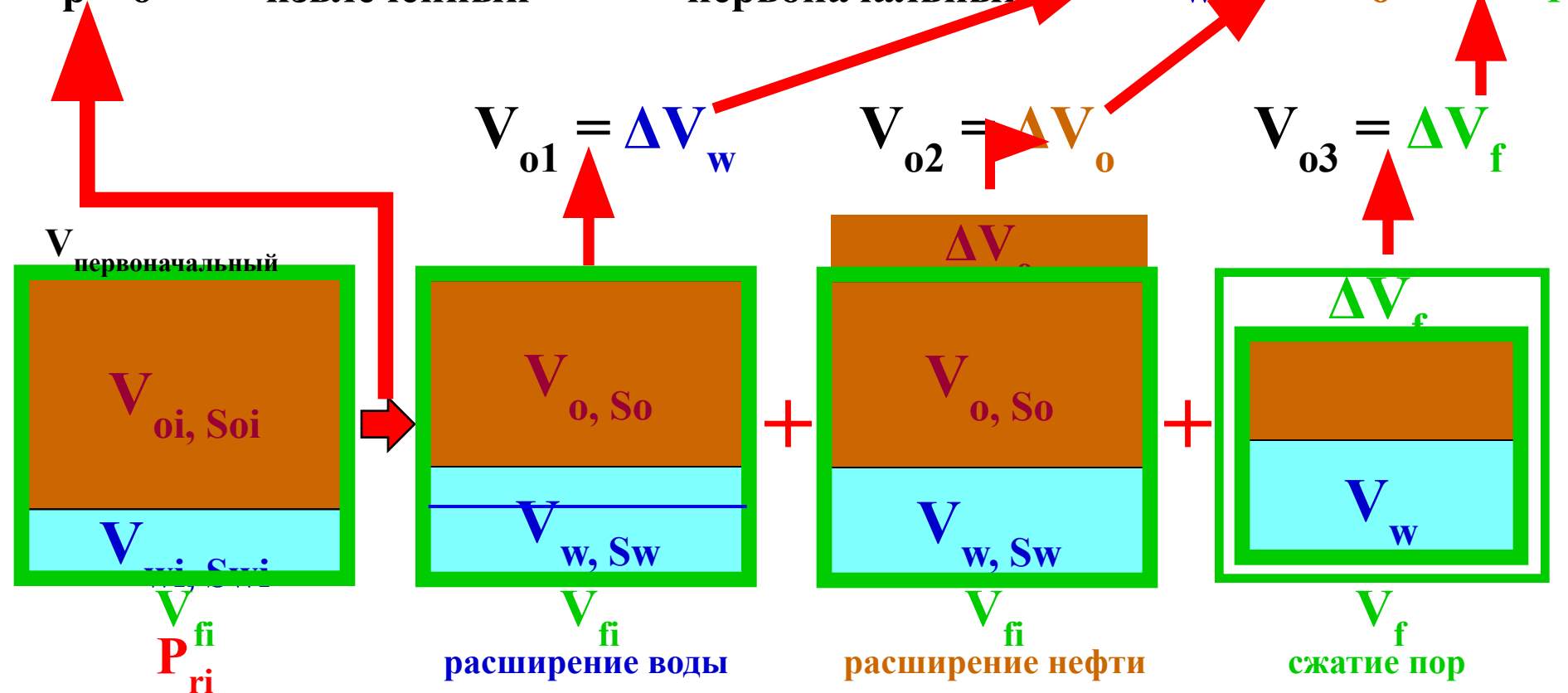
Подстрочный индекс «i» обозначает начальные условия

# Вывод уравнения материального баланса

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

Нет притока воды и нет добычи воды.

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



# 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

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

например:

$$V_{fi}=100, \quad V_{oi}=60, \quad V_{wi}=40, \quad V_{fi} = V_{oi} + V_{wi} = 60 + 40 = 100$$

$$S_{oi}=0.6, \quad S_{wi}=0.4, \quad S_{oi} + S_{wi} = 0.6 + 0.4 = 1$$

$$V_{oi} / S_{oi} = 60 / 0.6 = 100 = V_{fi}$$

$$V_{wi} / S_{wi} = 40 / 0.4 = 100 = V_{fi}$$

$$V_{fi}=100, \quad V_o=50, \quad V_w=50, \quad V_{fi} = V_o + V_w = 50 + 50 = 100$$

$$S_o=0.5, \quad S_w=0.5, \quad S_o + S_w = 0.5 + 0.5 = 1$$

$$V_o / S_o = 50 / 0.5 = 100 = V_{fi}$$

$$V_w / S_w = 50 / 0.5 = 100 = V_{fi}$$

# Вывод уравнения материального баланса

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

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

Изменение объема воды  $\Delta V_w$  равно произведению объема воды  $V_w$  на сжимаемость воды  $C_w$  и на изменение давления  $\Delta P$  :

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

Объем воды  $V_w$  равен произведению начального объема воды  $V_{wi}$  на коэффициент изменения насыщенности воды  $S_w / S_{wi}$  :

$$V_w = V_{wi} * (S_w / S_{wi})$$

значит

$$\Delta V_w = V_{wi} * (S_w / S_{wi}) * C_w * \Delta P$$

так как

$$V_{wi} / S_{wi} = V_{oi} / S_{oi}, \quad \text{то} \quad V_{wi} = V_{oi} / S_{oi} * S_{wi}$$

тогда

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

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

# Вывод уравнения материального баланса

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

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

Изменение объема нефти  $\Delta V_o$  равно произведению объема нефти  $V_o$  на сжимаемость нефти  $C_o$  и на изменение давления  $\Delta P$ :

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

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

# Вывод уравнения материального баланса

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

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

Изменение объема пор  $\Delta V_f$  равно произведению начального объема пор  $V_{fi}$  на сжимаемость породы  $C_f$  и на изменение давления  $\Delta P$  :

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

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



# Вывод уравнения материального баланса

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

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

$$\Delta V_w = V_{oi} * S_w / S_{oi} * C_w * \Delta P$$

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

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

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

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  $B_{oi}$ ,  $V_{oi} = N * B_{oi}$ .

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

# Вывод уравнения материального баланса

1. - 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:

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

# Вывод уравнения материального баланса

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

- В пласт есть приток воды (закачка и приток из законтурной области - аквивер), 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:

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

# Вывод уравнения материального баланса

**3. - 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.

При этих условиях уравнение материального баланса выглядит так:

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

# Данные, необходимые для расчета материального баланса:

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

# Применение материального баланса:

- проверка моделирования
- определение аквифера
- прогноз динамики пластового давления
- подсчет запасов

## Упражнение : (по теме «Материальный баланс»)

Пользуясь методом материального баланса, рассчитайте приток воды из-за контура для месторождения из упражнения «Подсчет запасов ...», которое разрабатывается в течение 5 лет. Дополнительные данные:

Накопленная добыча нефти	550000	т
Накопленная добыча воды	480000	м <sup>3</sup>
Накопленная закачка воды	830000	м <sup>3</sup>
Эффективная сжимаемость	0.00024	1/атм
Объёмный коэффициент нефти	1.16	
Объёмный коэффициент воды	1.01	
Начальное пластовое давление	200	атм
Текущее пластовое давление	160	атм

## Упражнение : (по теме «Материальный баланс»)

**Пользуясь методом материального баланса, рассчитайте пластовое давление через пять лет после начала разработки по данным предыдущего упражнения в случае отсутствия активного контура питания (приток воды из-за контура = 0).**

# Сжимаемость порового пространства

$$c_f = -\frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{\partial \ln(\phi)}{\partial p}$$

## Сжимаемость флюидов

$$c_o = -\frac{1}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial p} = -\frac{\partial \ln(V_o)}{\partial p}$$

## Полная сжимаемость

$$c_e = c_f + S_o c_o + S_w c_w + S_g c_g$$



# Примерные значения сжимаемостей породы и флюидов

Сжимаемость породы ( $C_f$ )

$$55 * 10^{-6} \text{ атм}$$

Сжимаемость воды ( $C_w$ )

$$45 * 10^{-6} \text{ атм}$$

Сжимаемость нефти ( $C_o$ )

$$120 * 10^{-6} \text{ атм}$$

Эффективная сжимаемость ( $C_e$ )

$$300 * 10^{-6} \text{ атм}$$

---

*Применение уравнения  
материального баланса для  
расчета прогноза пластового  
давления по залежи пласта  
БС10 Энтельской площади*

# Необходимо

- Определить текущее пластовое давление по залежи
- Определить режим притока и размер водоносного пласта
- Рассчитать прогноз пластового давления

## *Уравнение материального баланса*

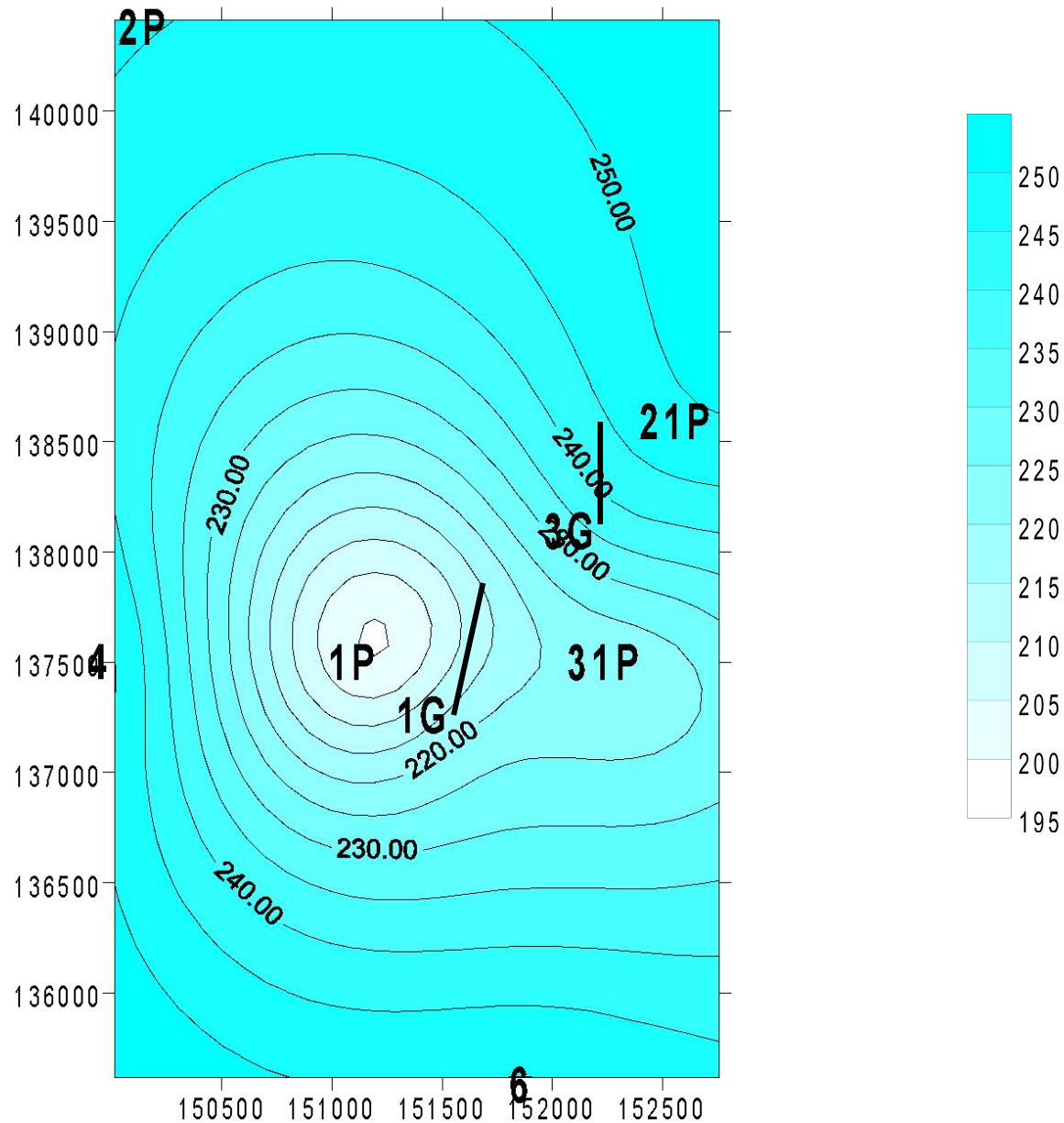
$$N_p B_o = NB_{oi} \Delta p C_e + W_e + (W_{inj} - W_p) B_w$$

$$W_e = 2\pi\phi h \bar{c} r_o^2 \Delta p W_D(t_D)$$

## *Параметры работы скважин*

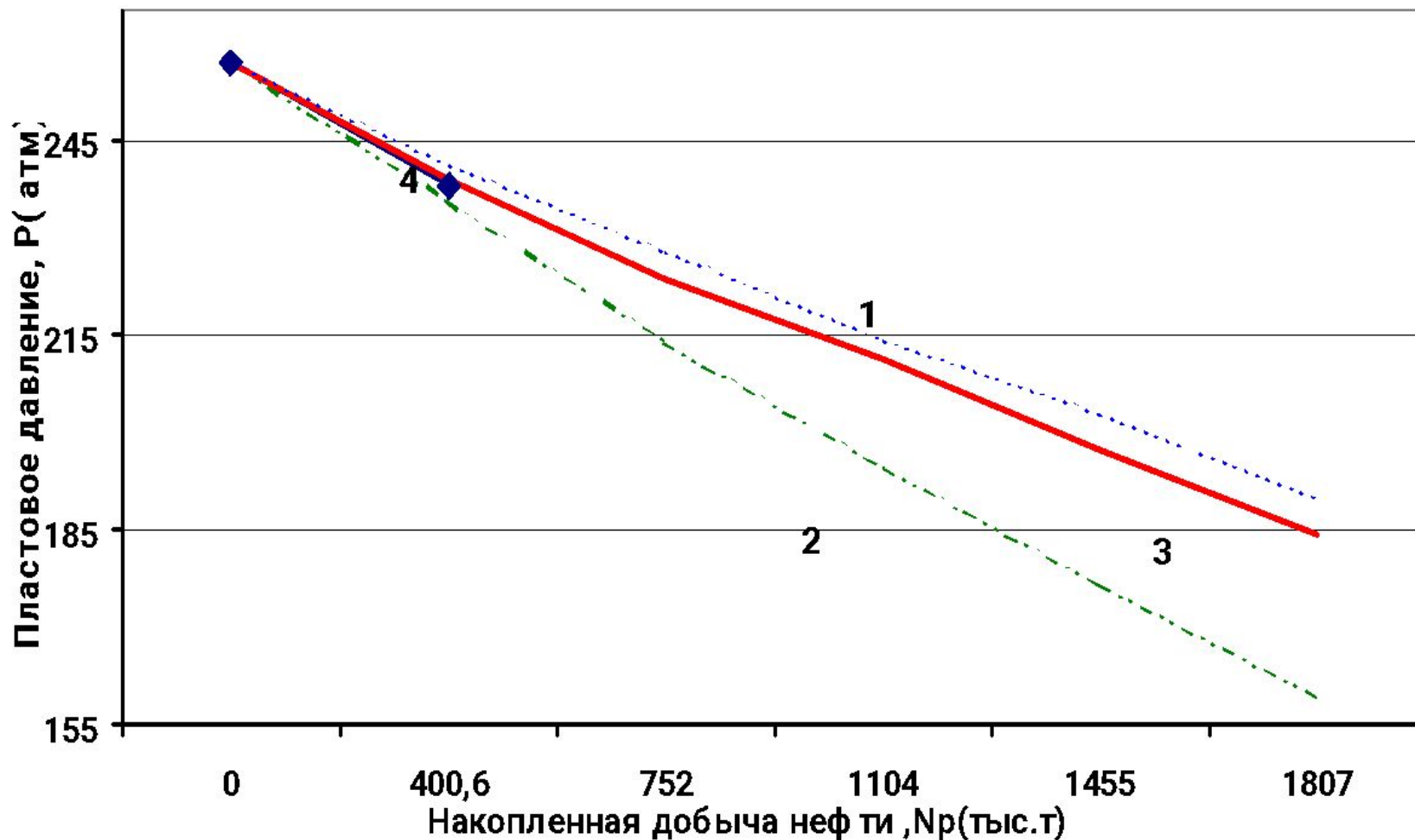
№ скв	Q <sub>ж</sub> , т/сут	Q <sub>н</sub> , т/сут	Q <sub>в</sub> , т/сут	P <sub>пл</sub> , атм
1Р	435	430	5	200
31Р	541	237	304	223
1Г	1837	1817	20	225
3Г	1402	1370	32	243
<b>Σ</b>	<b>4215</b>	<b>3854</b>	<b>361</b>	<b>238</b>

# Карта пластового давления



# Расчет прогноза пластового давления

Дата	№р	Wр	ΔP	P	Wd	ΔP	P	Wd	ΔP	P	Wd	ΔP	P	We
			Бесконечный водоносный пласт			$r_e = 2r_o$			$r_e = 2.5r_o$			факт		
	0	0										0	257	
1,11,02	401	47	16	241	1.9	24	233	1.08	18	239	1.58	19	238	393
1,02,03	752	80	29	228	1.91	43	214	1.15	33	224	1.60			
1,05,03	1104	146	43	214	1.95	62	195	1.20	46	211	1.80			
1,08,03	1455	212	54	203	2.08	80	177	1.25	60	197	1.85			
1,00,03	1807	277	67	190	2.10	98	159	1.30	73	184	1.90			



## Зависимость пластового давления от накопленной добычи

**1- для бесконечного водоносного пласта; 2 – для  $r_e = 2r_0$  ;**  
**3 -- для  $r_e = 2,5r_0$  (ожидаемая) ; 4 - факт**



# ***Выводы и рекомендации***

- **Площадь водоносного пласта значительно выше продуктивного ( $r_e = 2.5r_o$ ).**
- **После года работы пластовое давление снизится до 184 атм**
- **Для уточнения модели залежи необходимы**
  - 1. Данные по пластовому давлению продуктивных скважин ( по результатам Well Test по 1Г и 3Г и рассчитанные по уровням по 1Р и 31Р).**
  - 2. Замеры пластового давления в водоносной части пласта (для определения падения давления в аквифере).**

# Упражнение (домашнее задание): по теме материальный баланс

*По «своему» месторождению (либо одному из «своих» месторождений) пользуясь методом материального баланса, рассчитайте приток воды из-за контура (на текущую дату).*

*Источник данных – СМД ... (почта, телефон, телеграф).*

*Формат выполнения задания – Excel.*

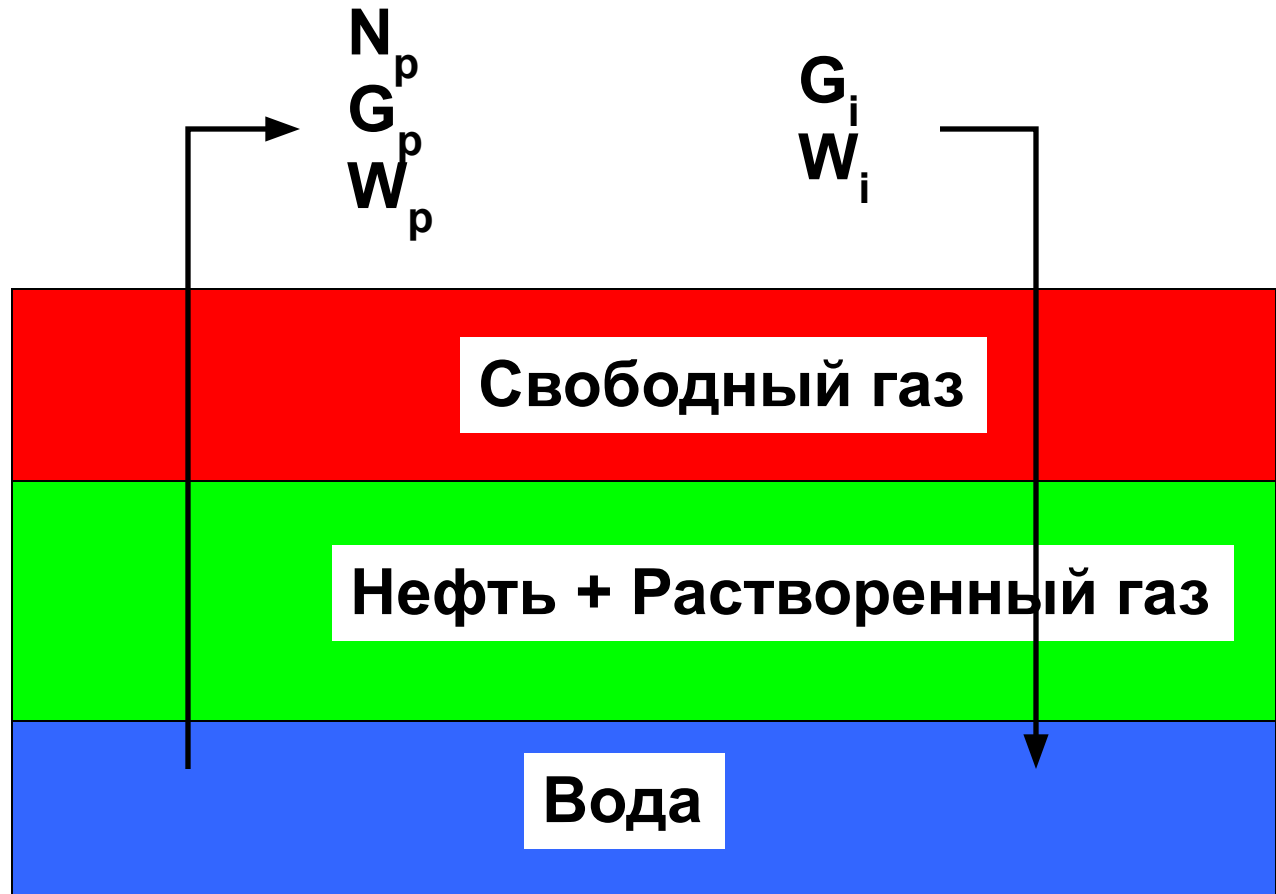
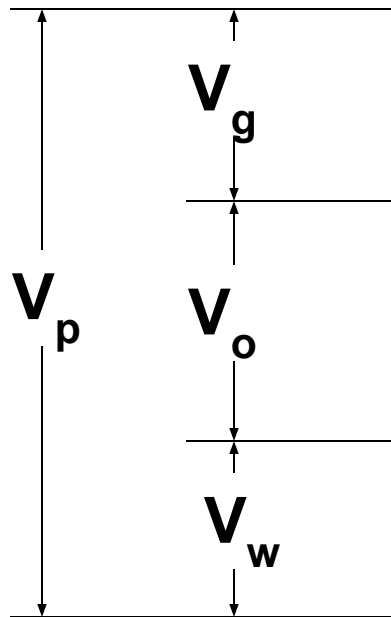
# Концепция материального баланса

- Поскольку объем пласта постоянен, алгебраическая сумма изменений объема (включая добычу и нагнетание) нефти, свободного газа и воды должны равняться нулю
- Другими словами, расширение образует пустоты: пустоты (добыча минус закачивание минус приток) образуются путем расширения веществ породы

**Мы можем представить поровое пространство пласта в виде закрытого резервуара, содержащего воду, нефть, растворенный газ и свободный газ.**

**Как говорилось ранее, объем флюидов в стандартных условиях сильно отличается от объема флюидов в пластовых условиях.**

$$S_w = \frac{V_{wi}}{V_{pi}}$$
$$m = \frac{V_{gi}}{V_{oi}}$$



# Сжимаемости породы и флюидов

**Сжимаемость породы**

$$(0,3...2) * 10^{-5} \quad 1/\text{атм}$$

**Сжимаемость воды**

$$(4...5) * 10^{-5} \quad 1/\text{атм}$$

**Сжимаемость нефти** (зависит от количества растворённого газа)

$$(7...130) * 10^{-5} \quad 1/\text{атм}$$

**Эффективная сжимаемость** (при  $S_w = 0,2$ )

$$(8,4...134) * 10^{-5} \quad 1/\text{атм}$$