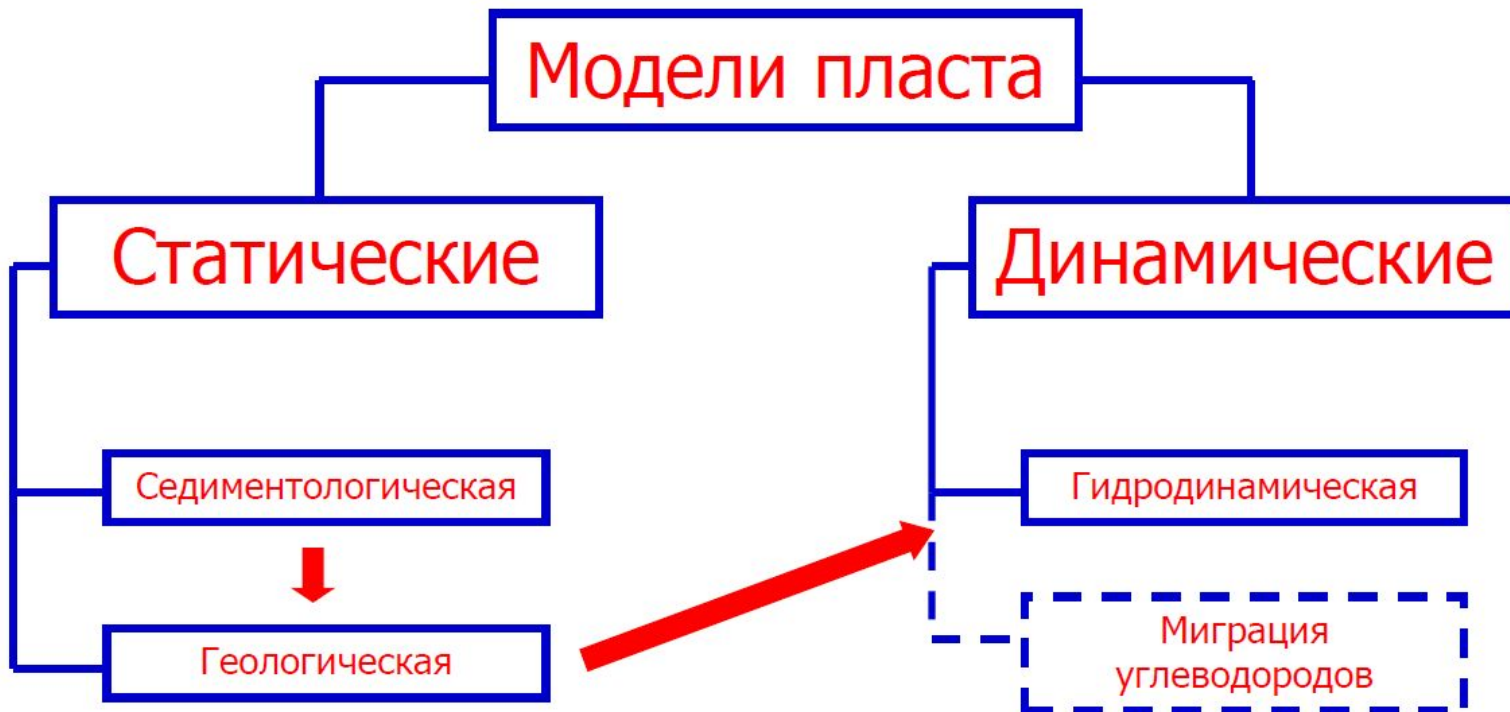


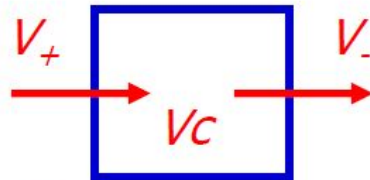
Гидродинамическое моделирование



- Гидродинамическое моделирование

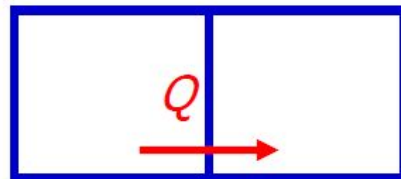
- численное решение систем уравнений полученных на основе

- Материального баланса



$$V_- = V_+ - V_c$$

- Закона Дарси



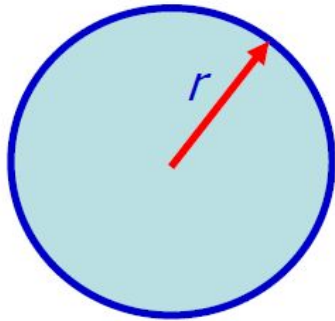
$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Математические модели

Аналитические

Решение в виде формулы

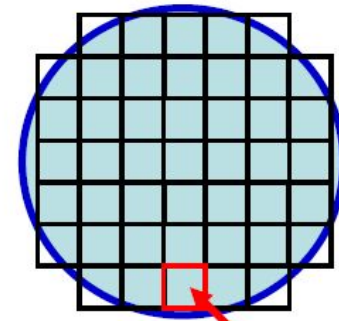
ТОЧНОСТЬ



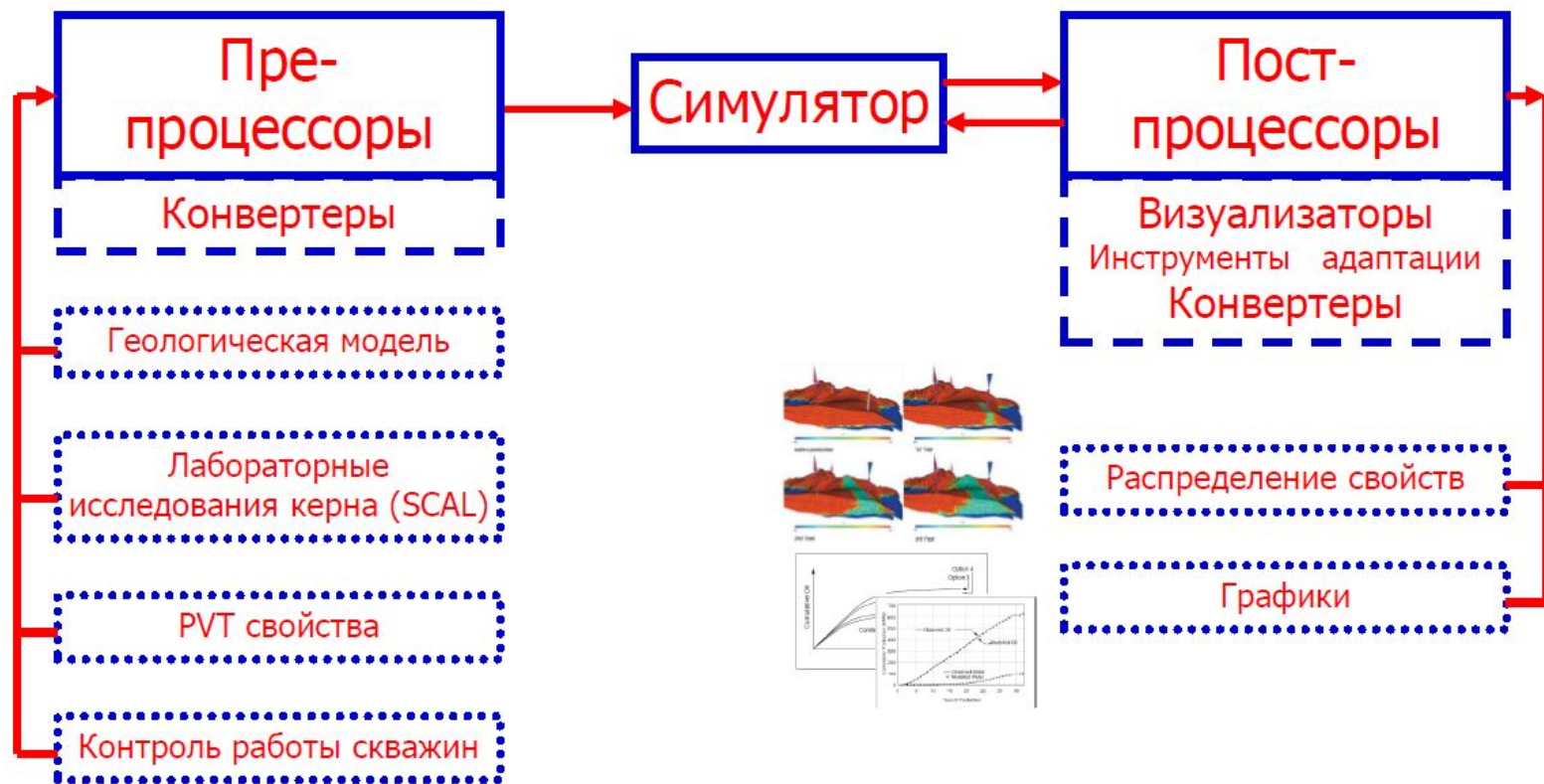
$$S = \pi \cdot r^2$$

Численные

Решение систем уравнений



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



Гидродинамические модели

Модели флюидов

Модель нелетучей нефти

Композиционная модель

Химические модели

Тепломассоперенос

Изотермическая модель

Тепловая модель

Фильтрационная среда

Одинарная пористость

Двойная пористость

Двойная проницаемость

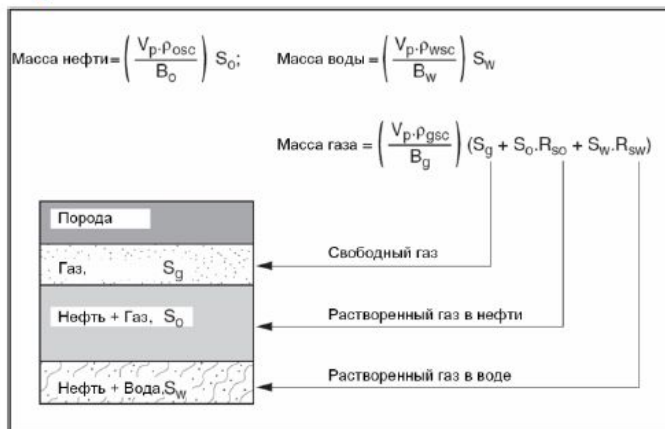
Схема расчета

Конечно-разностное моделирование

Моделирование на основе линий тока

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

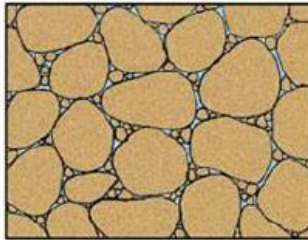
Тепловая модель (Thermal)

- 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

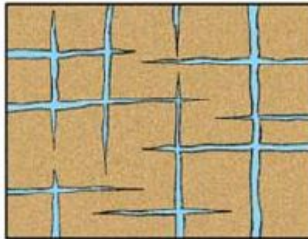
– Первичная пористость

- образуется в процессе осадконакопления и формирования породы



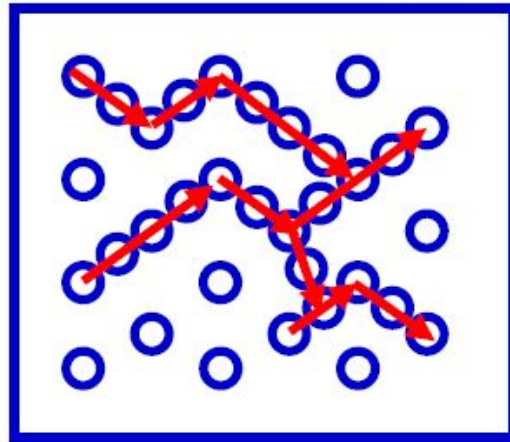
– Вторичная пористость

- образуется в результате постседиментационных процессов



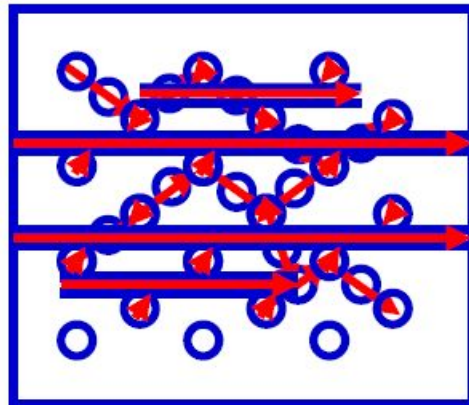
Модель одинарной пористости (Single Porosity)

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



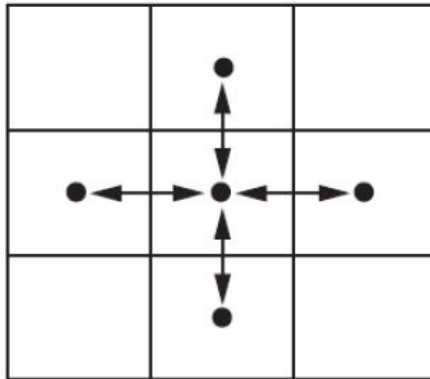
Модель двойной проницаемости (Double Permeability)

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

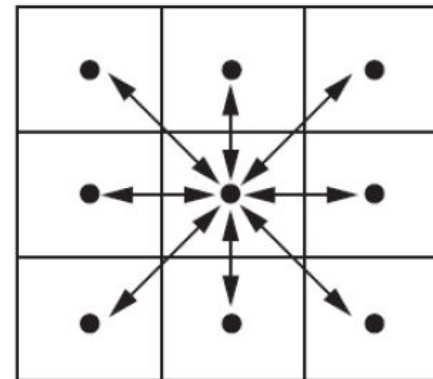


- **Конечно-разностное моделирование (Conventional, Finite Difference simulation)**
 - движение флюида осуществляется через грани ячеек

5 точечная схема

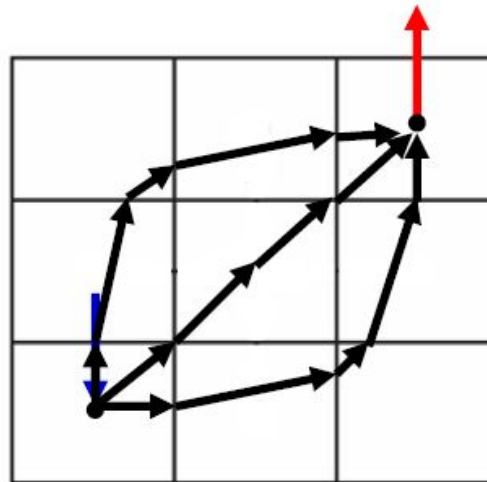


9 точечная схема



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	DIMENS
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

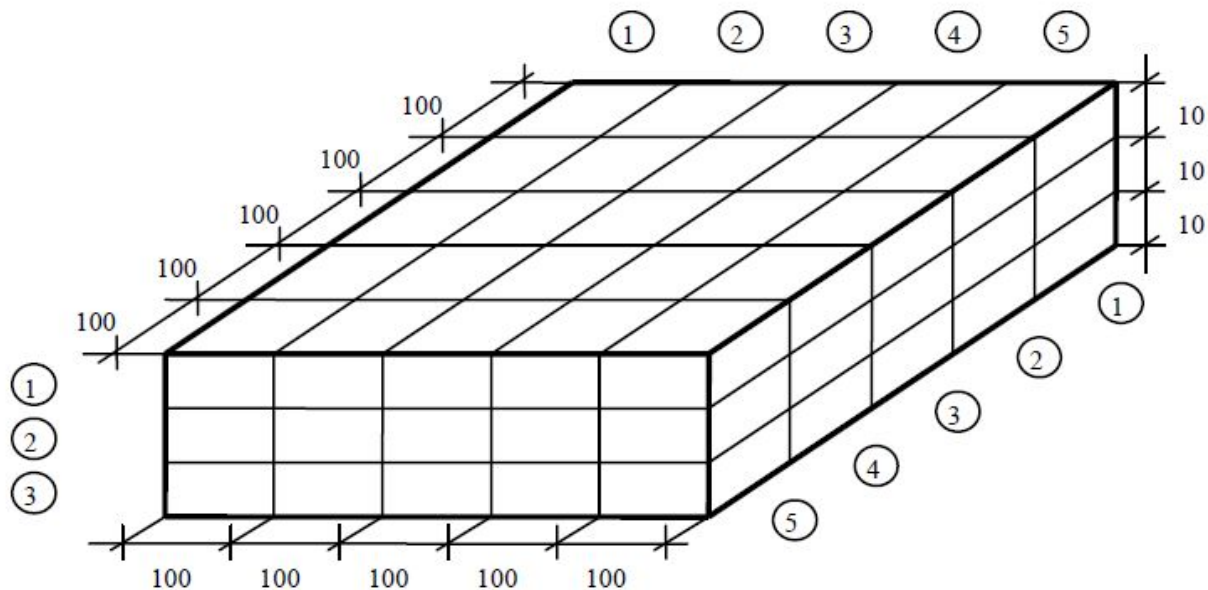
режимы работы скважин

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

- **RUNSPEC** общие данные

- блочно-центрированная структурная сетка

- 5 x 5 x 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
```

```
1st 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

SCHEDULE режимы работы скважин

GRID структурная сетка и петрофизические свойства

– структурная сетка

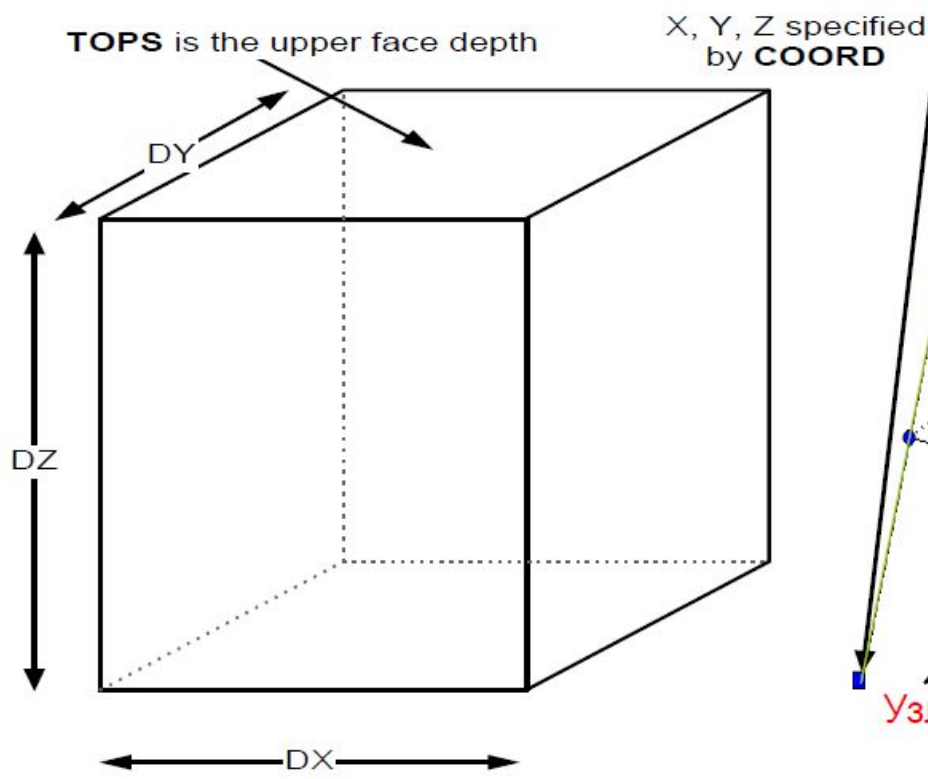
- размеры ячеек
- глубины верхних граней ячеек

– петрофизические свойства ячеек

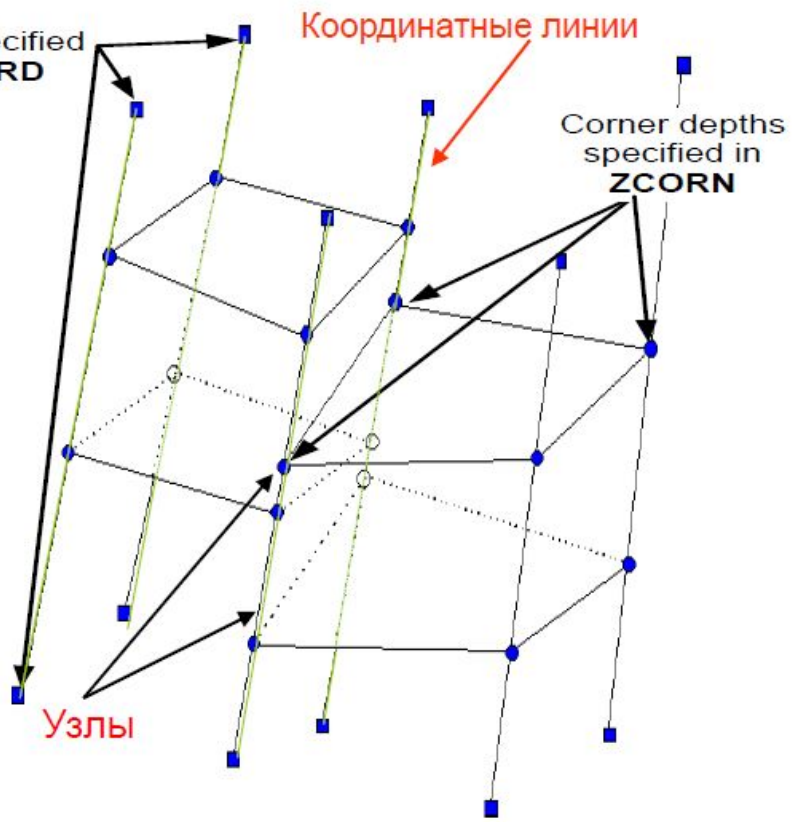
- пористость
- проницаемость в разных направлениях
- песчаность

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
 $DX = 100 \text{ м}$ $DY = 100 \text{ м}$ $DZ = 10 \text{ м}$
- 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

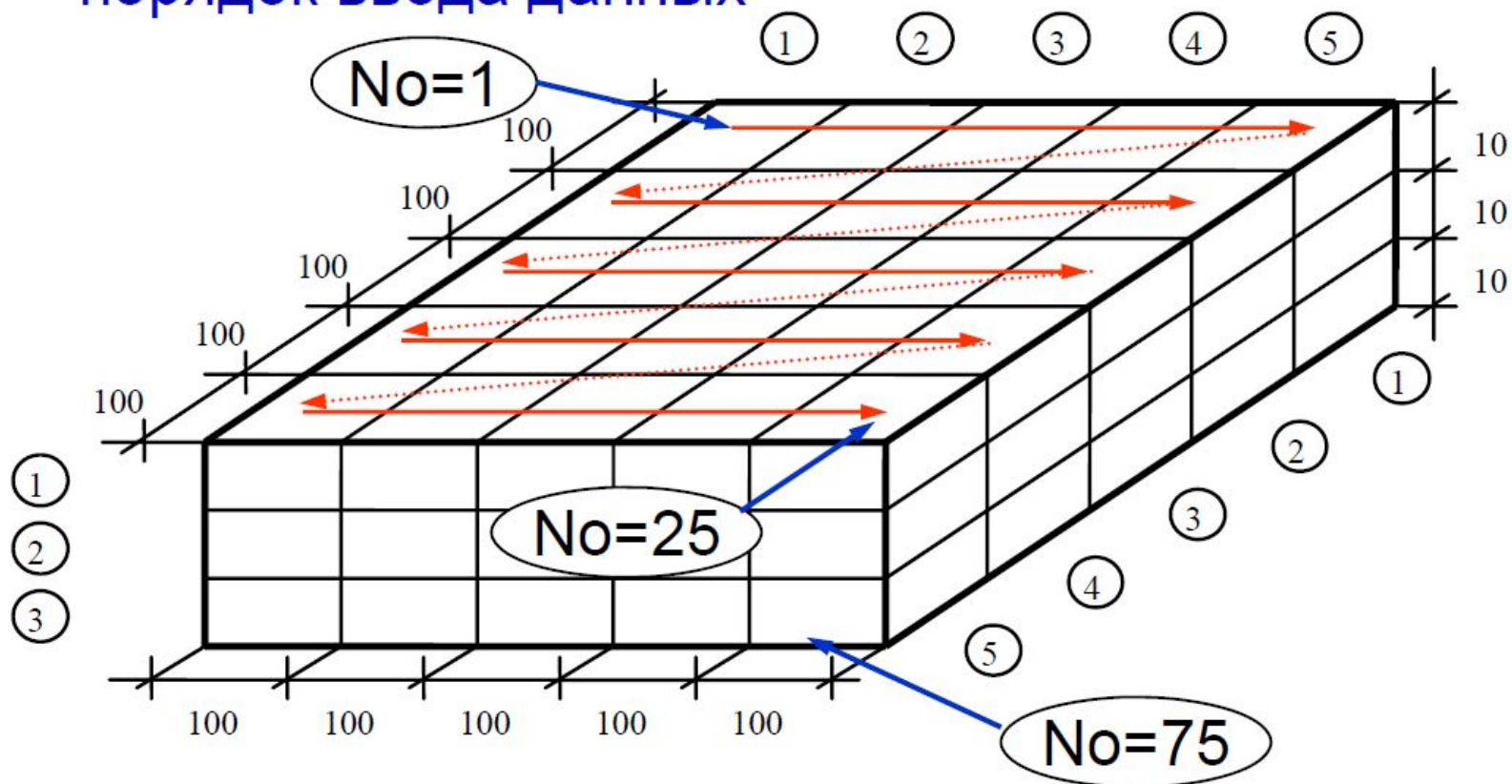
GRID структурная сетка и петрофизические свойства

– 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

N*M – N значений по M

-- Размеры ячеек в направлении X, Y, Z

DX

75*100 /

DY

75*100 /

DZ

75*10 /

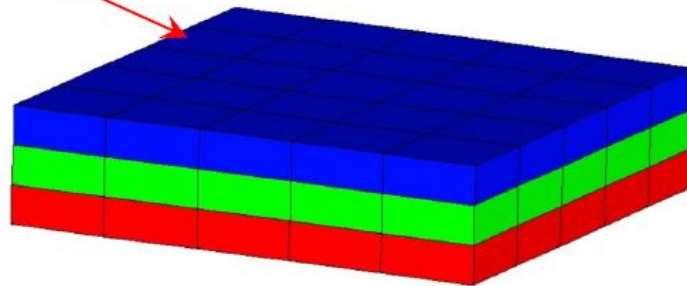
GRID структурная сетка и петрофизические свойства

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 $k_{rw}(S_w), k_{ro}(S_w), P_{cow}(S_w)$

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

-- Плотность флюидов			
--	Нефть	Вода	Газ
--	-----	----	---
DENSITY			
	800	1000	1
/			

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

-- Физические свойства нефти			
--	P	Bo	μ_o
--	----	----	----
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	μ_w
--	----	----	-----	----
PVTW				
	250	1.02	4e-05	0.8
/				

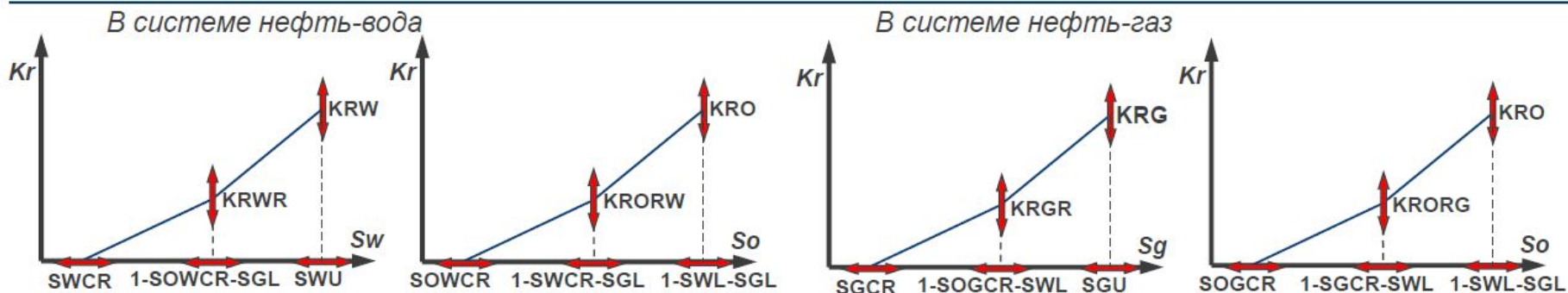
ROCK – сжимаемость породы $C_{rock}(P_{ref})$

-- Сжимаемость породы		
--	P	Cr
--	----	----
ROCK		
	250	4e-05
/		

SWOF – ОФП и капиллярная кривая $k_{rw}(S_w), k_{ro}(S_w), P_{cov}(S_w)$

-- ОФП нефти и воды, капиллярное давление

--	Sw	Krw	Kro	Pc
--	----	----	----	----
SWOF				
	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 водо-, нефте-, газонасыщенности

SWU, SGU – масштабирование максимальной водо-, газонасыщенности,

действует и на фазовую и на капиллярную

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

для трехточечного масштабирования в секции PROPS включить флаг:

SCALECRS
YES /

- 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

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

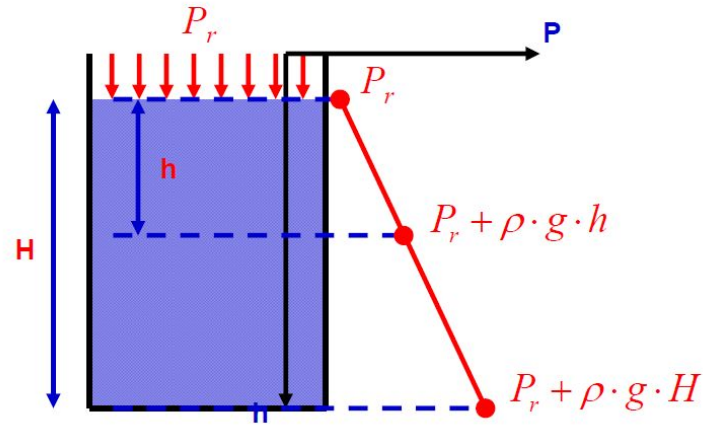
75*250 /

SWAT

75*0.2 /

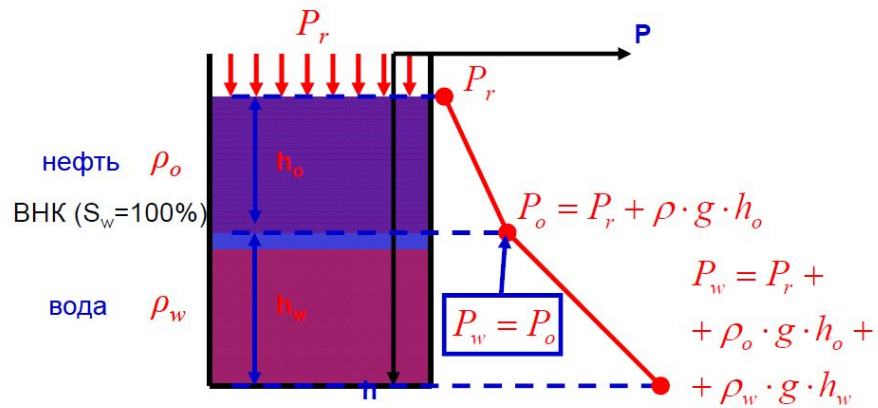
Гидростатическое давление

– давление столба жидкости в покое



Гидростатическое (гравитационное) равновесие

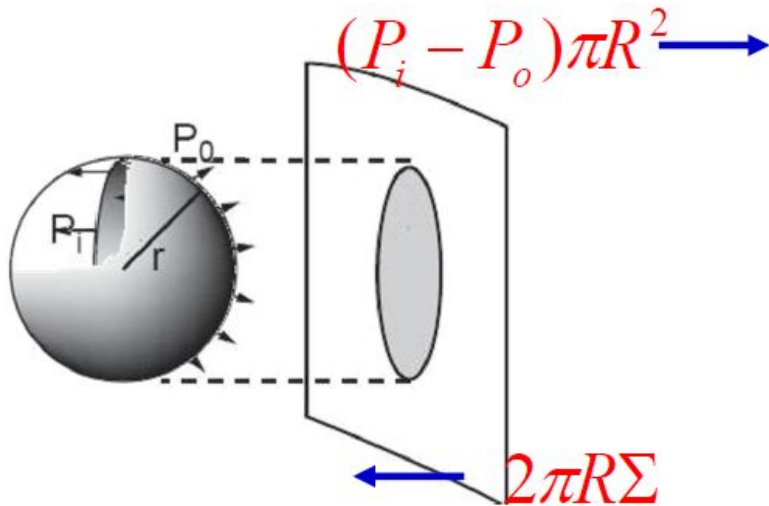
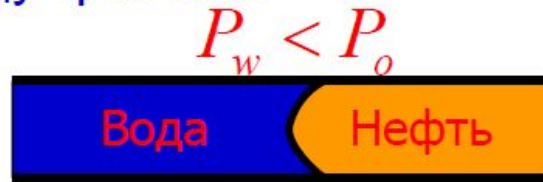
– многофазная система



Капиллярное давление

– давление на границе между фазами

$$P_c = P_o - P_w$$

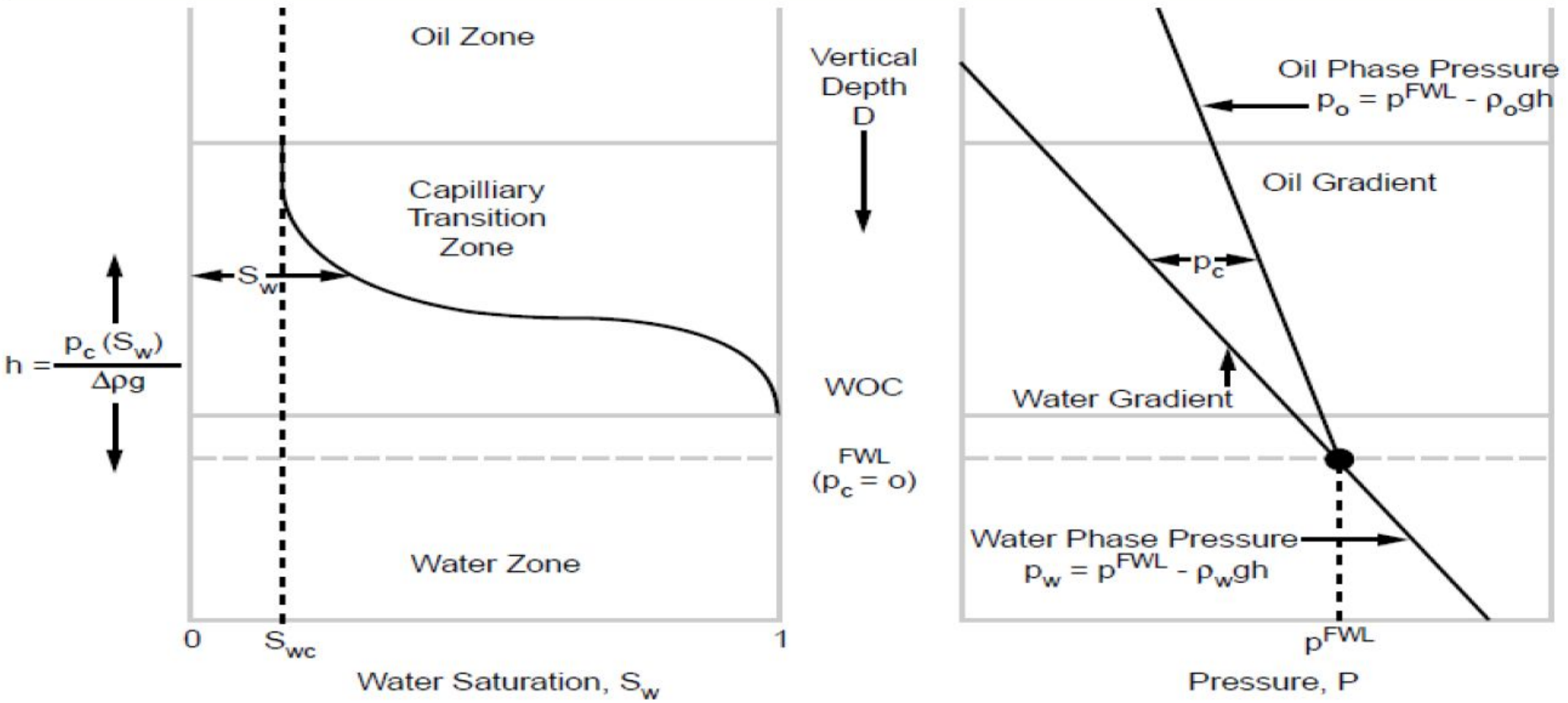


$$(P_i - P_o)\pi R^2 = 2\pi R\Sigma$$



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

Капиллярное давление



SOLUTION начальные условия

– капиллярно-гравитационное равновесие **EQUIL**

-- Капиллярно-гравитационное равновесное состояние

--	Глубина	P_i	ВНК	P_c
--	-----	---	-----	-----
EQUIL	2500	250	2600	0 /

- 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

SCHEDULE 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 м³/сут**
- приемистость скважины **I1** **1000 м³/сут**
- время прогноза **3** года (36 шагов по 30 дней)

SCHEDULE 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
--	сква	I	J	K1	K2			сква
--	----	-	-	--	--	-----		-----
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 нефти	Дебит воды	Дебит газа	Дебит жидк	Дебит пласт	Давл
--	сква	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
--	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
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								
--	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

WCONPROD

P2	OPEN	ORAT	4000	2000		3*		3000 /
----	------	------	------	------	--	----	--	--------

/

WCONINJE – режим работы нагнетательных скважин

-- Режим работы нагнетательных скважин

--	Имя	Флюид	Статус	Режим	Дебит пов	Дебит пласт	Давл
--	СКВ						
--	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

WCONINJE

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

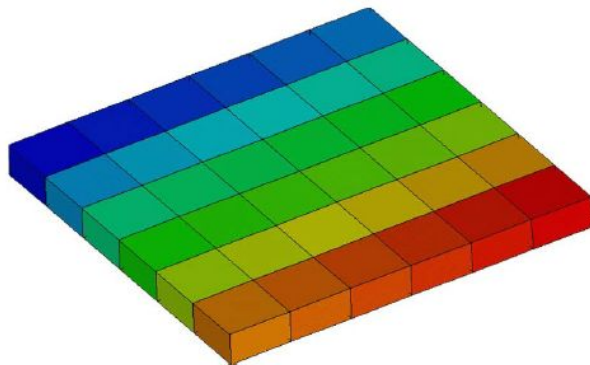
/

Ремасштабирование модели (Апскейлинг)

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

- Ремасштабирование модели (Апскейлинг)
 - переход от геологической (мелкоячейистой) модели к адекватной ей гидродинамической (крупноячейистой) модели

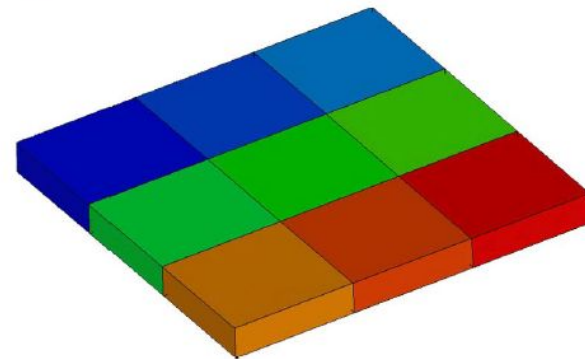
Геологическая модель



$\approx 10^6 - 10^7$ ячеек

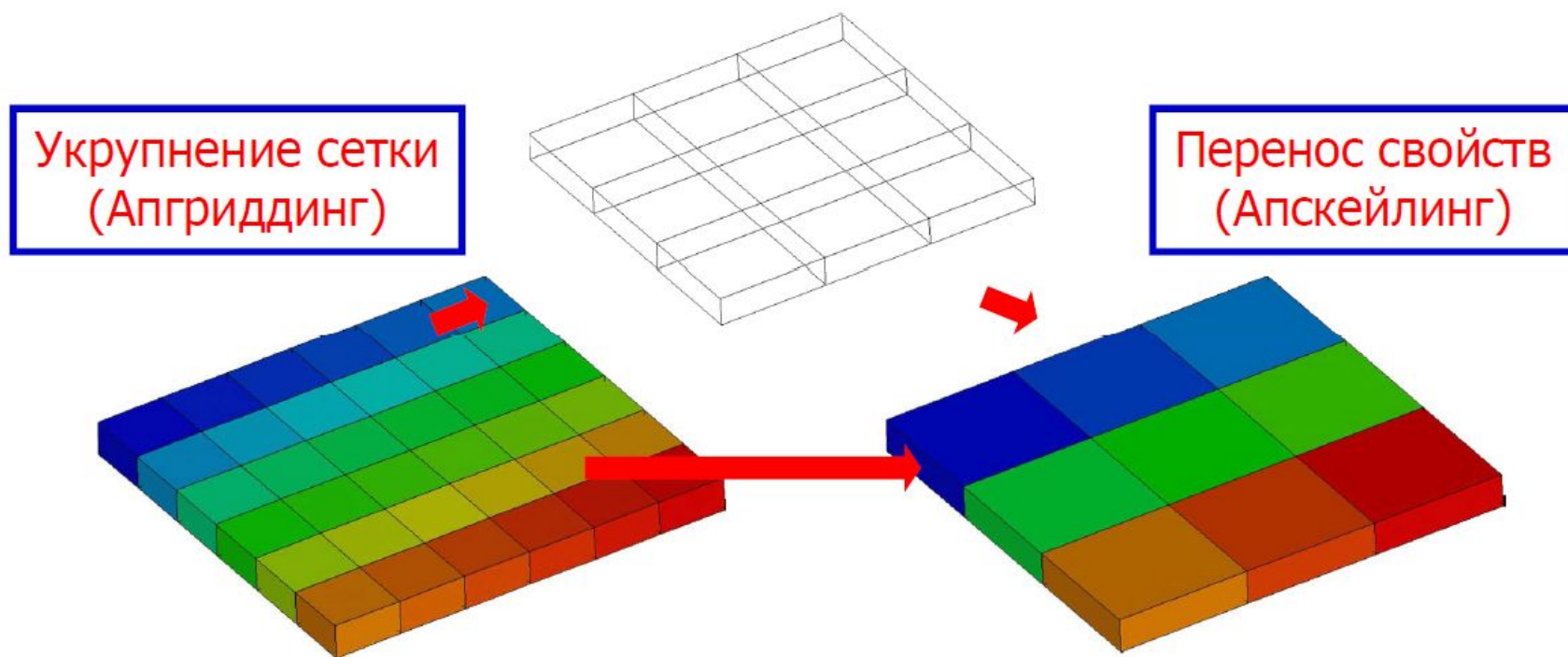


Гидродинамическая модель



$\approx 10^5 - 10^6$ ячеек

- Ремасштабирование модели (Апскейлинг)



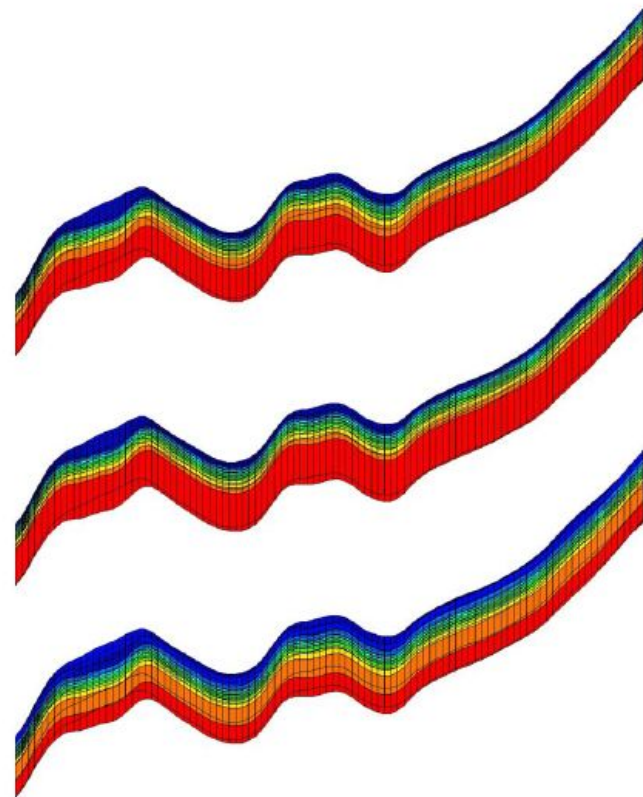
- **Апгриддинг**

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



- **Методы апгриддинга**

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



- Апскейлинг пористости
 - среднее взвешенное по объему

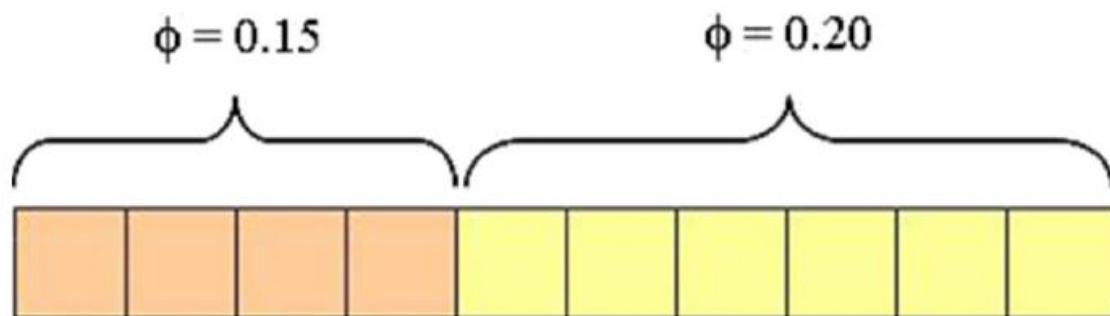
Общий поровый объем

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

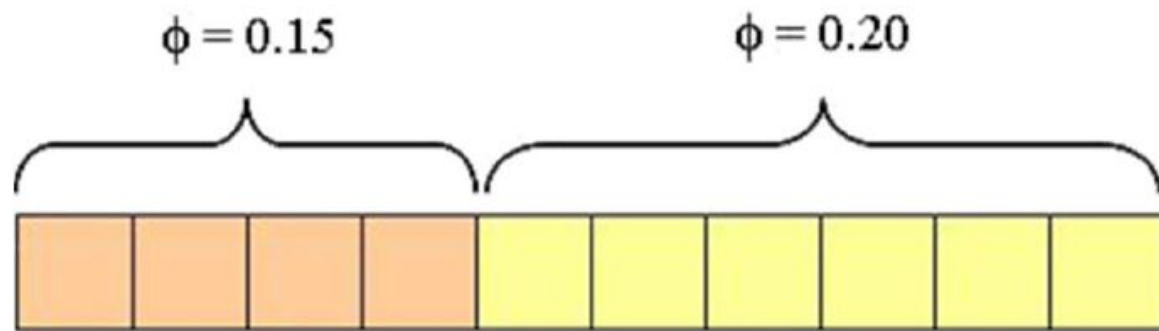
Общий объем

ϕ_1, V_1	ϕ_2, V_2		ϕ_i, V_i		ϕ_n, V_n
1	2	...	i	...	n

- Апскейлинг пористости
 - Пример



- Апскейлинг пористости
 - Пример



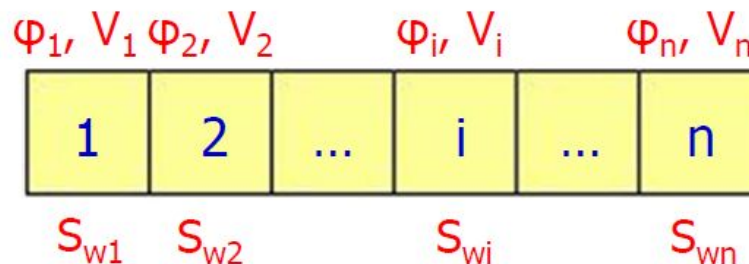
$$\bar{\phi} = \frac{4 \cdot 0.15 + 6 \cdot 0.20}{10} = 0.18$$

- **Апскейлинг насыщенности**
 - среднее взвешенное по поровому объему

Общий объем воды

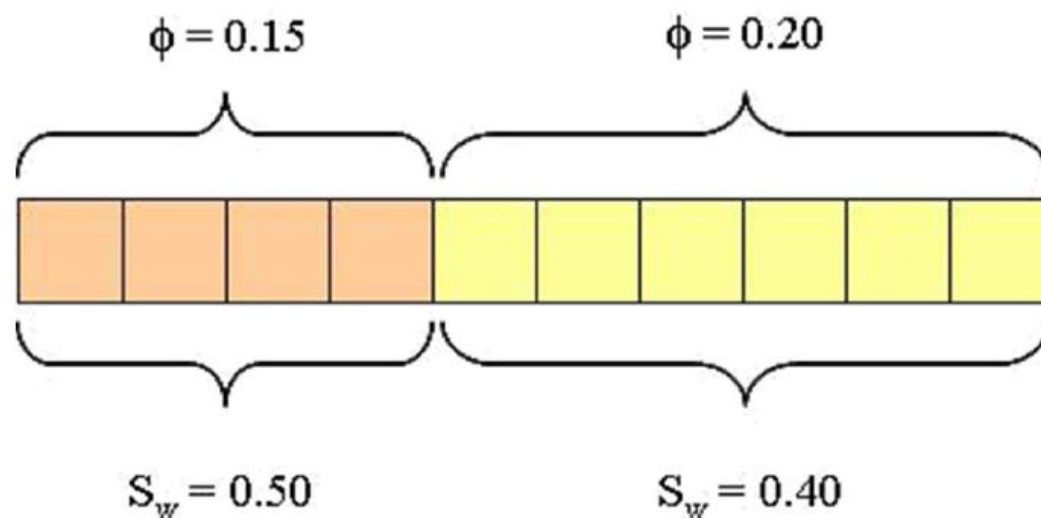
$$\bar{S}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot V_i \cdot S_{wi})}{\sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot V_i)}$$

Общий поровый объем



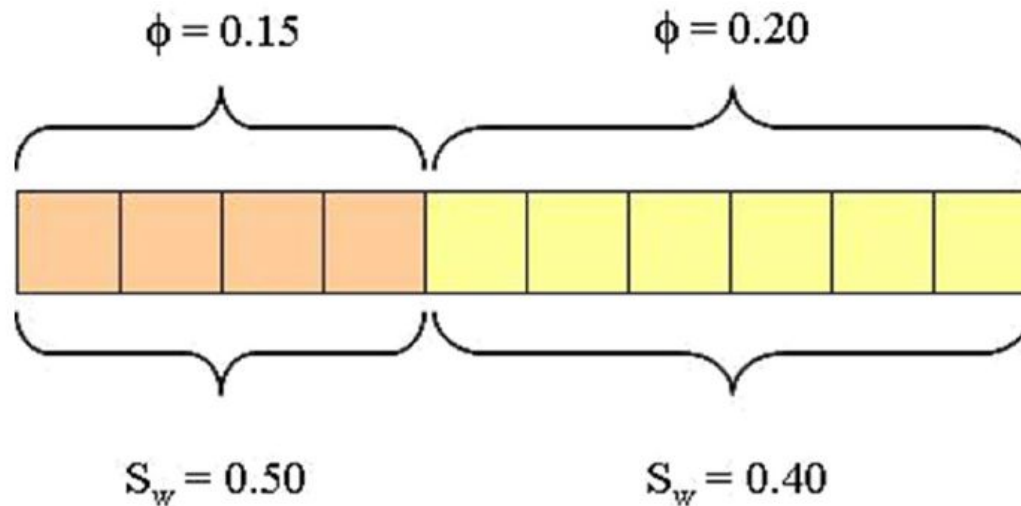
- Апскейлинг насыщенности

- Пример



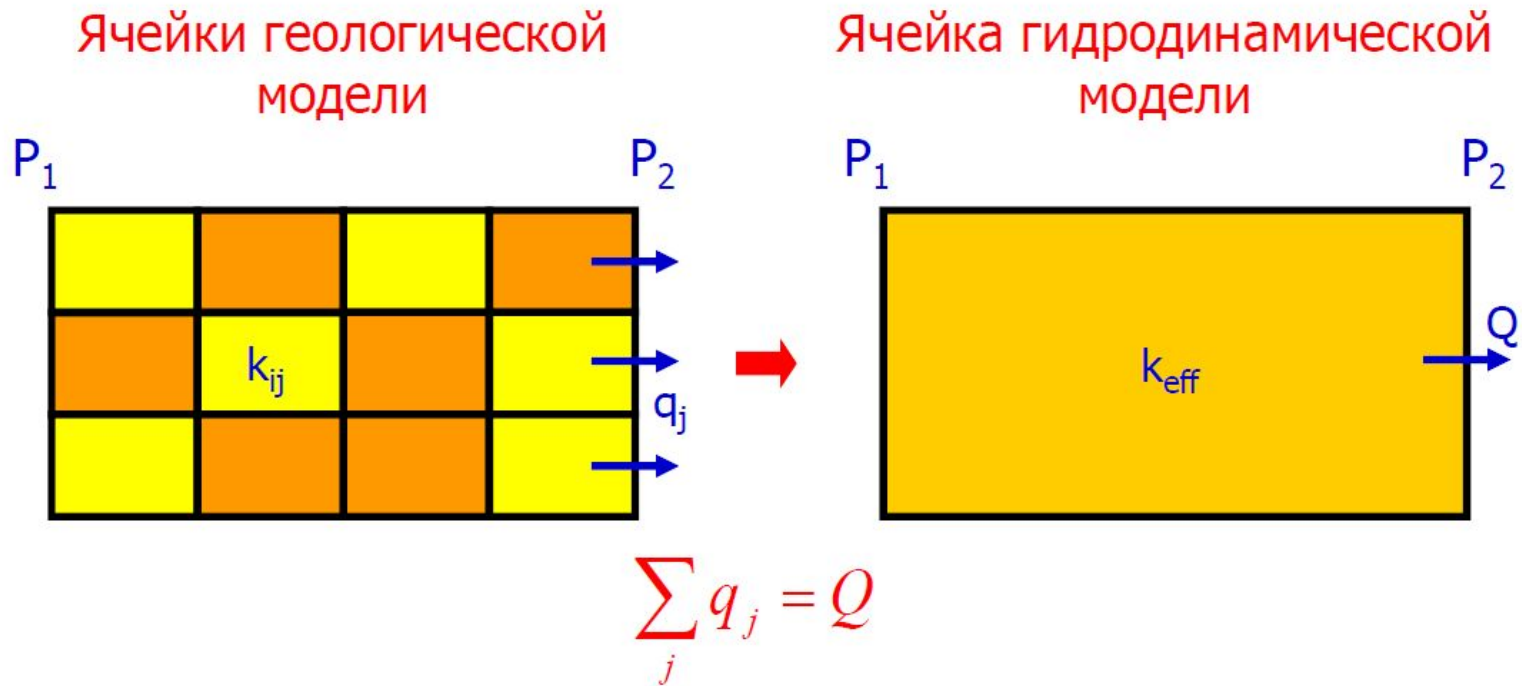
- Апскейлинг насыщенности

- Пример



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

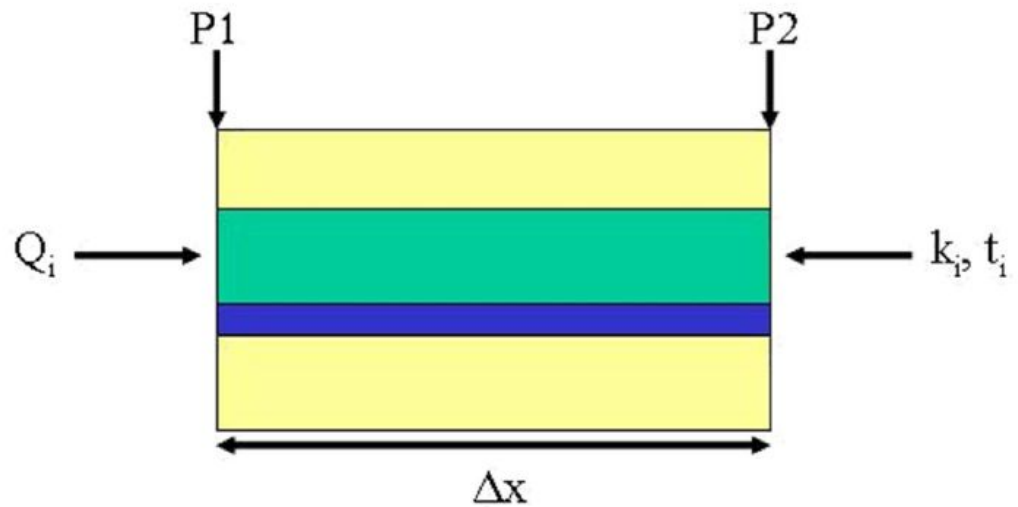
- Апскейлинг проницаемости
 - Эффективная проницаемость, k_{eff}



- Поток параллельный напластованию

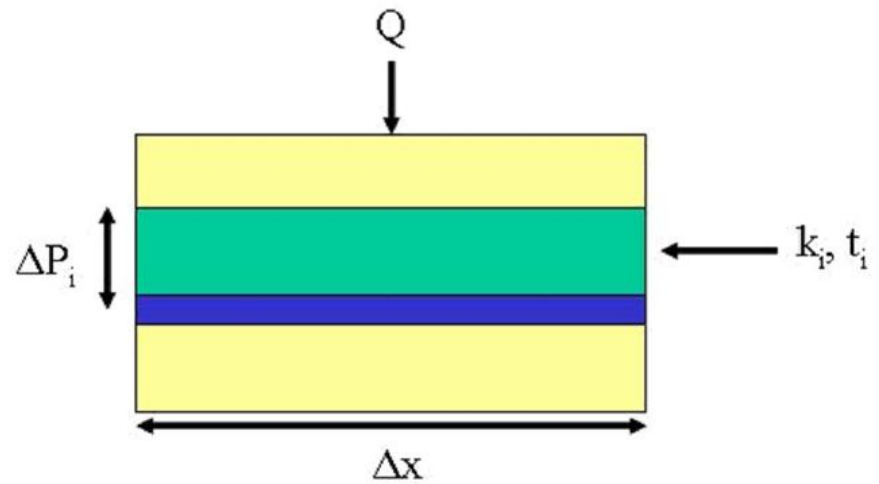
- арифметическое среднее взвешенное на толщину, k_a

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



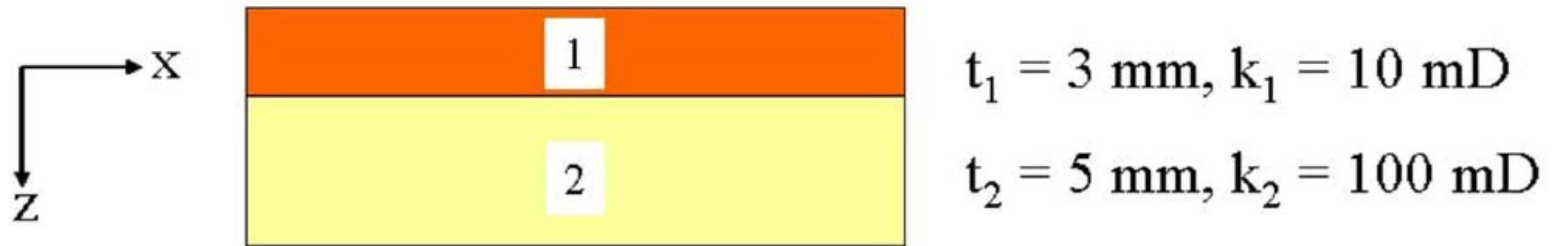
- Поток перпендикулярный напластованию
 - гармоническое среднее взвешенное на толщину, k_h

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



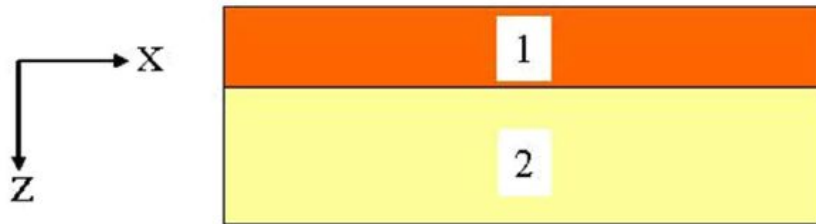
- Поток вдоль и поперек напластования

- Example



- Поток вдоль и поперек напластования

- Example



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

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

$$k_v = k_{harm} = \frac{3+5}{\frac{3}{10} + \frac{5}{100}} = \frac{8}{\frac{35}{100}} \approx 22.86$$

$k_v/k_h ?$



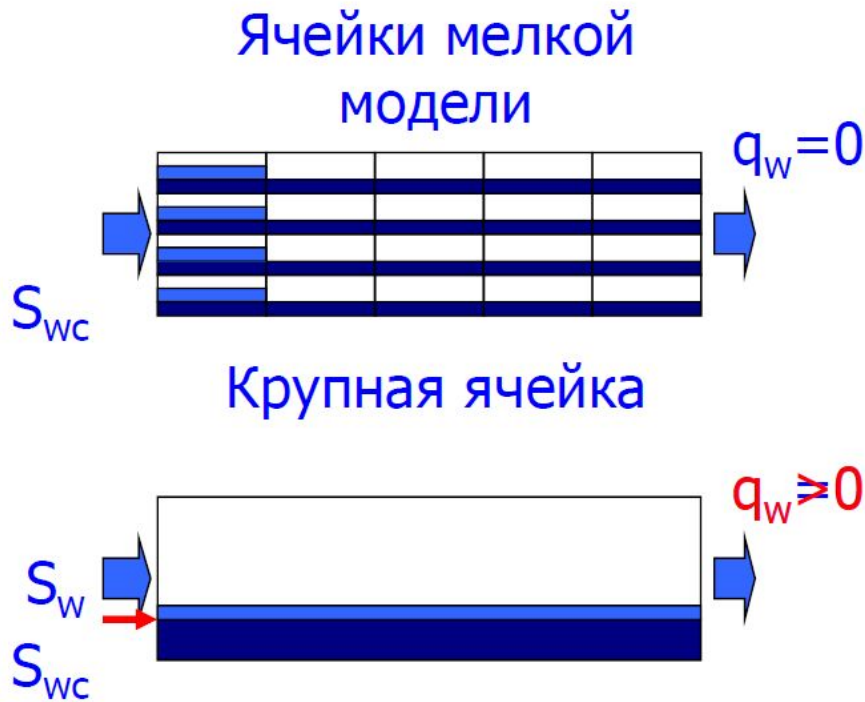
$$\frac{k_v}{k_h} = \frac{22.86}{66.25} \approx 0.35$$

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

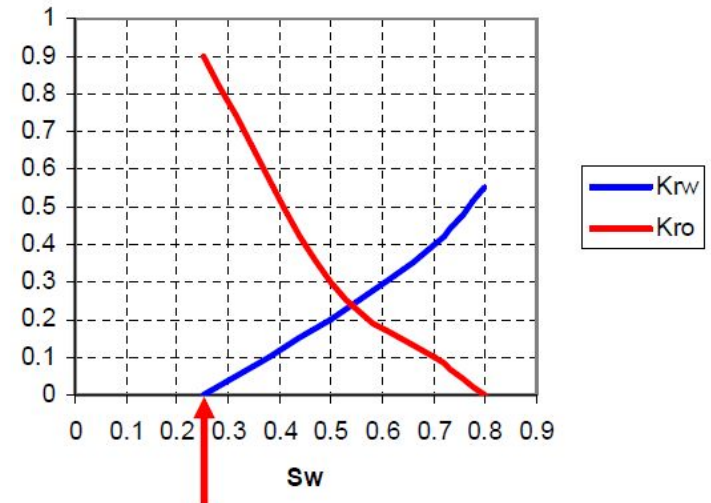
Двухфазный апскейлинг

- Численная дисперсия

Шаг



ОФП (керна)



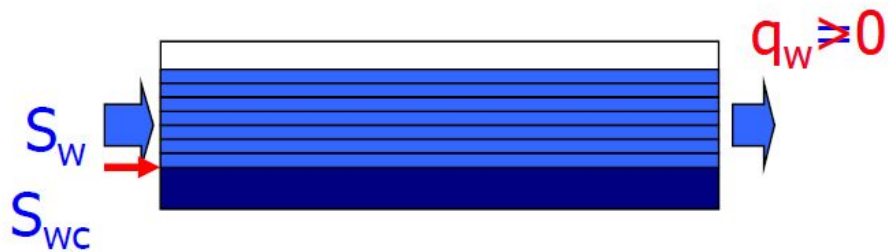
- Двухфазный апскейлинг

Шаг

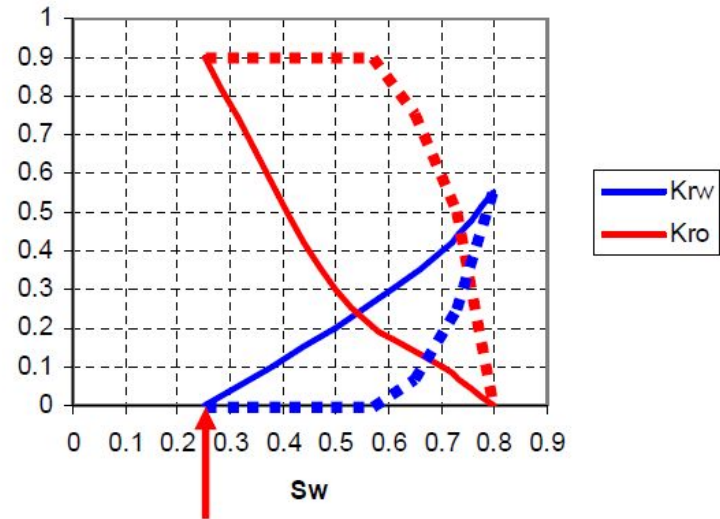
Ячейки мелкой модели



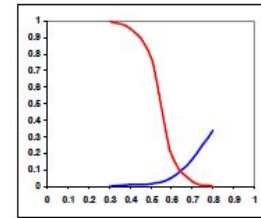
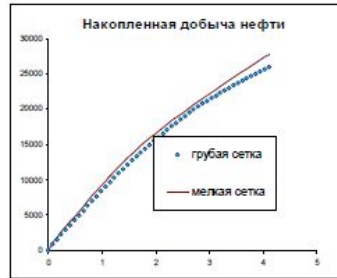
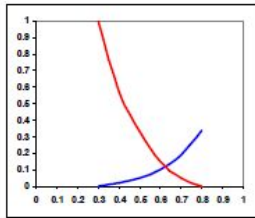
Крупная ячейка



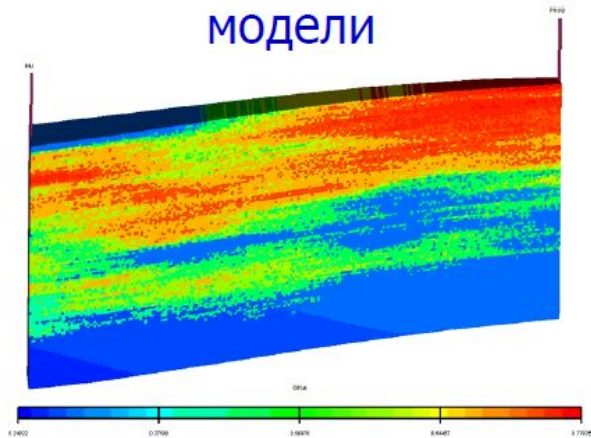
Псевдо ОФП



- Двухфазный апскейлинг



Участок мелкоячейистой модели



Участок крупноячейистой модели

