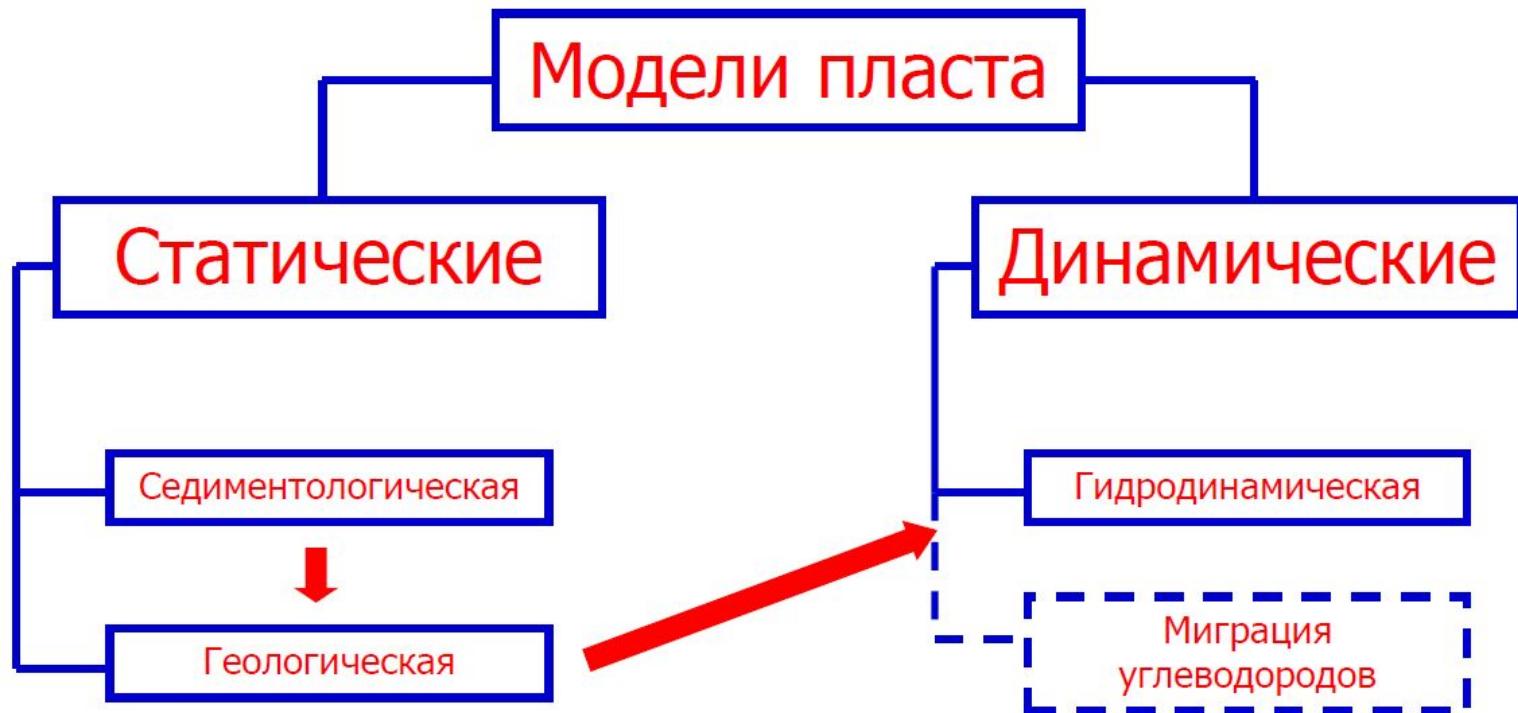
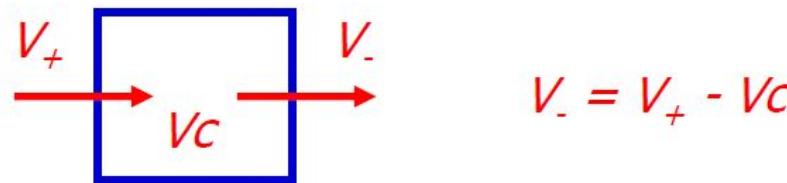


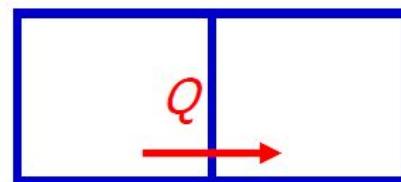
# Гидродинамическое моделирование



- Гидродинамическое моделирование
  - численное решение систем уравнений полученных на основе
    - Материального баланса



- Закона Дарси

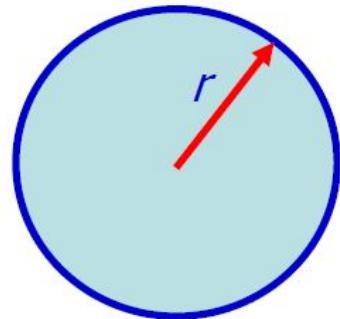


$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

## Математические модели

### Аналитические

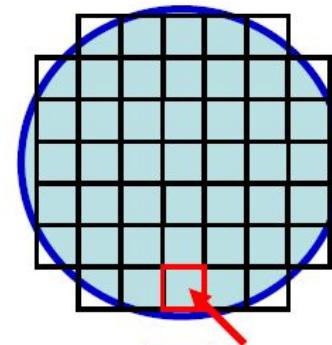
Решение в виде формулы  
точность



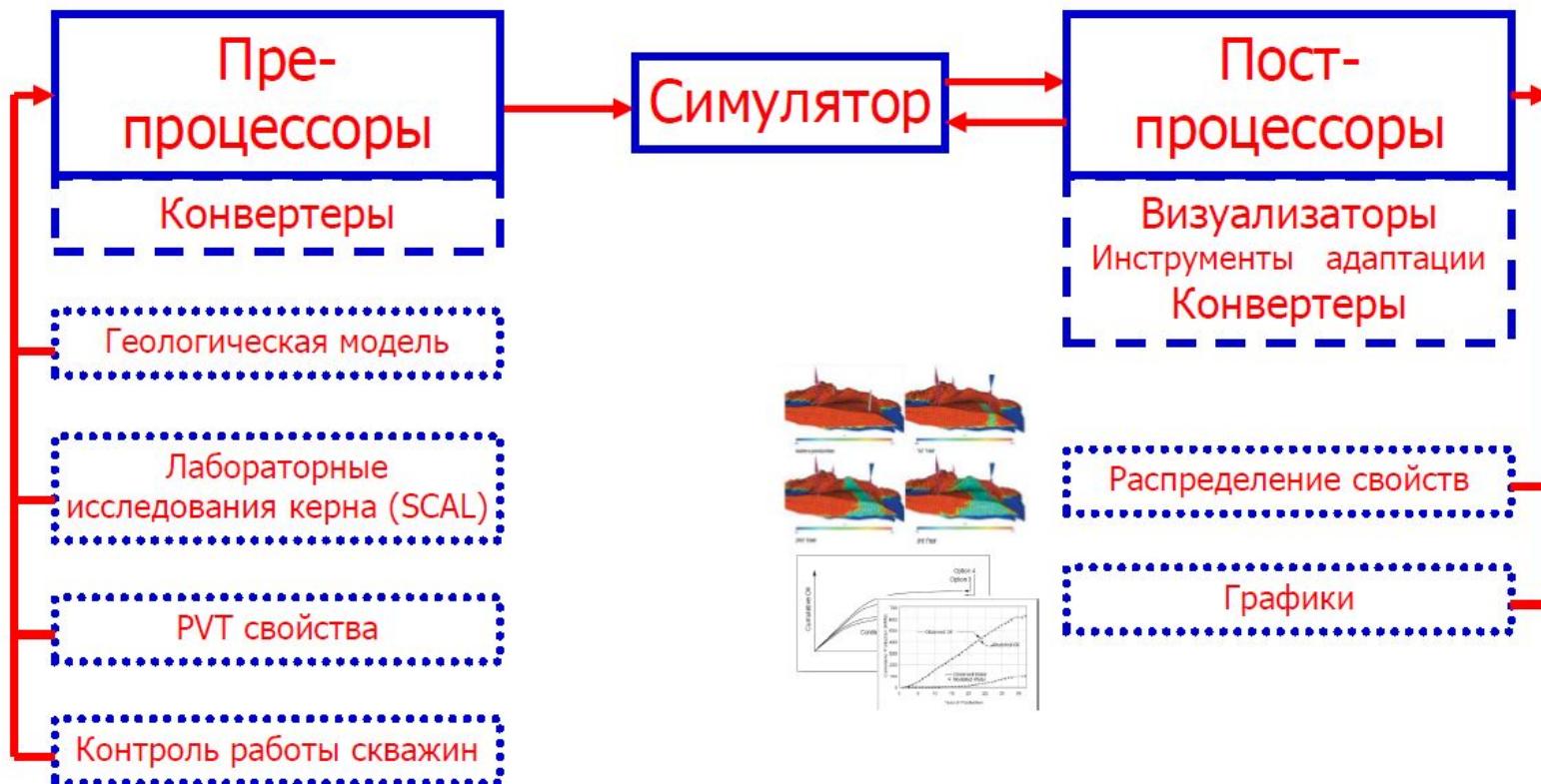
$$S = \pi \cdot r^2$$

### Численные

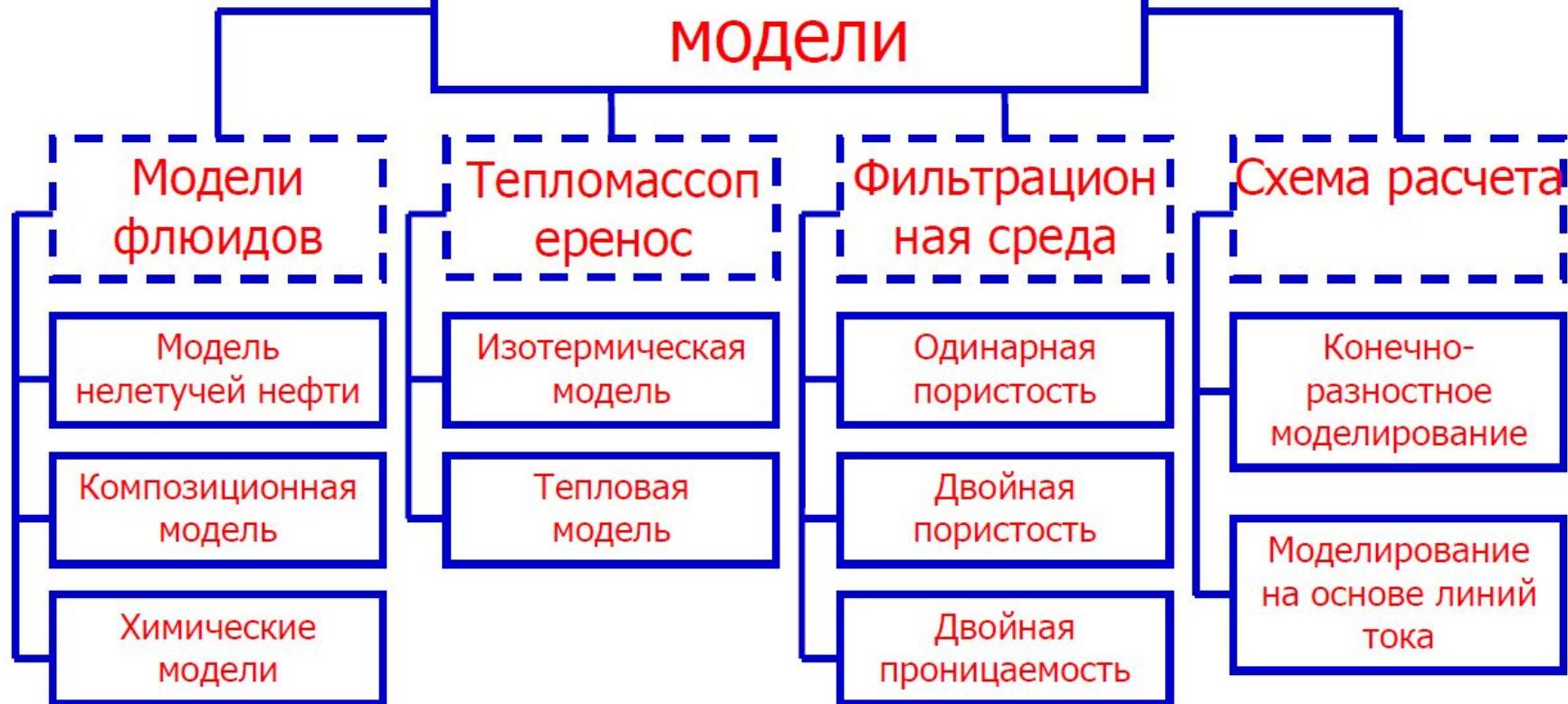
Решение систем уравнений



$$S = \sum S_{sq}$$

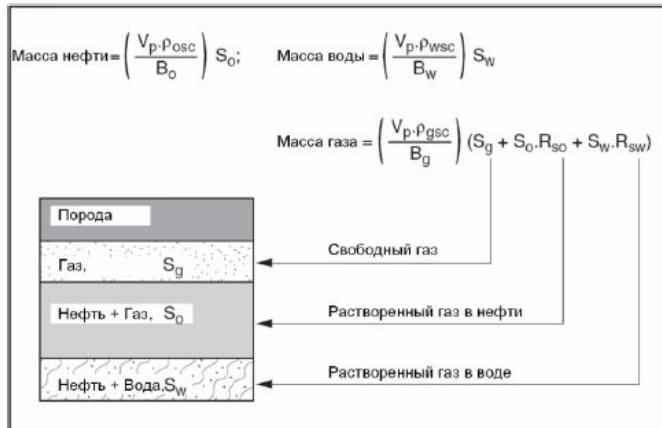


# Гидродинамические модели



## Модель нелетучей нефти (Black Oil)

- флюид представлен 3 фазами:  
нефть, газ и вода
- неизменность композиционного состава флюидов
- простота



Материальный баланс для фаз

# Композиционная модель (Compositional)

- флюид представлен компонентами:  
 $C_1, C_2, \dots, C_{n+}$
- пересчет объема каждой фазы с помощью уравнения состояния на каждом шаге
- сложность



Материальный баланс  
для компонентов

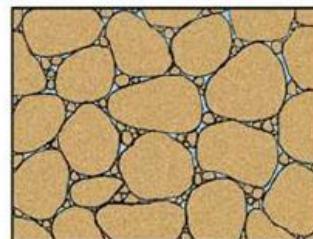
## Тепловая модель (Thermal)

- моделирование процессов повышения нефтеотдачи (Enhanced Oil Recovery, Tertiary recovery):  
пар нагнетают в пласт, для снижения вязкости тяжелой нефти
- дополнительные компоненты (кислород, инертные газы)

## Виды пористости

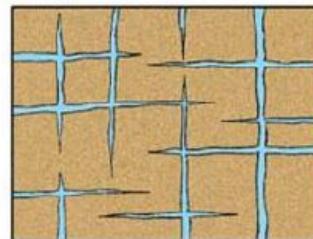
### – Первичная пористость

- образуется в процессе осадконакопления и формировании породы



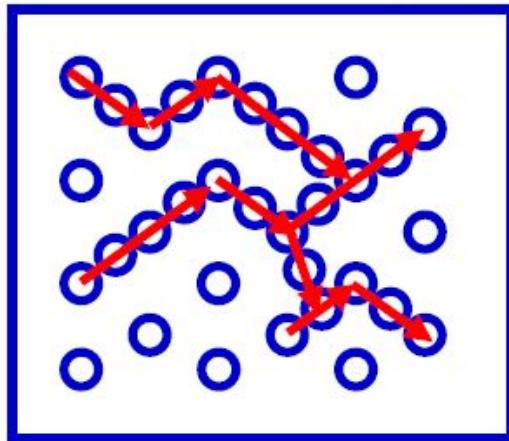
### – Вторичная пористость

- образуется в результате постседиментационных процессов



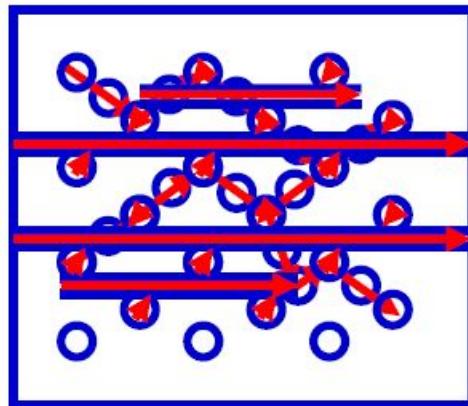
## Модель одинарной пористости (Single Porosity)

- основные запасы нефти содержаться в порах (в матрице)
- движение флюидов осуществляется по порам



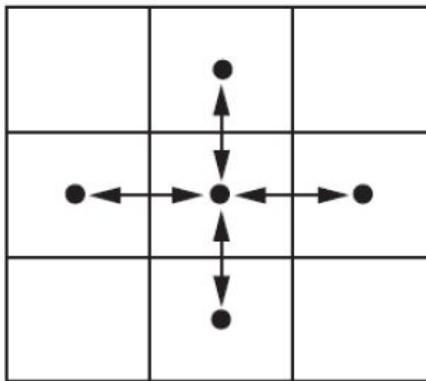
## Модель двойной проницаемости (Double Permeability)

- основные запасы нефти содержаться в порах (в матрице)
- движение флюидов осуществляется по порам и трещинам

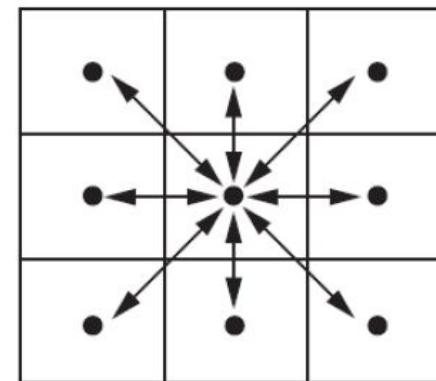


- Конечно-разностное моделирование  
(Conventional, Finite Difference simulation)
  - движение флюида осуществляется через грани ячеек

5 точечная схема

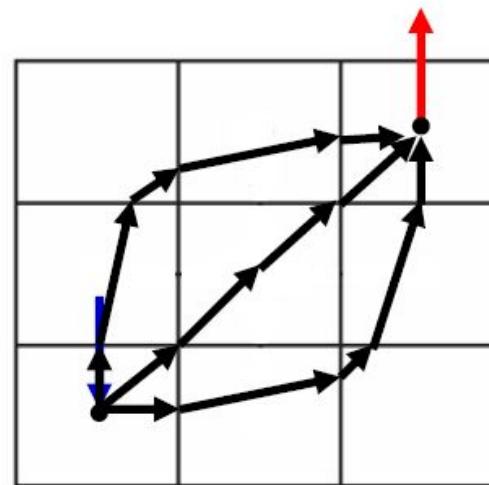


9 точечная схема



## Моделирование на основе линий тока (Streamline simulation)

- по распределению давлений строятся линии тока
- движение флюида осуществляется по линиям тока



# Построение гидродинамической модели

- Построение гидродинамической модели
  - механическая работа, собрать все данные
  - источник данных(осреднение, группировка)
  - анализ результатов расчета модели

- Исходные данные
  - размерность модели
  - структурная сетка и распределение петрофизических свойств
  - физико-химические свойства флюидов
  - начальные условия
  - необходимая выходная информация
  - режимы работы скважин

- **Объект моделирования**
  - месторождение находится при остаточной водонасыщенности
  - пластовое давление в процессе разработки не будет опускаться ниже давления насыщения
  - известны физико-химические свойства флюидов
  - определены режимы работы скважин

- Синтаксис входного файла
  - данные оформляются в виде **ключевых слов**
  - в строке, содержащей **ключевое слово**, не должно быть других символов
  - параметры (данные) **ключевого слова** оформляются на последующих строках
  - после ввода параметров **ключевого слова** должен стоять '**/**' (не нужно, если нет параметров)
  - строки, которые начинаются с '**--**' игнорируются – являются **комментариями**

- Синтаксис входного файла
  - Пример

Описание	Оформление во входном файле		
Комментарии	-- Размеры сетки -- NX NY NZ -- -- -- --		
Ключевое слово	<b>DIMENS</b>		
Параметры	5 5 3		
Конец ключевого слова	/		

- Секции входного файла

**RUNSPEC**

общие данные

**GRID**

описание структурной сетки и  
петрофизических свойств

**PROPS**

свойства пластовых флюидов

**REGIONS**

задание регионов

**SOLUTION**

начальные условия

**SUMMARY**

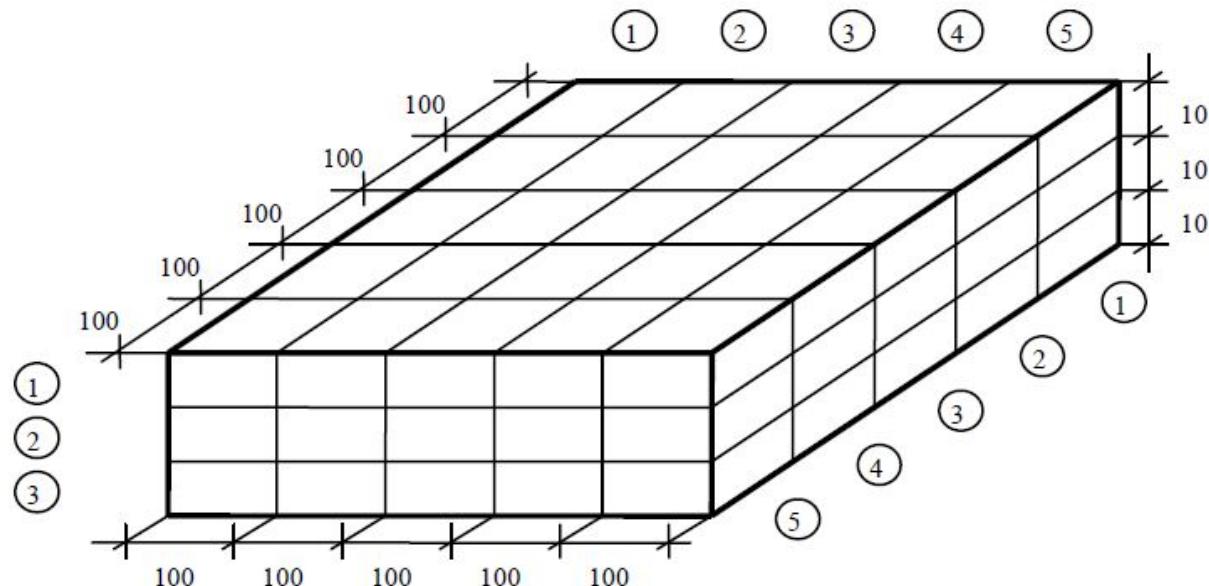
результаты расчета

**SCHEDULE**

режимы работы скважин

- **RUNSPEC** общие данные
  - название модели
  - количество ячеек в модели
  - моделируемые фазы
  - система измерения
  - дата начала моделирования

- **RUNSPEC общие данные**
  - блочно-центрированная структурная сетка  
 **$5 \times 5 \times 3$  ячеек**



- **RUNSPEC общие данные**
  - моделируемые фазы **вода и нефть**
  - система измерения **метрическая**
  - дата начала расчетов **1 января 2011 г.**

- **RUNSPEC** общие данные

**TITLE** – название модели

-- Название модели

**TITLE**

**1<sup>st</sup> Model**

/

- **RUNSPEC** общие данные

**DIMENS** – количество ячеек в направлениях X, Y, Z

-- Размеры сетки

--      **NX**    **NY**    **NZ**

--      --      --      --

**DIMENS**

**5**      **5**      **3**

/

- RUNSPEC общие данные  
OIL, GAS, WATER, DISGAS, VAPOIL –  
моделируемые фазы

-- Фазы

OIL

WATER

METRIC, FIELD, LAB – система измерения для  
входных и выходных данных

-- Система измерения

METRIC

- RUNSPEC общие данные  
START – дата начала моделирования

-- Дата начала моделирования

**START**

**1 JAN 2011**

**/**

- Секции входного файла

**RUNSPEC**

общие данные

**GRID**

описание структурной сетки и  
петрофизических свойств

**PROPS**

свойства пластовых флюидов

**REGIONS**

задание регионов

**SOLUTION**

начальные условия

**SUMMARY**

результаты расчета

**SCHEDEULE**

режимы работы скважин

## **GRID** структурная сетка и петрофизические свойства

- структурная сетка

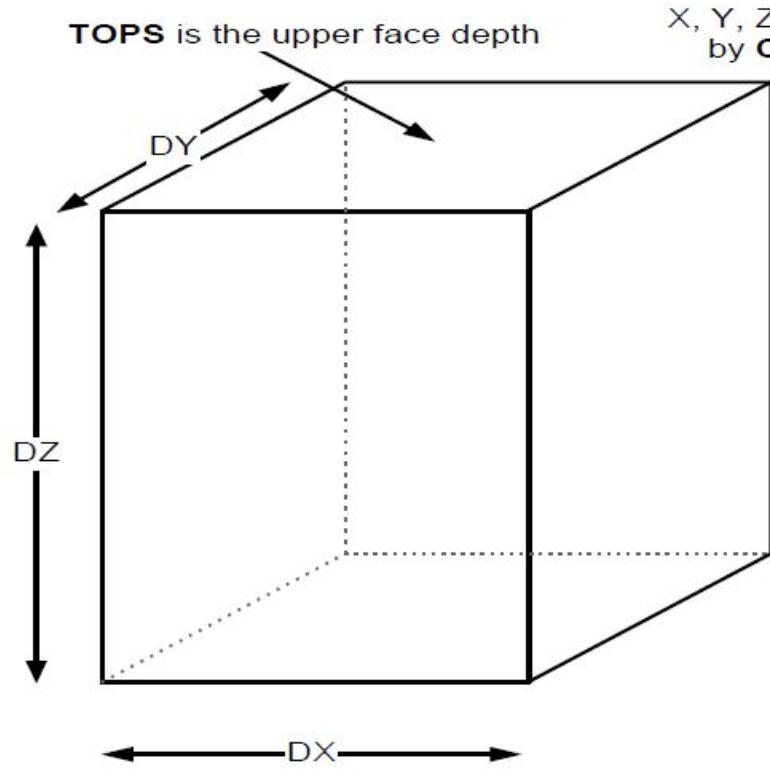
- размеры ячеек
- глубины верхних граней ячеек

- петрофизические свойства ячеек

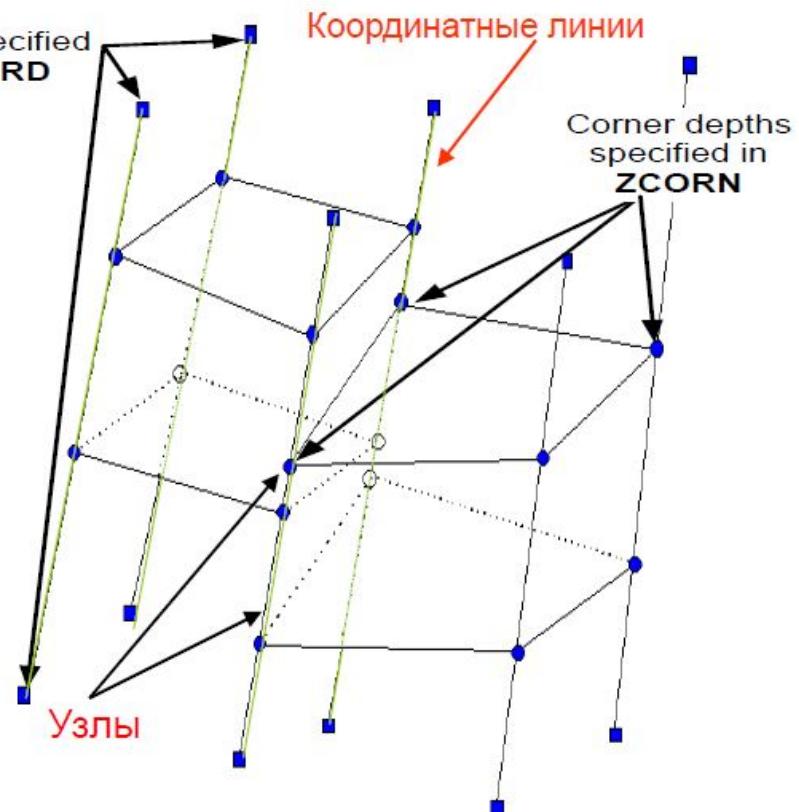
- пористость
- проницаемость в разных направлениях
- песчанистость

# GRID структурная сетка и петрофизические свойства

Cartesian



Corner point



## **GRID структурная сетка и петрофизические свойства**

- сетка состоит из  $5 \times 5 \times 3 = 75$  ячеек
- размеры каждой ячейки  
 $DX = 100$  м     $DY = 100$  м     $DZ = 10$  м
- 75 значений должно быть указано для каждого свойства
- глубина залегания кровли пласта  $2500$  м

## GRID структурная сетка и петрофизические свойства

– однородная пористость  $\phi=0.2$

– проницаемость

Слой	Проницаемость, мД		
	горизонтальная		вертикальная
	X	Y	Z
1	200	200	20
2	1000	1000	100
3	200	200	20

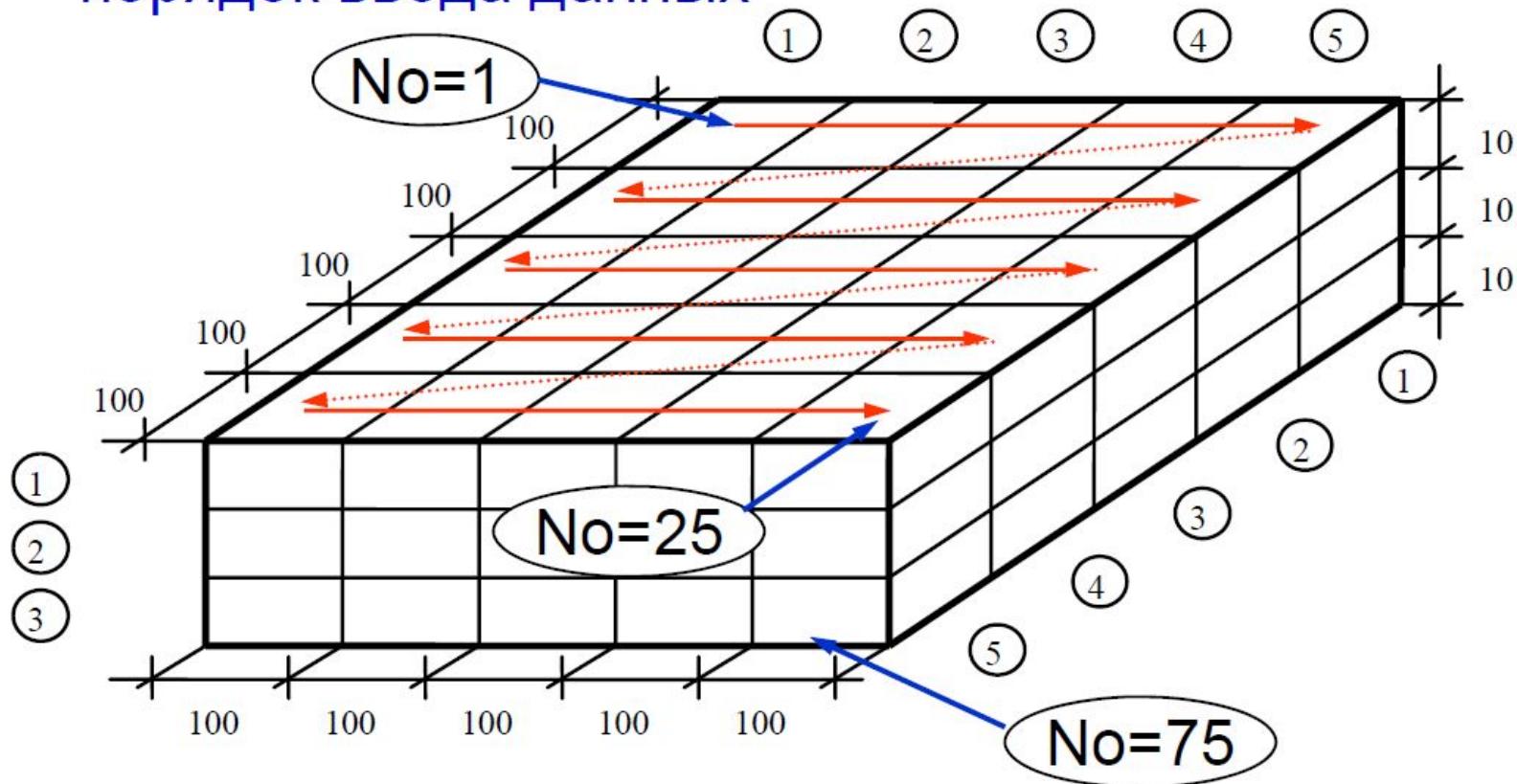
## **GRID** структурная сетка и петрофизические свойства

### – Синтаксис

- значения свойства указываются для каждой ячейки
- данные начинаются на следующей строке после ключевого слова
- хотя бы один пробел между данными
- первое значение указывается для ячейки (1, 1, 1), последнее – (NX, NY, NZ)
- после ввода параметров ключевого слова должен стоять ‘/’

## **GRID структурная сетка и петрофизические свойства**

– порядок ввода данных



# GRID структурная сетка и петрофизические свойства

**DX** – размеры ячеек в направлении X

-- Размеры ячеек в направлении X, Y, Z

DX

**GRID** структурная сетка и петрофизические свойства  
**N\*M** – N значений по M

-- Размеры ячеек в направлении X, Y, Z

**DX**

**75\*100 /**

**DY**

**75\*100 /**

**DZ**

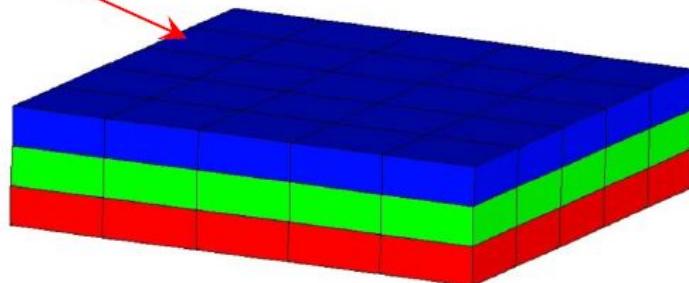
**75\*10 /**

**GRID** структурная сетка и петрофизические свойства  
**TOPS** – глубина кровли ячеек верхнего слоя

-- Глубина залегания ячеек верхнего слоя

**TOPS**

**25\*2500 /**



**GRID** структурная сетка и петрофизические свойства  
**PERMX, PERMY, PERMZ** – проницаемости ячеек

-- Проницаемость ячеек в направлениях X, Y, Z

**PERMX**

**25\*200 25\*1000 25\*200 /**

**PERMY**

**25\*200 25\*1000 25\*200 /**

**PERMZ**

**25\*20 25\*100 25\*20 /**

**PORO** – пористость ячеек

-- Пористость ячеек

**PORO**

**75\*0.2 /**

- Секции входного файла

**RUNSPEC**

общие данные

**GRID**

описание структурной сетки и  
петрофизических свойств

**PROPS**

свойства пластовых флюидов

**REGIONS**

задание регионов

**SOLUTION**

начальные условия

**SUMMARY**

результаты расчета

**SCHEDULE**

режимы работы скважин

## PROPS свойства пластовых флюидов

- плотность нефти, воды и газа  $\rho_{osc}, \rho_{wsc}, \rho_{gsc}$
- зависимости объемного коэффициента и вязкости нефти от давления  $B_o(P), \mu_o(P)$
- объемный коэффициент, сжимаемость и вязкость воды  $B_w(P_{ref}), C_w(P_{ref}), \mu_w(P_{ref})$
- сжимаемость породы  $C_{rock}(P_{ref})$
- относительные фазовые проницаемости и капиллярное давление  $k_{nw}(S_w), k_{wo}(S_w), P_{cow}(S_w)$

**DENSITY** – плотность нефти, воды и газа  $\rho_{osc}, \rho_{wsc}, \rho_{gsc}$

-- Плотность флюидов

	Нефть	Вода	Газ
--	-------	------	-----

--	----	----	---
----	------	------	-----

**DENSITY**

800	1000	1
-----	------	---

/

**PVDO** – физические свойства нефти  $B_o(P), \mu_o(P)$

-- Физические свойства нефти

	P	Bo	μo
--	---	----	----

--	----	----	----
----	------	------	------

**PVDO**

100	1.25	1.0
150	1.20	1.1
250	1.15	2.0

/

**PVTW** – физические свойства воды  $B_w(P_{ref}), C_w(P_{ref}), \mu_w(P_{ref})$

-- Физические свойства воды

--	P	Bw	Cw	$\mu_w$
--	---	---	---	---
<b>PVTW</b>				
	250	1.02	4e-05	0.8

/

**ROCK** – сжимаемость породы  $C_{rock}(P_{ref})$

-- Сжимаемость породы

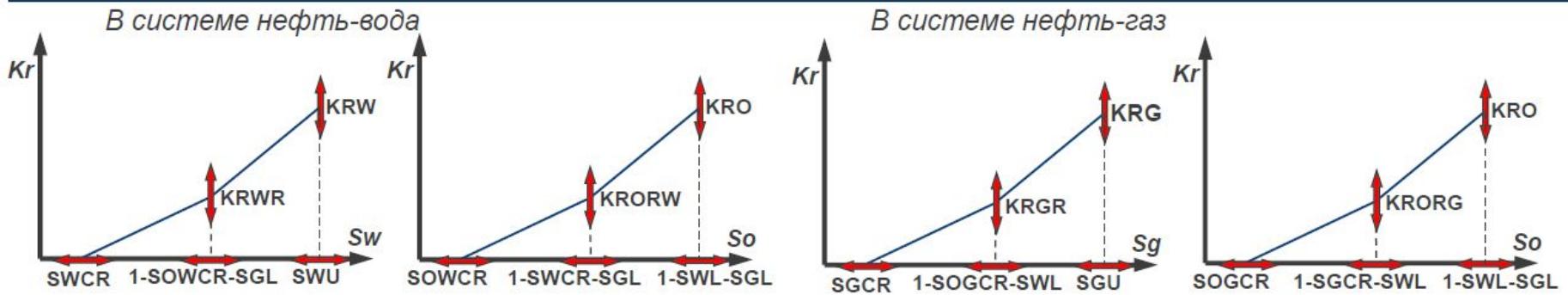
--	P	Cr
--	---	---
<b>ROCK</b>		
	250	4e-05

/

## **SWOF – ОФП и капиллярная кривая** $k_w(S_w), k_v(S_v), P_{cap}(S_w)$

-- ОФП нефти и воды, капиллярное давление

Sw	Krw	Kro	Pc
---	----	----	----
<b>SWOF</b>			
0.2	0	1	3
0.4	0.05	0.25	0.6
0.6	0.1	0.1	0.15
0.8	0.5	0	0.1
1	1	0	0 /



### Трехточечное масштабирование:

$KRW$ ,  $KRO$ ,  $KRG$  – вертикальное масштабирование ОФП при максимальной насыщенности

$KRWR$ ,  $KRORW$ ,  $KRGR$ ,  $KRORG$  – вертикальное масштабирование ОФП в точках критической насыщенности

$SWCR$ ,  $SOWCR$ ,  $SGCR$  – масштабирование критической водно-, нефте-, газонасыщенности

$SWU$ ,  $SGU$  – масштабирование максимальной водно-, газонасыщенности, **действует и на фазовую и на капиллярную**

$SWL$ ,  $SGL$  – минимальное значение водно-, газонасыщенности, масштабирование максимальной нефтенасыщенности, **действует и на фазовую и на капиллярную**

для трехточечного масштабирования в секции PROPS включить флаг:

**SCALECRS  
YES /**

- Секции входного файла

<b>RUNSPEC</b>	общие данные
<b>GRID</b>	описание структурной сетки и петрофизических свойств
<b>PROPS</b>	свойства пластовых флюидов
<b>REGIONS</b>	задание регионов
<b>SOLUTION</b>	начальные условия
<b>SUMMARY</b>	результаты расчета
<b>SCHEDULE</b>	режимы работы скважин

## **SOLUTION начальные условия**

- задание начального распределения давления и насыщенности в модели
  - явное
  - перезапуск с рассчитанной модели
  - капиллярно-гравитационное равновесие

## **SOLUTION начальные условия**

– явное задание давления и насыщенности

- указываются значения давления и водонасыщенности для каждой ячейки
- ключевые слова **PRESSURE** и **SWAT**

**PRESSURE**

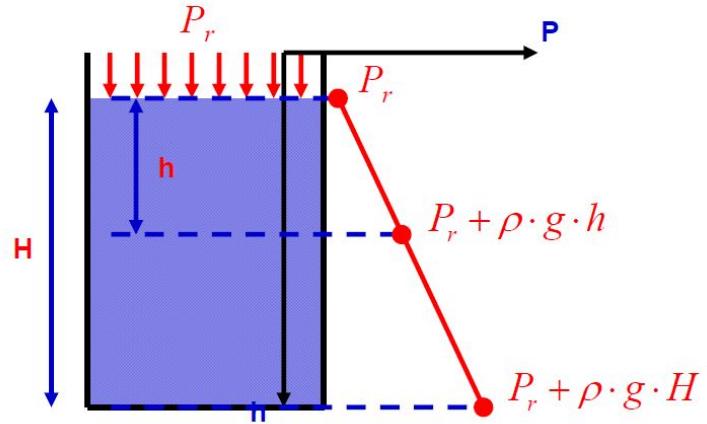
**75\*250 /**

**SWAT**

**75\*0.2 /**

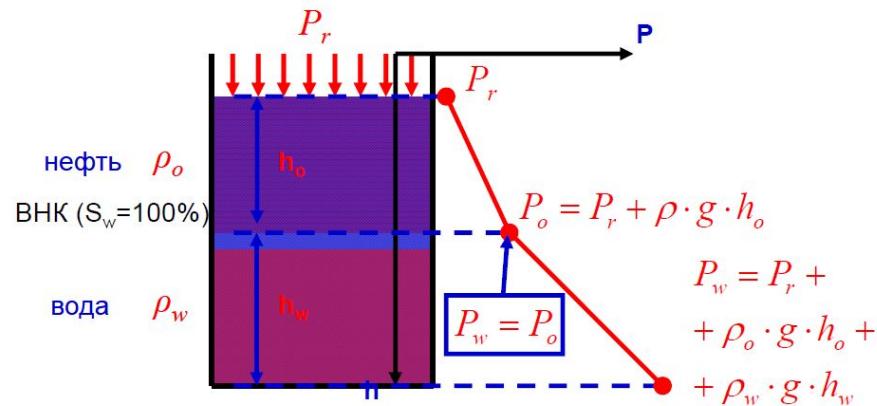
## Гидростатическое давление

– давление столба жидкости в покое



## Гидростатическое (гравитационное) равновесие

– многофазная система



## Капиллярное давление

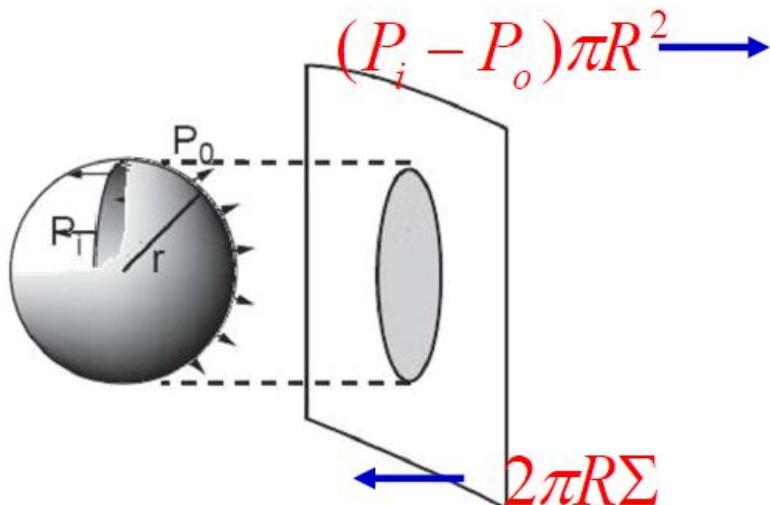
– давление на границе между фазами

$$P_c = P_o - P_w$$

$$P_w < P_o$$

Вода

Нефть

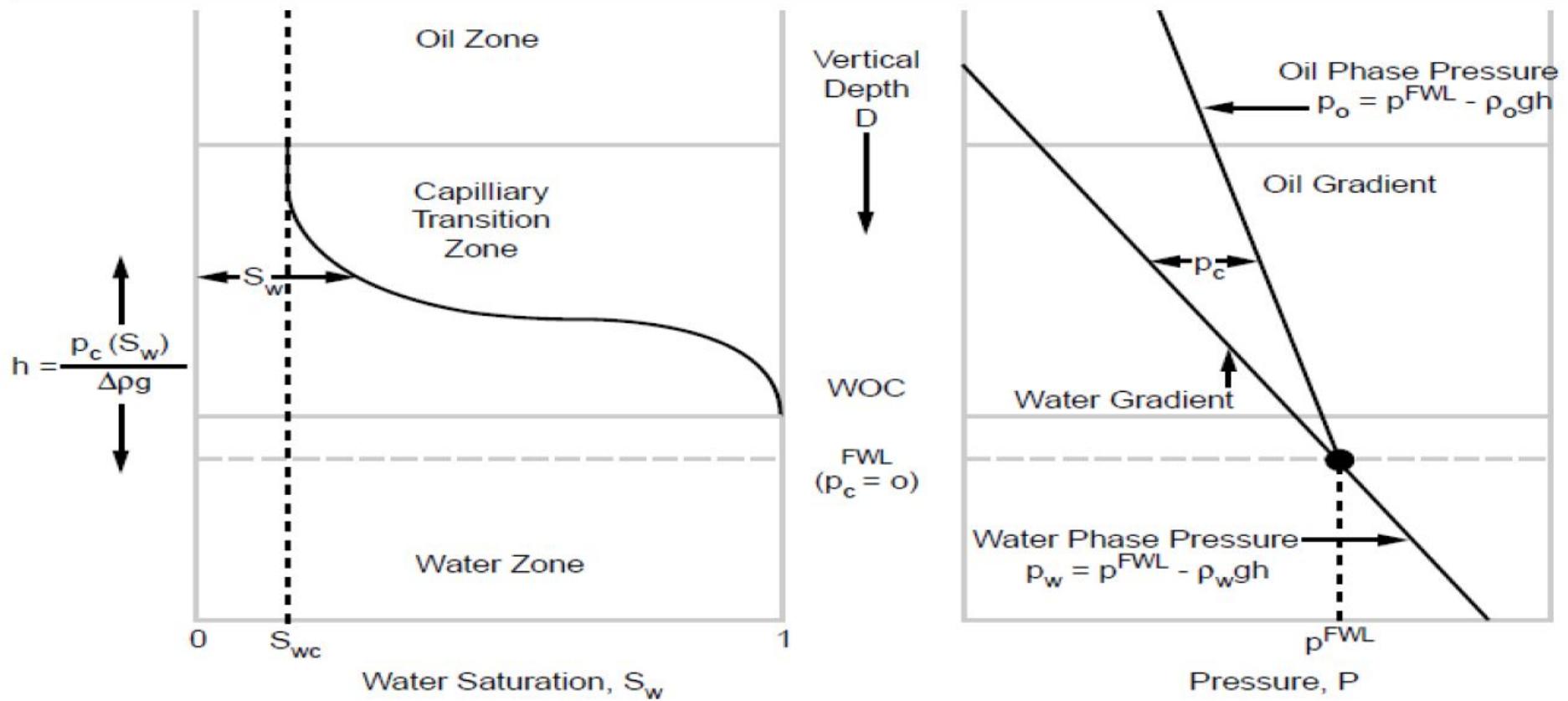


$$(P_i - P_o)\pi R^2 = 2\pi R\Sigma$$



$$P_i - P_o = \frac{2\Sigma}{R}$$

# Капиллярное давление



## **SOLUTION начальные условия**

– капиллярно-гравитационное равновесие **EQUIL**

-- Капиллярно-гравитационное равновесное состояние

Глубина	P <sub>i</sub>	ВНК	P <sub>c</sub>
---------	----------------	-----	----------------

-----	---	-----	-----
-------	-----	-------	-------

**EQUIL**

2500	250	2600	0 /
------	-----	------	-----

- Секции входного файла

<b>RUNSPEC</b>	общие данные
<b>GRID</b>	описание структурной сетки и петрофизических свойств
<b>PROPS</b>	свойства пластовых флюидов
<b>REGIONS</b>	задание регионов
<b>SOLUTION</b>	начальные условия
<b>SUMMARY</b>	результаты расчета
<b>SCHEDULE</b>	режимы работы скважин

## **SCHE**ULE режимы работы скважин

- добывающая скважина P1 принадлежит группе PROD и размещается в ячейке (1, 1)
- нагнетательная скважина I1 принадлежит группе INJ и размещается в ячейке (5, 5)
- внутренний диаметр скважин 168 мм
- перфорированы все 3 слоя
- датчики забойного давления расположены на 2500 м
- дебит добывающей скважины P1 1000 м<sup>3</sup>/сут
- приемистость скважины I1 1000 м<sup>3</sup>/сут
- время прогноза 3 года (36 шагов по 30 дней)

## **SCHEDELE** режимы работы скважин

**WELSPECS** – координаты устья и глубина датчика забойного давления

-- Координаты устья скважины и глубина датчика забойного давления

--	Имя	Имя	Координаты	Глубина	Фаза
--	скв	группы	I	J	датчика
--	-----	-----	-	-	-----

### **WELSPECS**

P1	PROD	1	1	2500	OIL /
I1	INJ	5	5	2500	WATER /

/

## COMPDAT – интервалы перфорации

-- Интервалы перфорации

--	Имя	Координаты		Интервал		Статус	Диаметр
--	скв	I	J	K1	K2		скв
--	----	-	-	--	--	-----	-----

**COMPDAT**

P1	1	1	1	3	OPEN	2*	0.168 /
I1	5	5	1	3	OPEN	2*	0.168 /

/

## WCONPROD – режим работы добывающих скважин

-- Режим работы добывающих скважин

--	Имя	Статус	Режим	Дебит	Дебит	Дебит	Дебит	Давл
--	скв			нефти	воды	газа	жидк	пласт
--	----	-----	-----	----	----	----	----	----

**WCONPROD**

P1	OPEN	LRAT	3*		1000	1*	50 /
----	------	------	----	--	------	----	------

/

## SCHEDULE режимы работы скважин

### WCONPROD ПРИМЕР

-- Режим работы добывающих скважин								
Имя	Статус	Режим	Дебит нефти	Дебит воды	Дебит газа	Дебит жидк	Дебит пласт	Давл
скв	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
---	---	---	---	---	---	---	---	---
<b>WCONPROD</b>								
P2	OPEN	ORAT	4000	2000		3*		3000 /
/								

### WCONINJE – режим работы нагнетательных скважин

-- Режим работы нагнетательных скважин						
Имя	Флюид	Статус	Режим	Дебит	Дебит	Давл
скв				пов	пласт	
---	---	---	---	---	---	---
<b>WCONINJE</b>						
I1	WATER	OPEN	RATE	1000	1*	500 /
/						

**TSTEP** – количество и размер временных шагов  
**N\*M** – N шагов по M дней

-- Количество и размер (дней) временных шагов

**TSTEP**

**36\*30**

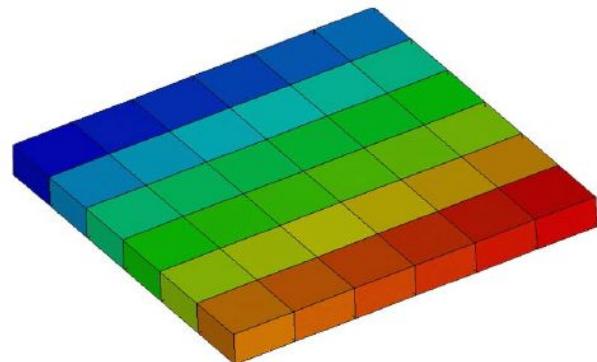
/

# Ремасштабирование модели (Апскейлинг)

- Введение
- Укрупнение сетки (Апгриддинг)
- Однофазный апскейлинг
- Двухфазный апскейлинг
- Дополнительные темы

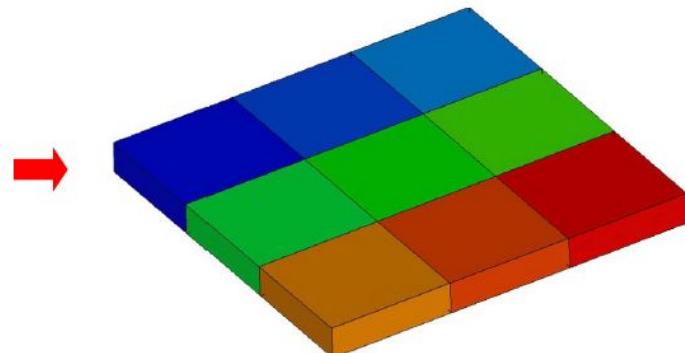
- Ремасштабирование модели (Апскейлинг)
  - переход от геологической (мелкоячеистой) модели к адекватной ей гидродинамической (крупноячеистой) модели

Геологическая модель



$\approx 10^6\text{-}10^7$  ячеек

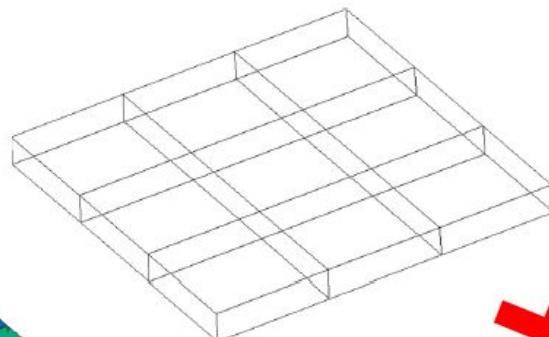
Гидродинамическая модель



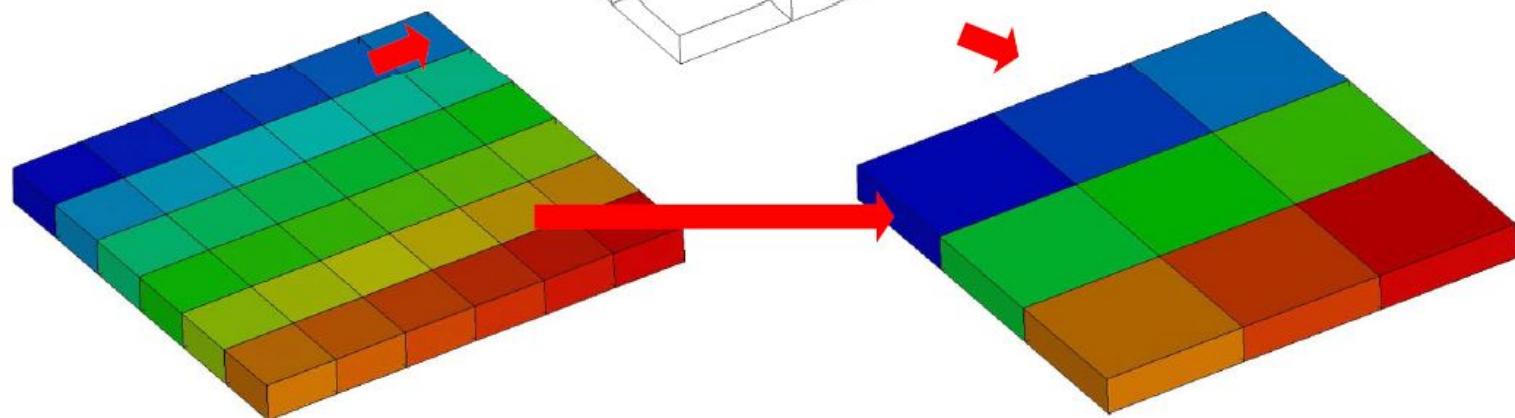
$\approx 10^5\text{-}10^6$  ячеек

- Ремасштабирование модели (Апскейлинг)

Укрупнение сетки  
(Апгрidding)



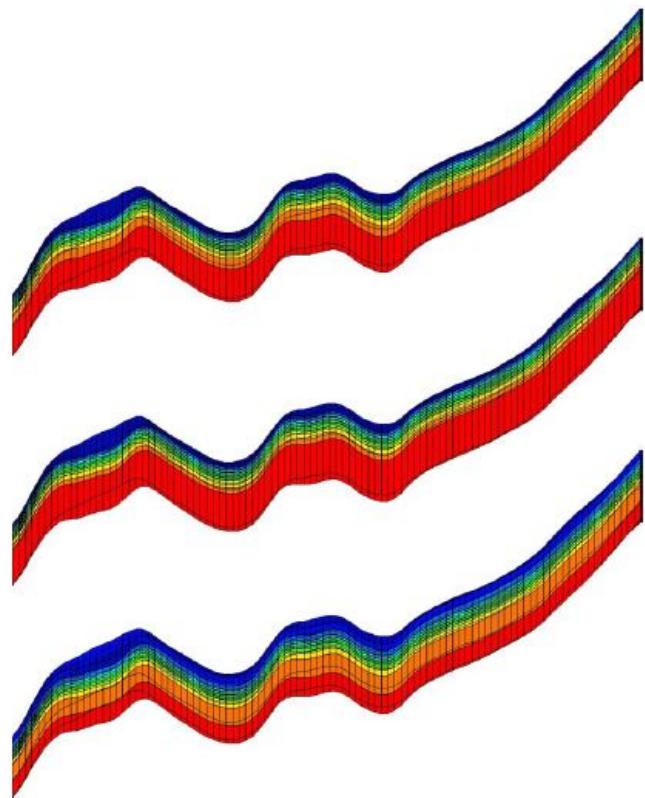
Перенос свойств  
(Апскейлинг)



- Апгридинг
  - процесс укрупнения мелкоячеистой сетки путем объединения ее слоев (со схожими параметрами) в крупные



- Методы апгрiddingа
  - на основе изменчивости петрофизического свойства (variability-based)
  - на основе потока (flow-based, Durlofsky)
  - на основе коэффициента охвата



- Апскейлинг пористости
  - среднее взвешенное по объему

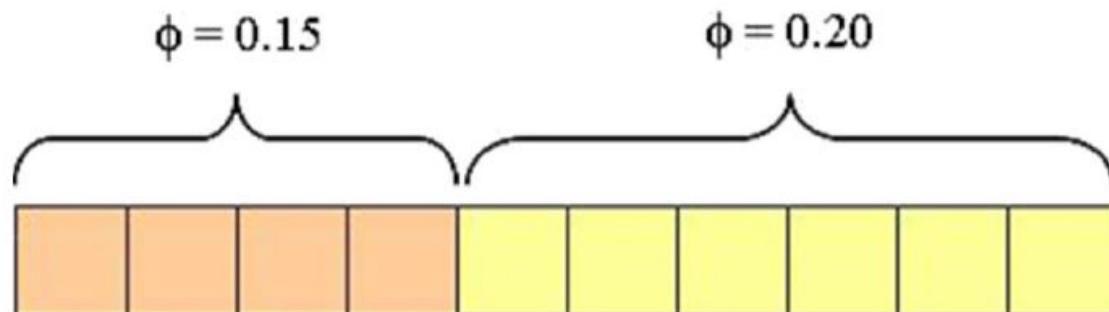
Общий поровый объем

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

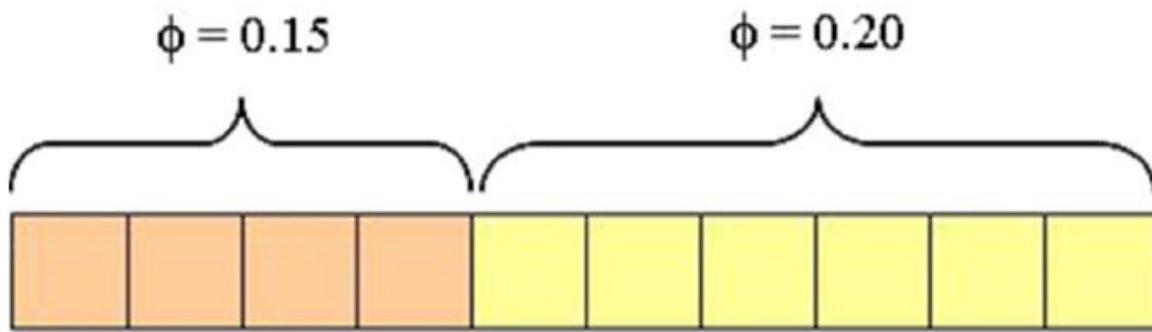


Общий объем

- Апскейлинг пористости
  - Пример



- Апскейлинг пористости
  - Пример

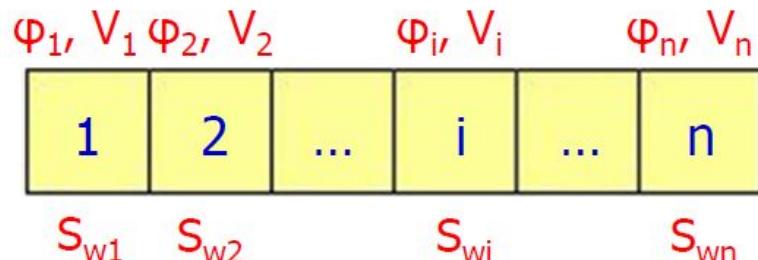


$$\bar{\phi} = \frac{4 \cdot 0.15 + 6 \cdot 0.20}{10} = 0.18$$

- Апскейлинг насыщенности
  - среднее взвешенное по поровому объему

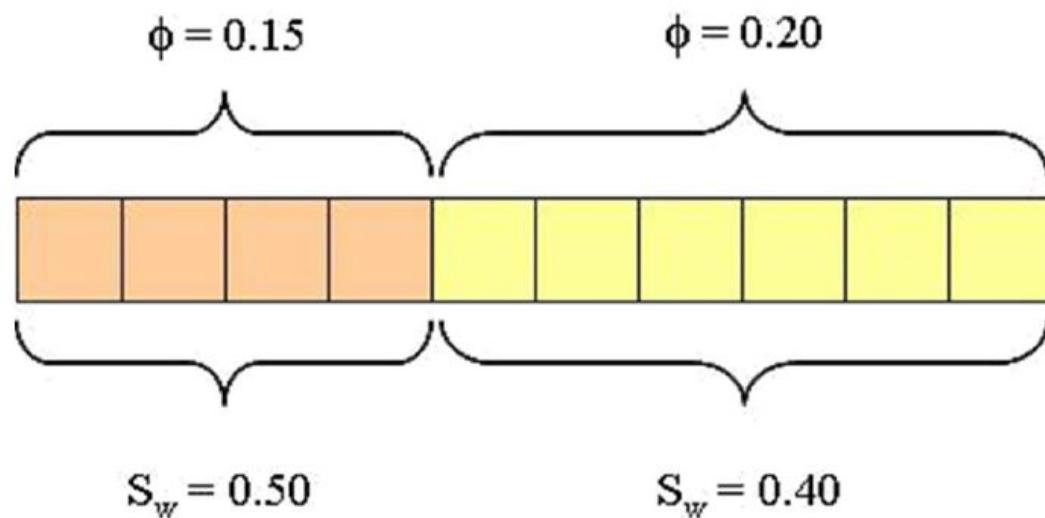
Общий объем воды

$$\overline{S_w} = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot V_i \cdot S_{wi})}{\sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot V_i)}$$



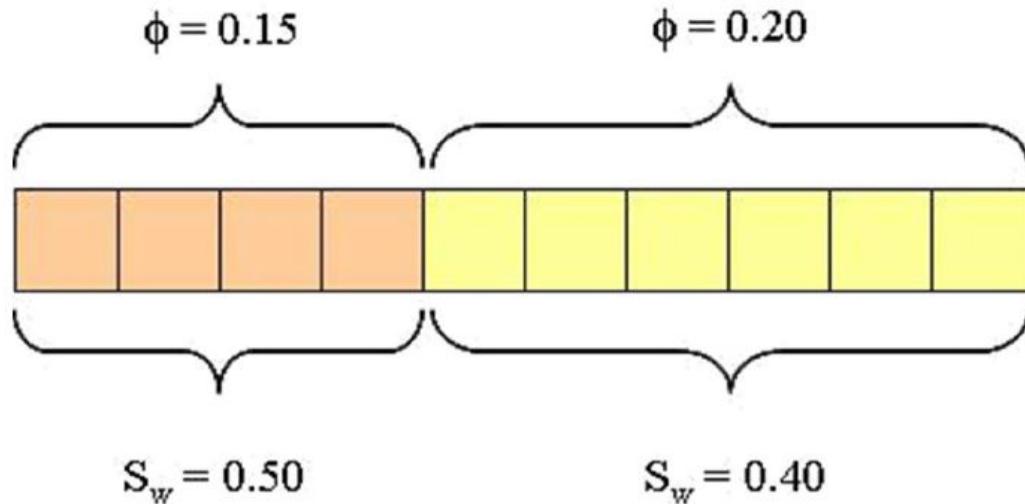
Общий поровый объем

- Апскейлинг насыщенности
  - Пример



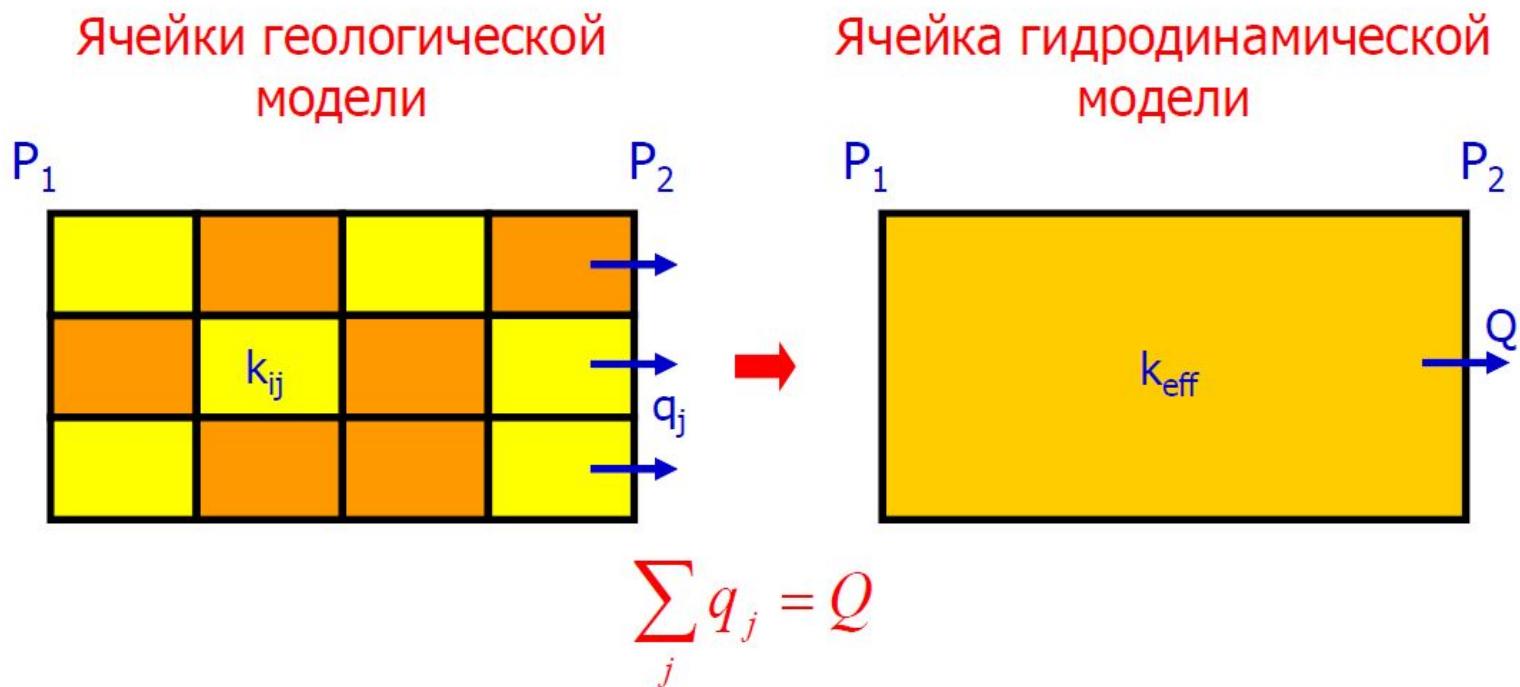
- Апскейлинг насыщенности

- Пример



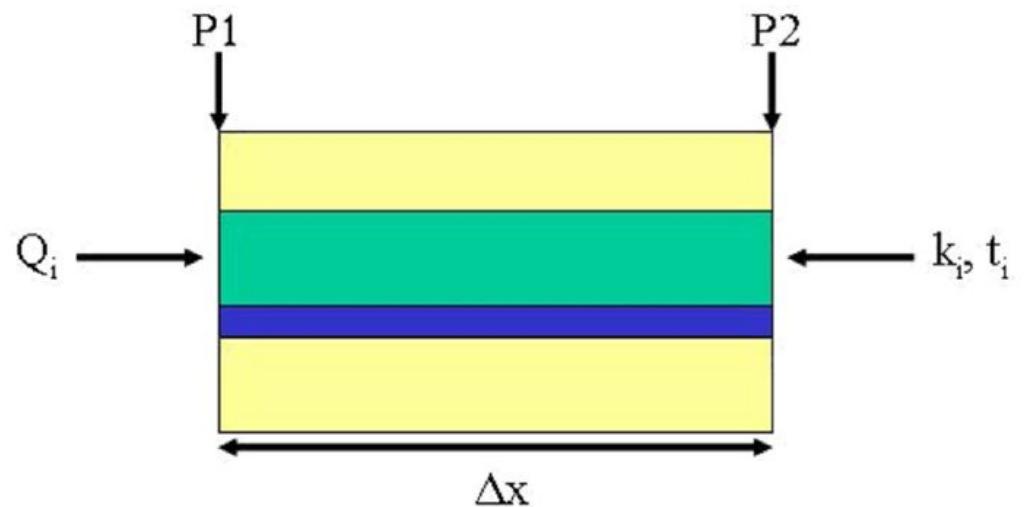
$$\overline{S_w} = \frac{4 \cdot 0.15 \cdot 0.5 + 6 \cdot 0.20 \cdot 0.4}{4 \cdot 0.15 + 6 \cdot 0.20} = \frac{0.30 + 0.48}{1.8} \approx 0.43$$

- Апскейлинг проницаемости
  - Эффективная проницаемость,  $k_{\text{eff}}$



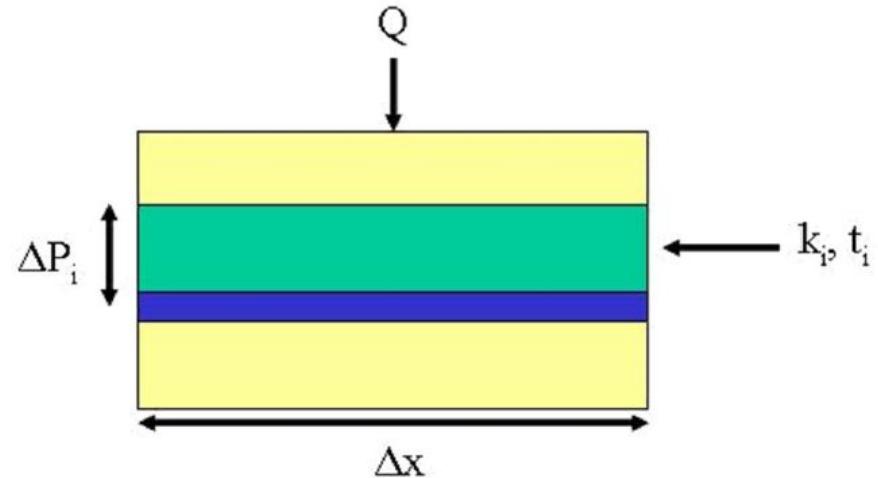
- Поток параллельный напластованию
  - арифметическое среднее взвешенное на толщину,  $k_a$

$$k_{eff} = k_a = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i \cdot k_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$



- Поток перпендикулярный напластованию
  - гармоническое среднее взвешенное на толщину,  $k_h$

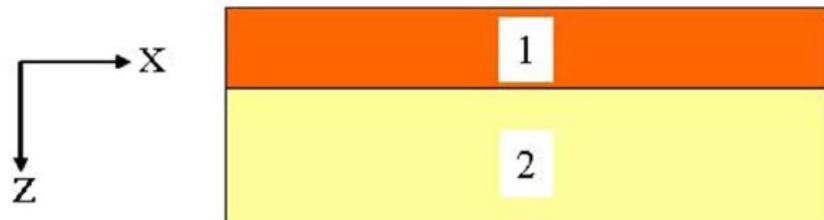
$$k_{eff} = k_h = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{k_i}}$$



- Поток вдоль и поперек напластования
- Example



- Поток вдоль и поперек напластования
- Example



$$t_1 = 3 \text{ mm}, k_1 = 10 \text{ mD}$$

$$t_2 = 5 \text{ mm}, k_2 = 100 \text{ mD}$$

$$k_v = k_{harm} = \frac{\frac{3+5}{3}}{\frac{3}{10} + \frac{5}{100}} = \frac{\frac{8}{35}}{\frac{100}{100}} \quad k_v/k_h ?$$



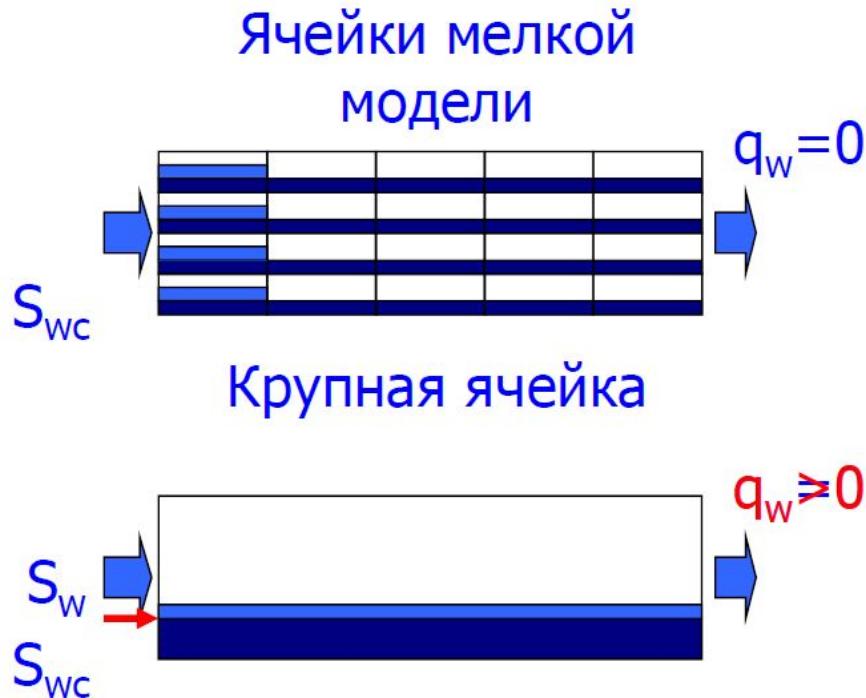
$$\frac{k_v}{k_h} = \frac{22.86}{66.25} \approx 0.35$$

$$k_h = k_{arith} = \frac{3 \cdot 10 + 5 \cdot 100}{3 + 5} = \frac{530}{8} = 66.25$$

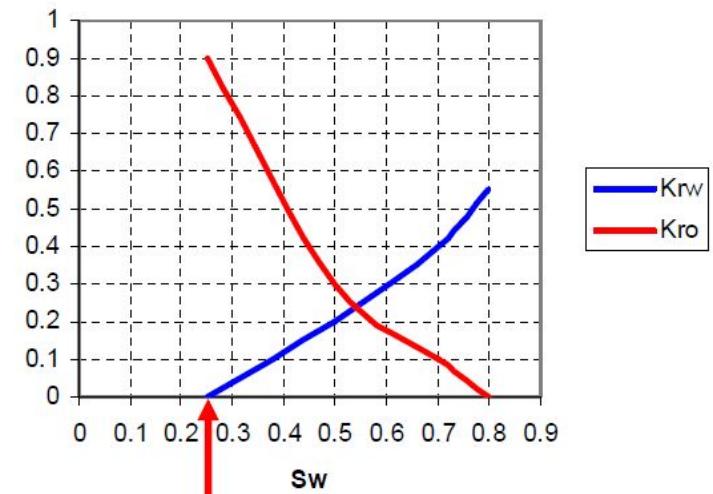
# Двухфазный апскейлинг

- Численная дисперсия

## Шаг

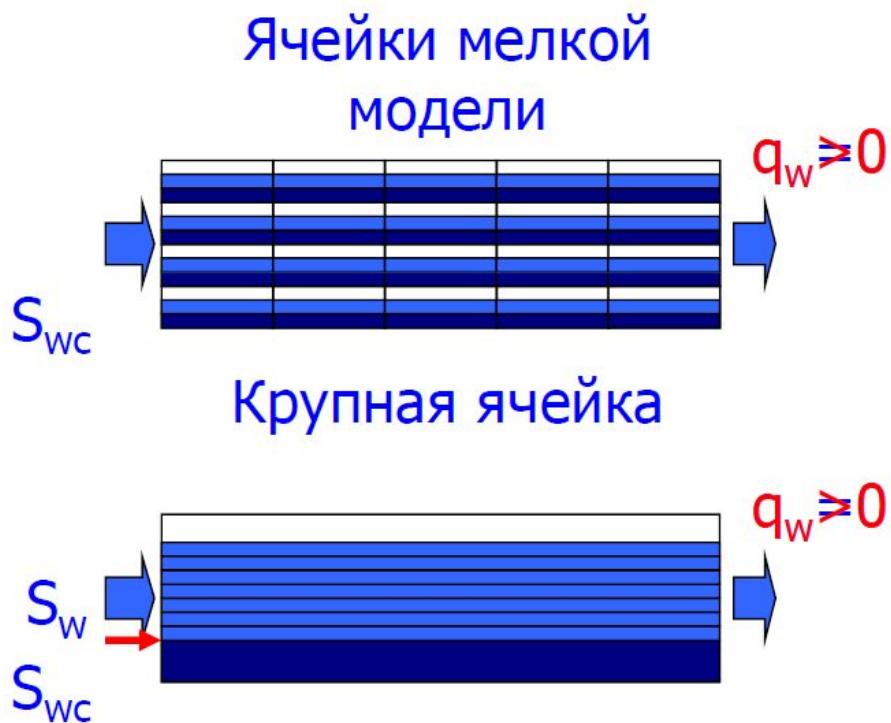


ОФП (керн)

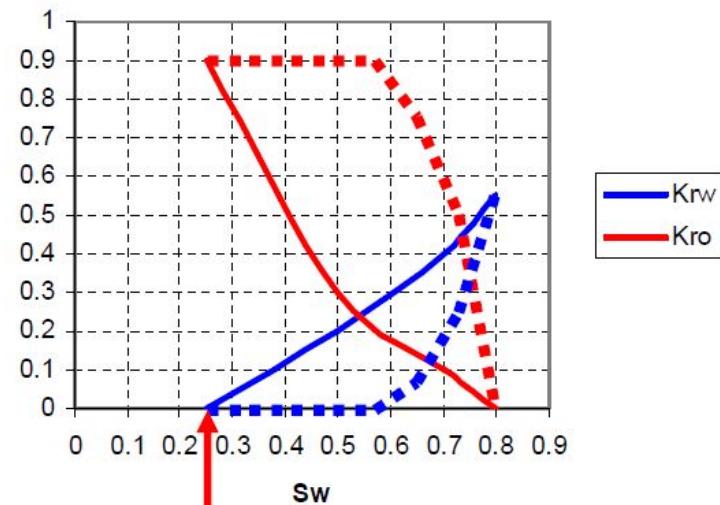


- Двухфазный апскейлинг

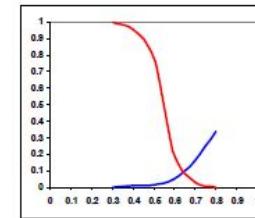
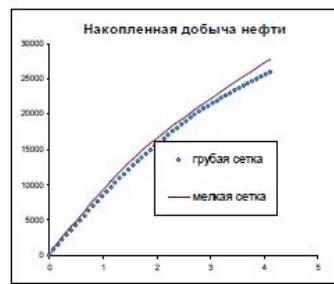
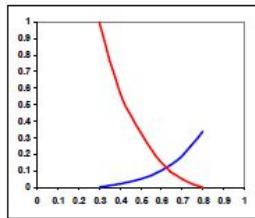
### 0 Шаг



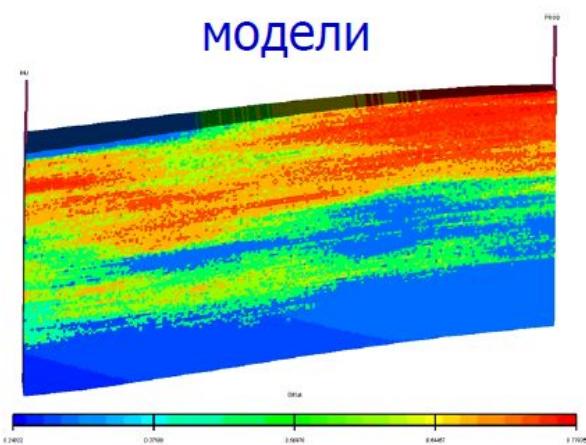
### Псевдо ОФП



- Двухфазный апскейлинг



Участок мелкоячеистой модели



Участок крупноячеистой модели

