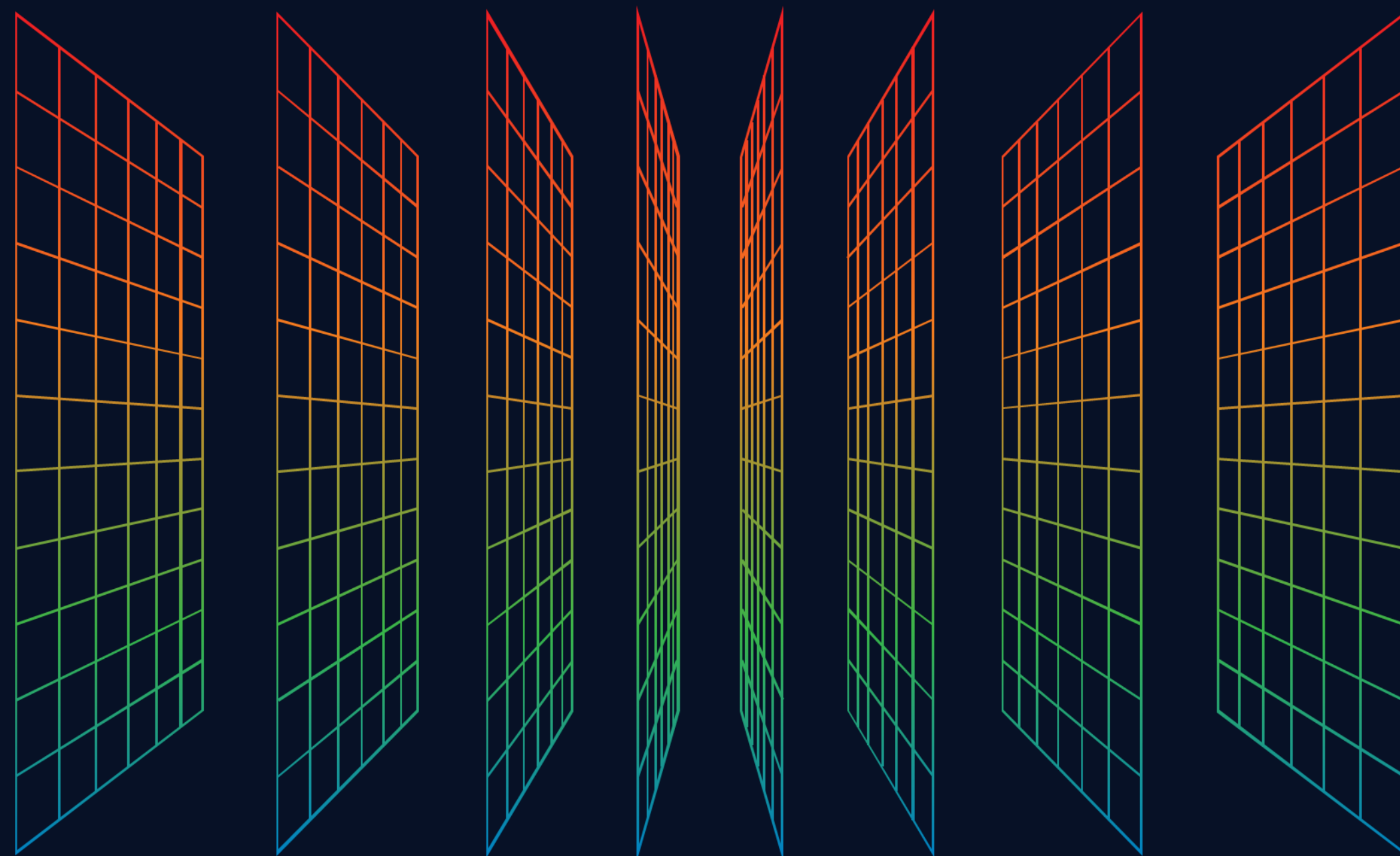


# Относительные фазовые проницаемости



Вебинар 01.12.2022



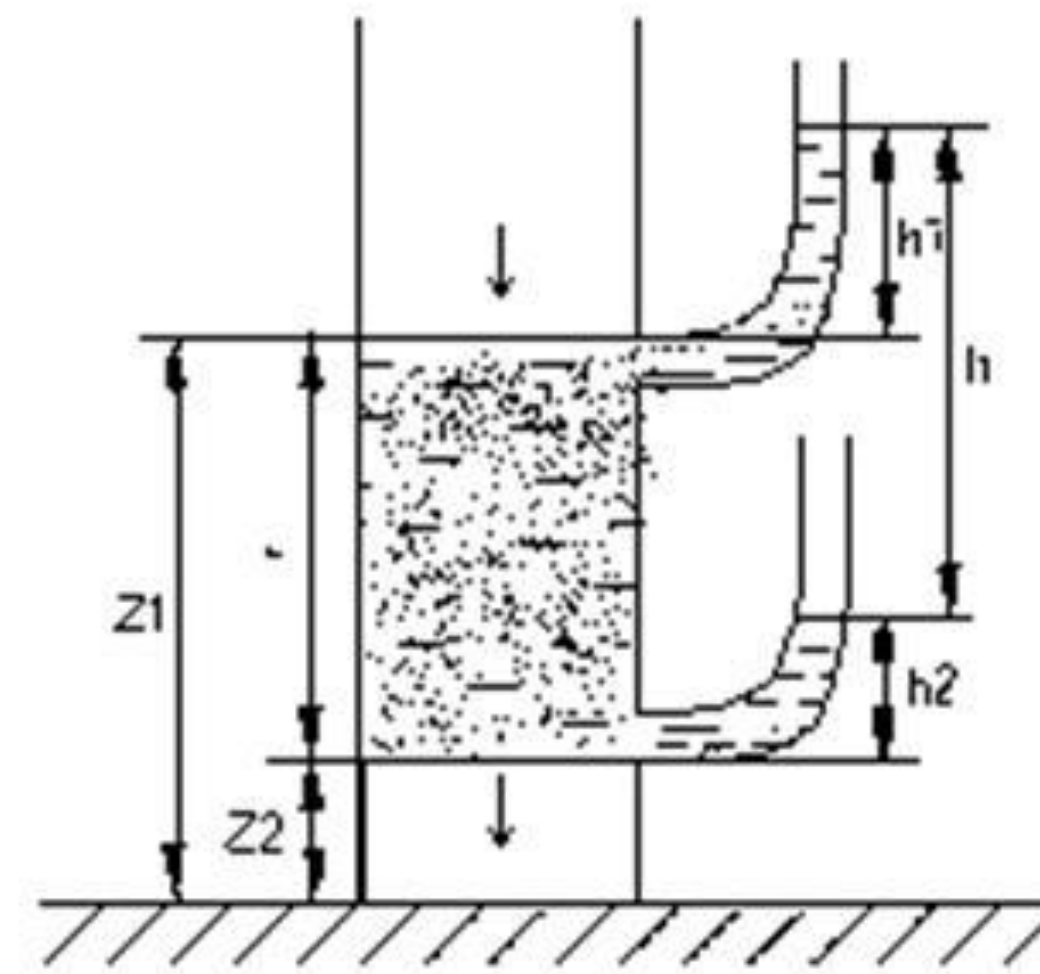
# Относительные фазовые проницаемости

## Содержание

- **Общие понятия:**  
**Проницаемость**  
**Фазовая проницаемость**  
**Виды исследований**
- Характеристики кривых ОФП
- Аппроксимация кривых ОФП по корреляциям
- Задание ОФП в гидродинамических моделях
- Получение значений ОФП в процессе расчета

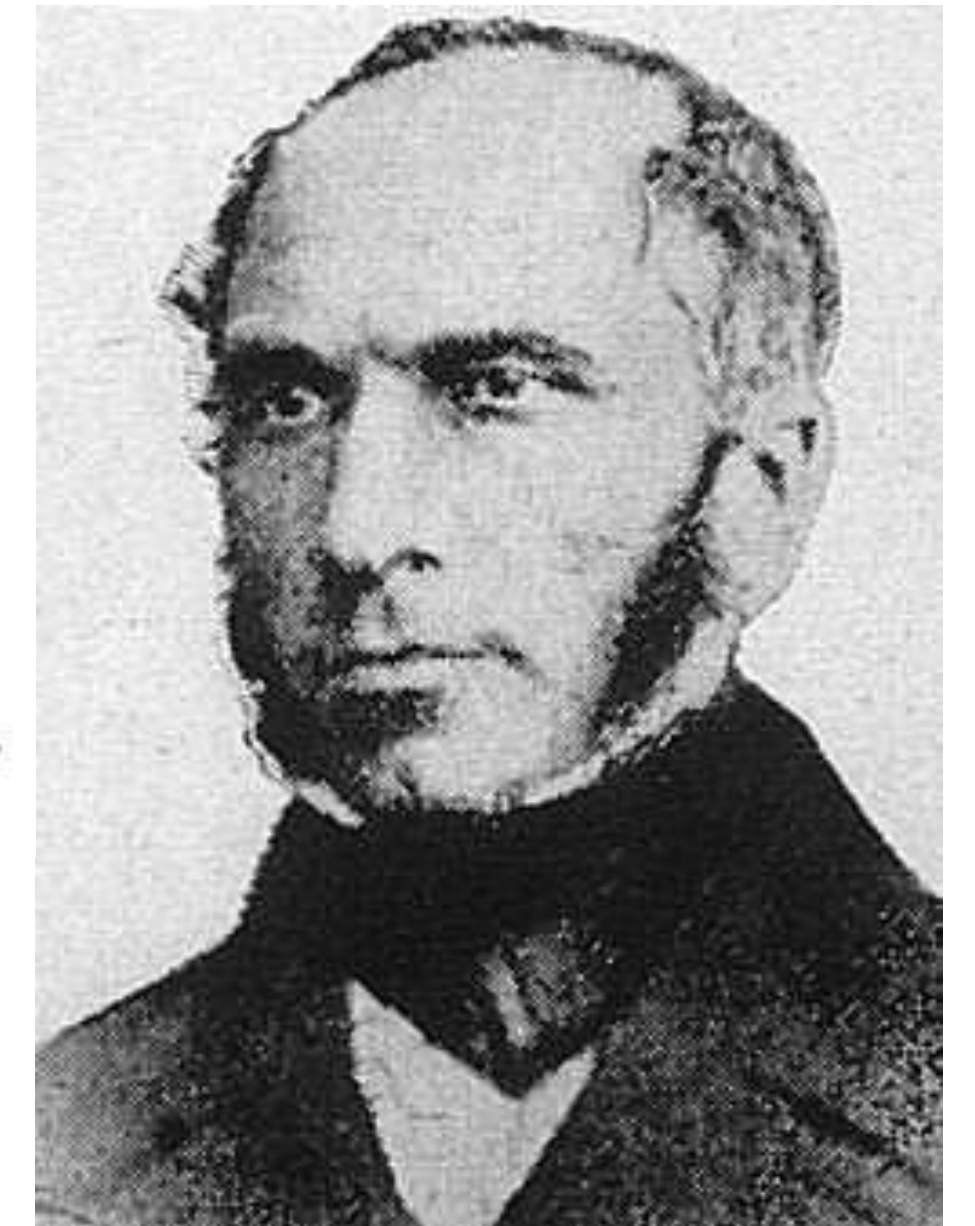
# Проницаемость горных пород

- **Проницаемость** – важнейший параметр, характеризующий проводимость коллектора, т.е. способность горных пород пропускать через себя флюид
- Первые исследования по движению жидкости в пористых телах – песчаных фильтрах водоочистных сооружений
- **1856 год** – расход несжимаемой жидкости (воды)  $Q$  пропорционален потере гидростатического напора жидкости  $h$  и площади поперечного сечения  $F$  и обратно пропорционален высоте слоя грунта  $L$



$$Q \sim \frac{F}{L} h$$

Анри Филибер Гаспар Дарси  
Henry Philibert Gaspard Darcy



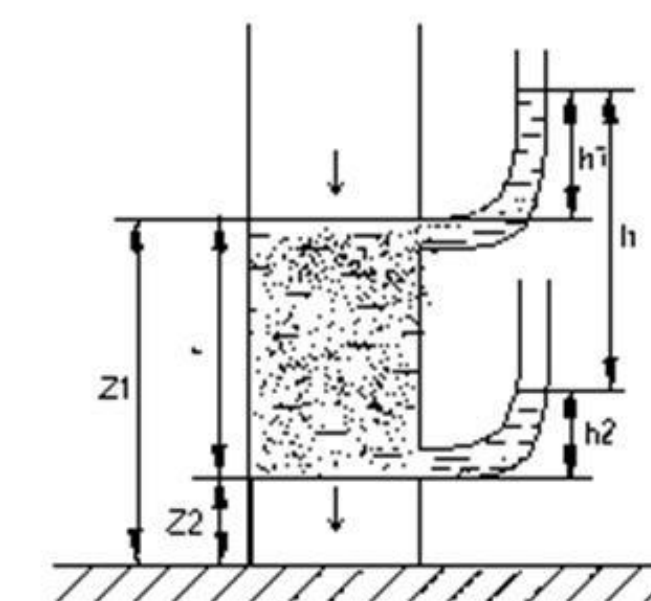
# Закон Дарси

- $k'$  - коэффициент фильтрации: характеристика среды и фильтрующей жидкости (воды)
- Дарси проводил свои исследования только с водой. В дальнейшем, при исследовании фильтрации других жидкостей различной вязкости, было установлено, что коэффициент фильтрации обратно пропорционален кинематической вязкости жидкости
- $k$  – коэффициент пропорциональности называемый **проницаемостью**
- Физический смысл проницаемости можно объяснить пропускной способностью породы, а именно той площадью поперечного сечения, которое способно пропустить через себя жидкость или газ.
- Единицы измерения:

м<sup>2</sup>

Дарси (Д) –  $1\text{Д} = 10^{-12}\text{м}^2$

миллиДарси (мД) –  $1\text{мД} = 10^{-3}\text{Д} = 10^{-15}\text{м}^2$



$$Q = k' \frac{F}{L} \frac{\Delta p}{g\rho}$$

$$k' \approx \frac{1}{\nu}$$

$$Q = \frac{k}{\mu} F \frac{\Delta p}{L}$$

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p}{L}$$

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p$$

# Фазовая проницаемость

## Однофазное течение

$$Q = F \frac{k}{\mu} gradP$$

- **Абсолютная проницаемость** - проницаемость образца керна, насыщенного одним флюидом, инертным по отношению к породе (величина зависит целиком и полностью от свойств породы, а не от насыщающего флюида)
- В породах нефтяных и газовых месторождений одновременно присутствуют две или три фазы

## Многофазное течение

$$Q_i = F \frac{k_i}{\mu_i} gradP$$

- **Эффективная (фазовая) проницаемость** – проницаемость породы для отдельно взятого флюида при числе присутствующих фаз больше 1 (величина зависит от флюидонасыщения)
- **Относительная фазовая проницаемость** – отношение эффективной (фазовой) проницаемости к абсолютной

# Относительные фазовые проницаемости

- **Многофазные потоки в пласте:**

Движение нефти и воды

Движение воды и газа

Трехфазный поток нефти воды и газа одновременно

- **ОФП – функции насыщенности**

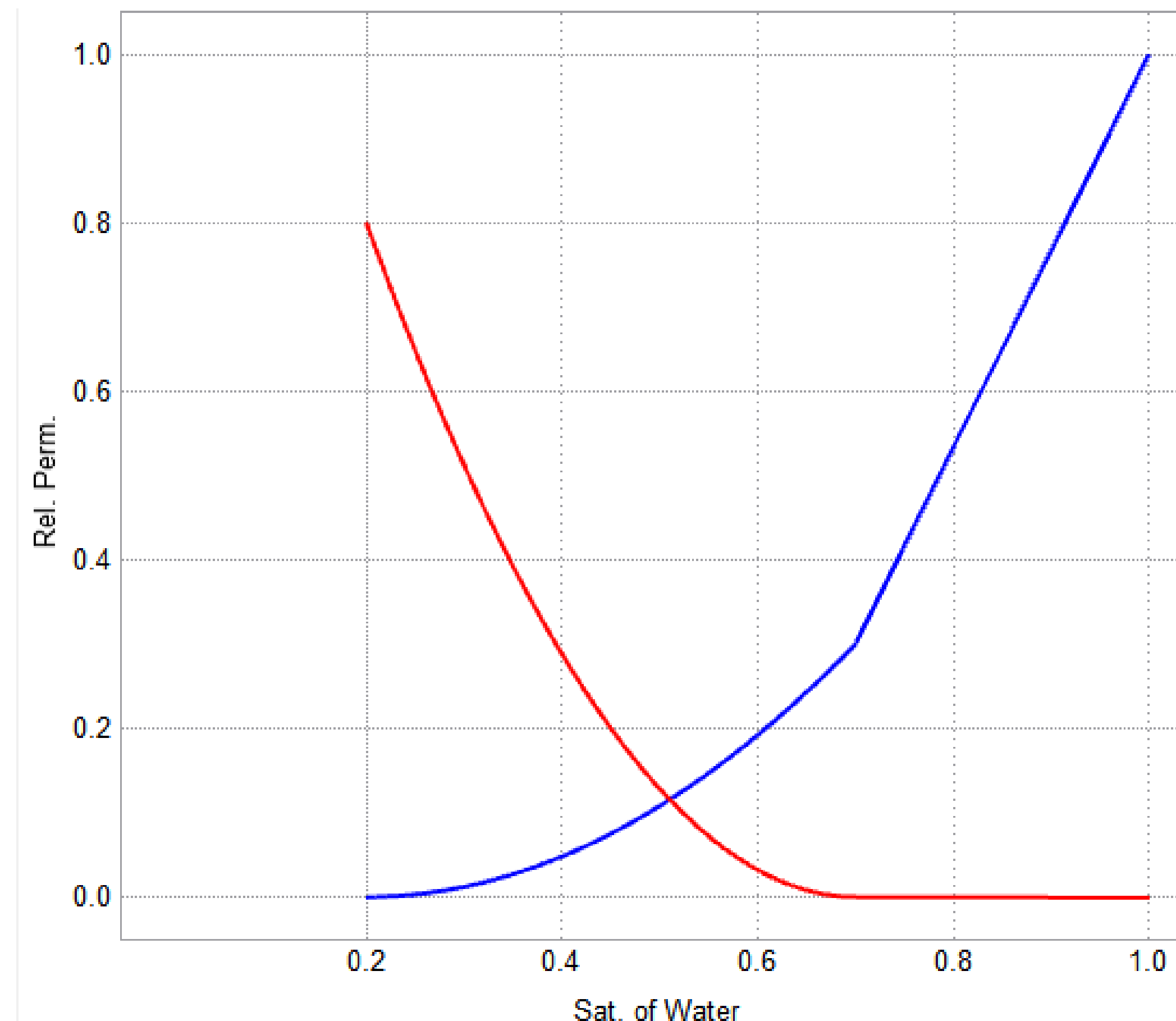
- **Решение многих технологических задач**

**эксплуатации месторождений:**

Определение дебитов скважин

Прогнозирование поведения пласта

Прогнозирование поведения скважин



# Источники данных ОФП



# Содержание

## Относительные фазовые проницаемости

- Общие понятия:  
Проницаемость  
Фазовая проницаемость  
Виды исследований
- **Характеристики кривых ОФП**
- Аппроксимация кривых ОФП по корреляциям
- Задание ОФП в гидродинамических моделях
- Получение значений ОФП в процессе расчета



# Обозначения

## ● **Относительная фазовая проницаемость**

$K_{rw}$  – воды

$K_{rg}$  – газа

$K_{ro}$  – нефти

$K_{row}$  – нефти в присутствии воды

$K_{rog}$  – нефти в присутствии газа

## ● **Насыщенность:**

$S_o$  – насыщенность нефти

$S_g$  – насыщенность газа

$S_w$  – насыщенность воды

## ● **Капиллярное давление:**

$P_{cow}$  – капиллярное давление между нефтью и водой

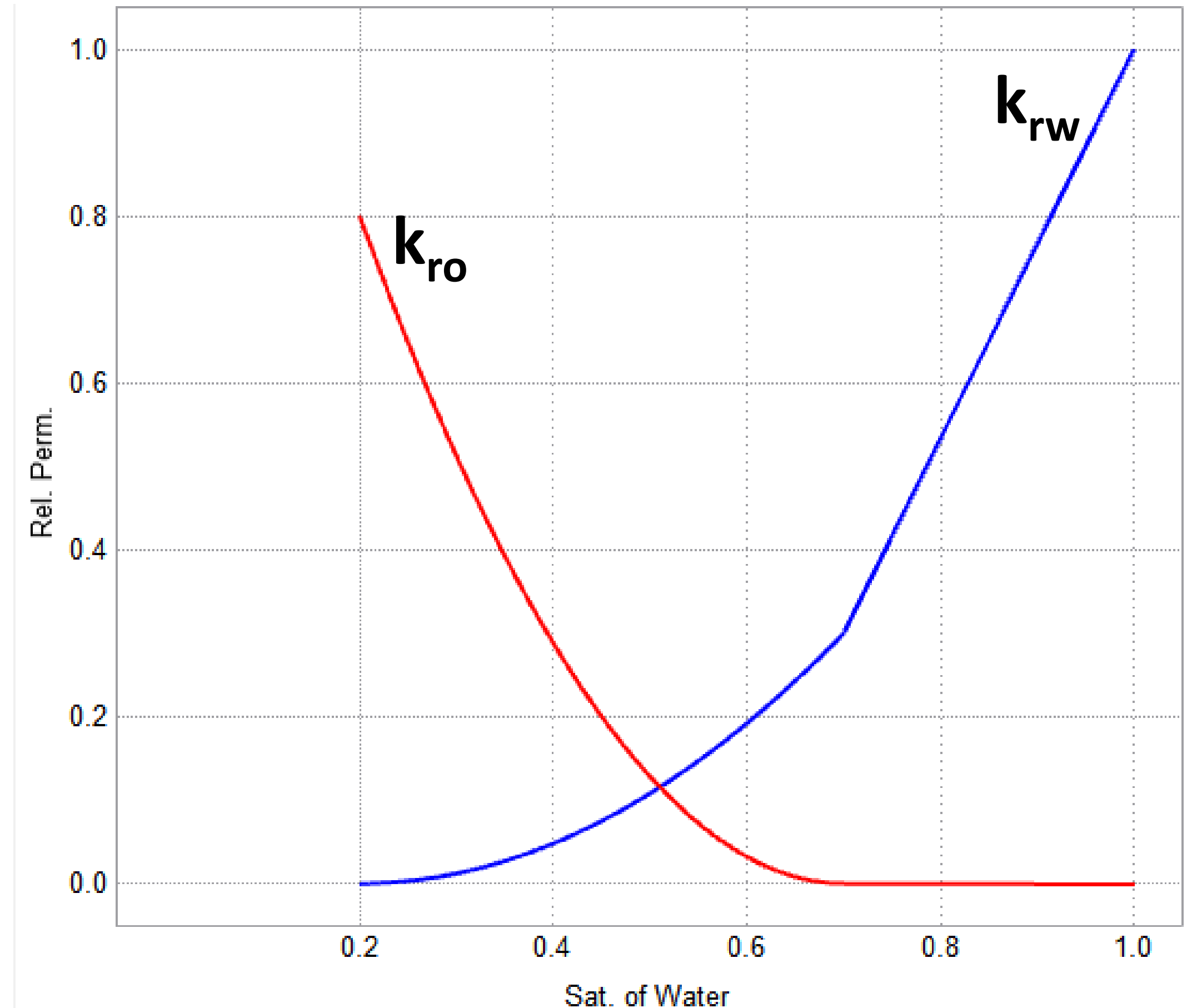
$P_{cog}$  – капиллярное давление между нефтью и газом

$P_{cwg}$  – Капиллярное давление между водой и газом

# Совместная фильтрация нефти и воды

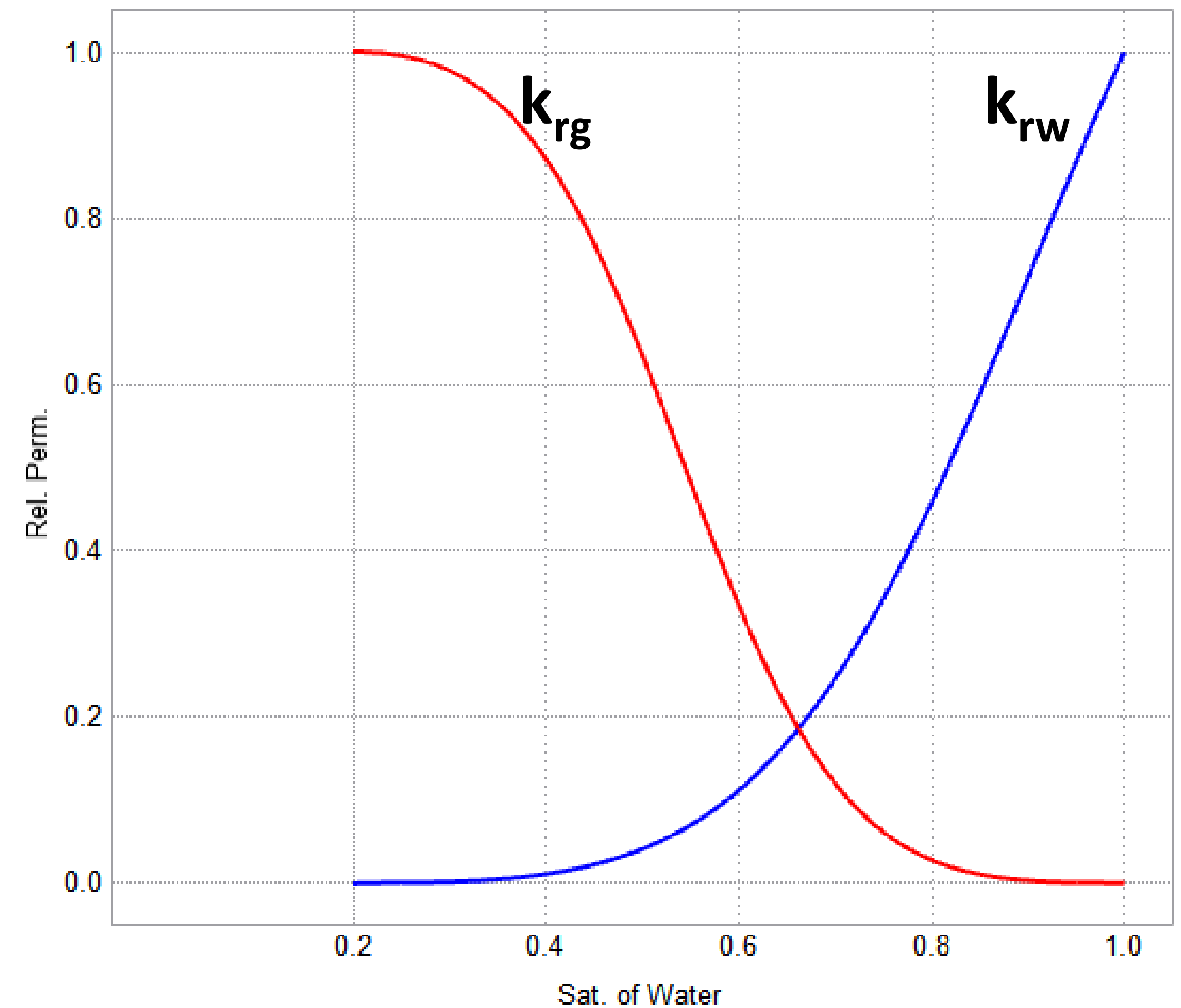
- $S_w=0.2, k_{rw}=0$
- $S_w=0.2, k_{ro}=0.8$
- $S_w=0.35, k_{ro}=0.4$
- $S_w=0.7, k_{ro}=0$
- $k_r < 1$
- Условия в лаборатории должны быть максимально приближены к пластовым

$$\left[ \frac{\sigma}{k | \text{grad } p |} \right]_{\text{мод}} = \left[ \frac{\sigma}{k | \text{grad } p |} \right]_{\text{нат}}$$

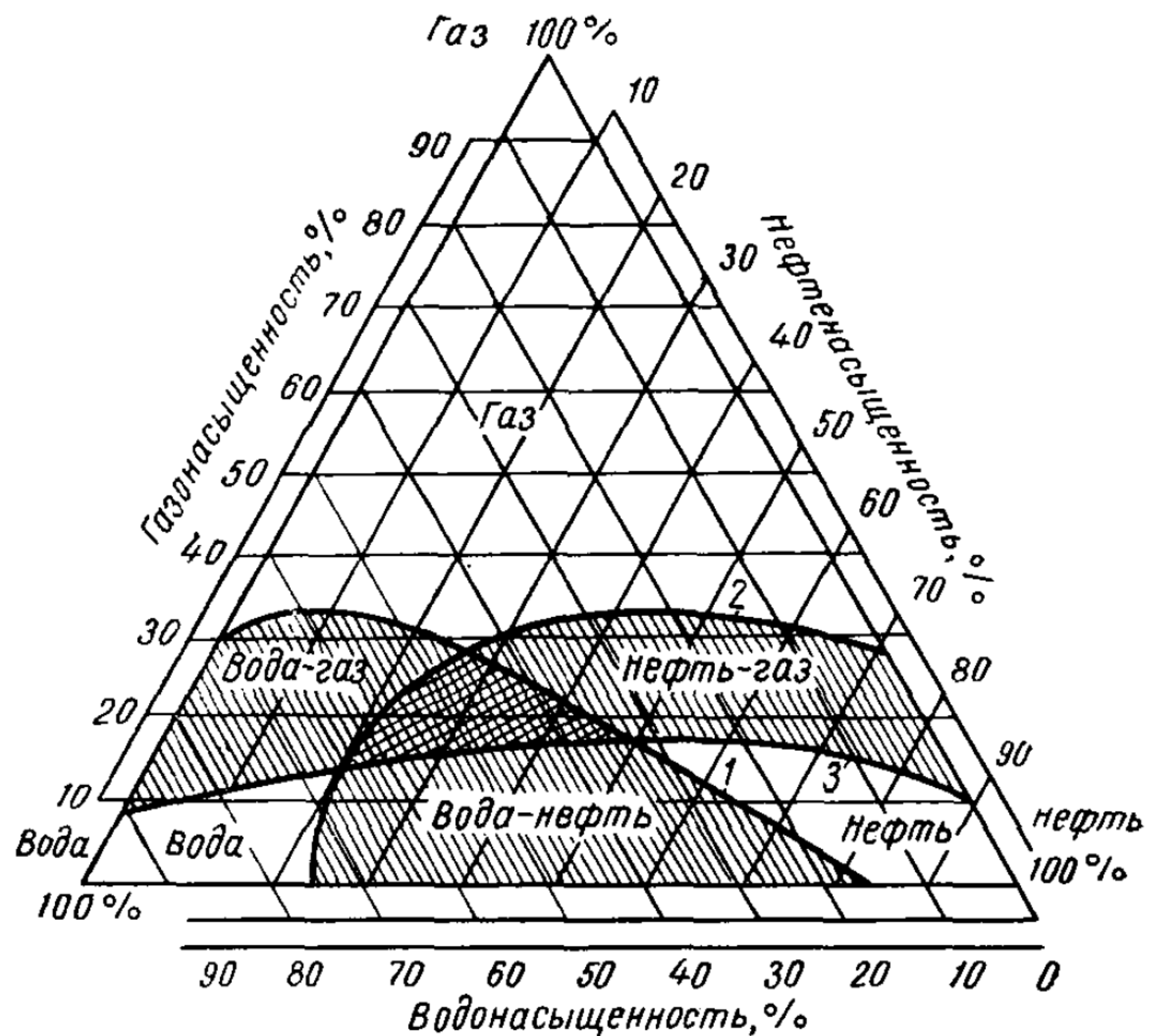


# Совместная фильтрация газа и жидкости

- $S_w=0.2, k_{rw}=0$
- $S_w=0.2, k_{rg}\sim 1$
- $S_w=0.4, k_{rg}\sim 0.9$
- $k_{rg}=0, S_w\sim 1$
- $k_r < 1$



# Трехфазная фильтрация



# Концевые точки кривых ОФП

<b>SWL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Минимальная (реликтовая) водонасыщенность</li> <li>Минимальное значение в таблице</li> </ul>
<b>SWCR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Критическая водонасыщенность</li> <li>Вода становится подвижной</li> </ul>
<b>SOWCR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Остаточная нефтенасыщенность</li> <li>Нефть перестает быть подвижной</li> </ul>
<b>SWU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Максимальная водонасыщенность</li> <li>Максимальное значение в таблице</li> </ul>
<b>SGL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Минимальная (реликтовая) газонасыщенность</li> <li>Минимальное значение в таблице</li> </ul>
<b>SGCR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Критическая газонасыщенность</li> <li>Газ становится подвижным</li> </ul>
<b>SOGCR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Остаточная нефтенасыщенность</li> <li>Нефть перестает быть подвижной</li> </ul>
<b>SGU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Максимальная газонасыщенность</li> <li>Максимальное значение в таблице</li> </ul>

SWOF		
0.3	0.0000	1.0000
0.4	0.0000	0.5120
0.5	0.0139	0.2160
0.6	0.0556	0.0640
0.7	0.1250	0.0080
0.8	0.2222	0.0000
0.9	0.3472	0.0000
1.0	0.5000	0.0000
/		
SGOF		
0.0	0.0000	1.0000
0.1	0.0000	0.5354
0.2	0.0436	0.2392
0.3	0.1202	0.0769
0.4	0.2468	0.0110
0.5	0.4312	0.0000
0.6	0.6802	0.0000
0.7	1.0000	0.0000
/		

# Относительные фазовые проницаемости

## Содержание

- Общие понятия:  
Проницаемость  
Фазовая проницаемость  
Виды исследований
- Характеристики кривых ОФП
- **Аппроксимация кривых ОФП по корреляциям**
- Задание ОФП в гидродинамических моделях
- Получение значений ОФП в процессе расчета

# Аппроксимация ОФП

- Получение непрерывной зависимости фазовой проницаемости от водонасыщенности
- Оценка достоверности значений фазовой проницаемости,
- Оценка предельных значений остаточной водонасыщенности и нефтенасыщенности
  
- Корреляция **Corey**
- Корреляция **LET**

# Корреляция Corey

## ● Система «Нефть – Вода»

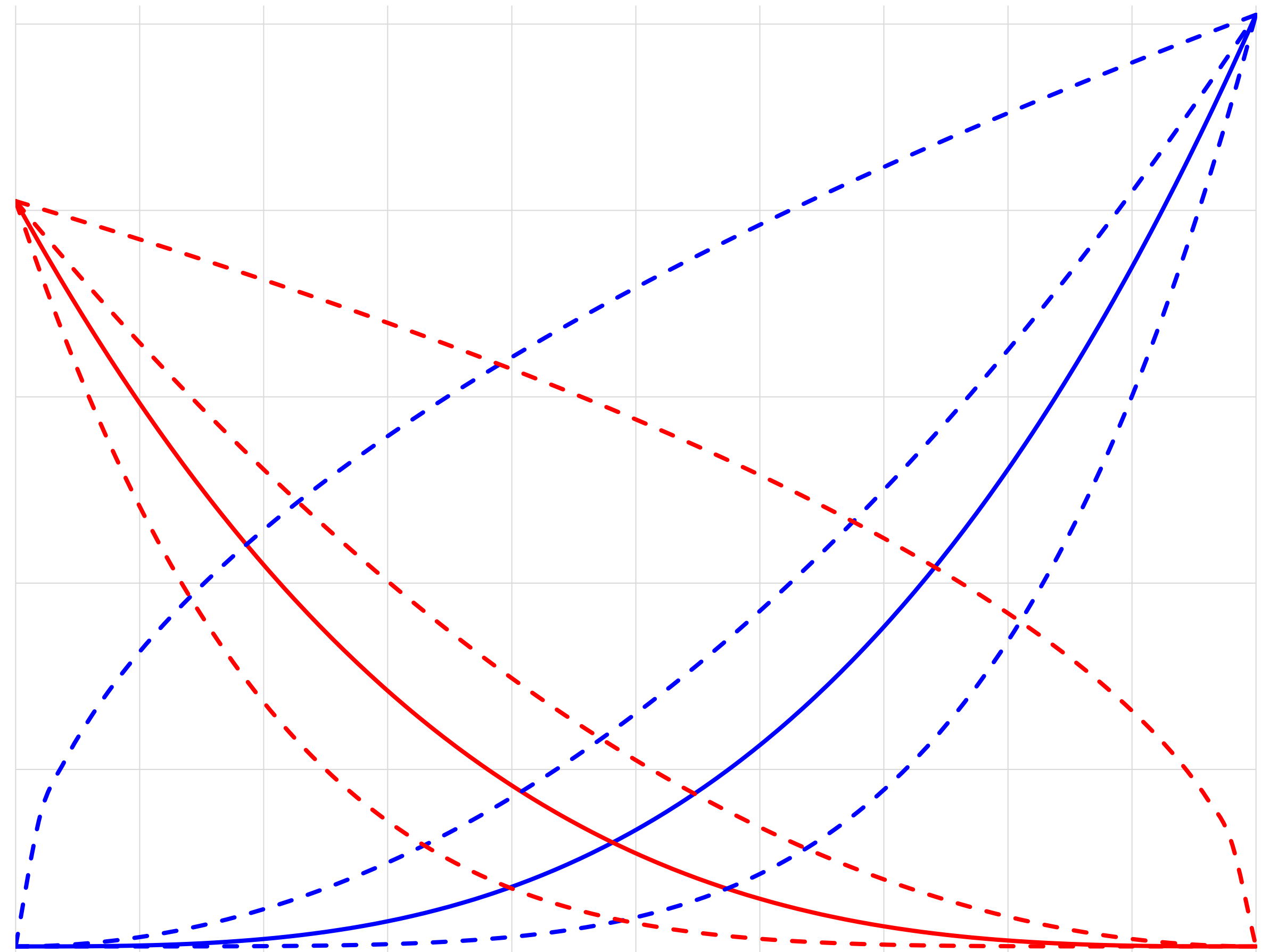
$$K_{rw} = m \cdot (S_{wn})^{nw} \quad K_{row} = n \cdot (1 - S_{wn})^{now}$$

## ● Система «Газ - Нефть»

$$K_{rg} = m \cdot (S_{gn})^{ng} \quad K_{rog} = n \cdot (1 - S_{gn})^{nog}$$

## ● Система «Газ - Вода»

$$K_{rw} = m \cdot (S_{wn})^{ng} \quad K_{rgw} = n \cdot (1 - S_{wn})^{nwg}$$





# Корреляция LET

## ● Система «Нефть – Вода»

$$K_{rw} = \frac{m \cdot (S_{wn})^{L_w}}{(S_{wn})^{L_w} + E_w \cdot (1 - S_{wn})^{T_w}}$$

$$K_{row} = \frac{n \cdot (1 - S_{wn})^{L_o}}{(1 - S_{wn})^{L_o} + E_o \cdot (S_{wn})^{T_o}}$$

## ● Система «Газ - Нефть»

$$K_{rg} = \frac{m \cdot (S_{gn})^{L_g}}{(S_{gn})^{L_g} + E_g \cdot (1 - S_{gn})^{T_g}}$$

$$K_{rog} = \frac{n \cdot (1 - S_{gn})^{L_o}}{(1 - S_{gn})^{L_o} + E_o \cdot (S_{gn})^{T_o}}$$

## ● Система «Газ - Вода»

$$K_{rw} = \frac{m \cdot (S_{wn})^{L_w}}{(S_{wn})^{L_w} + E_w \cdot (1 - S_{wn})^{T_w}}$$

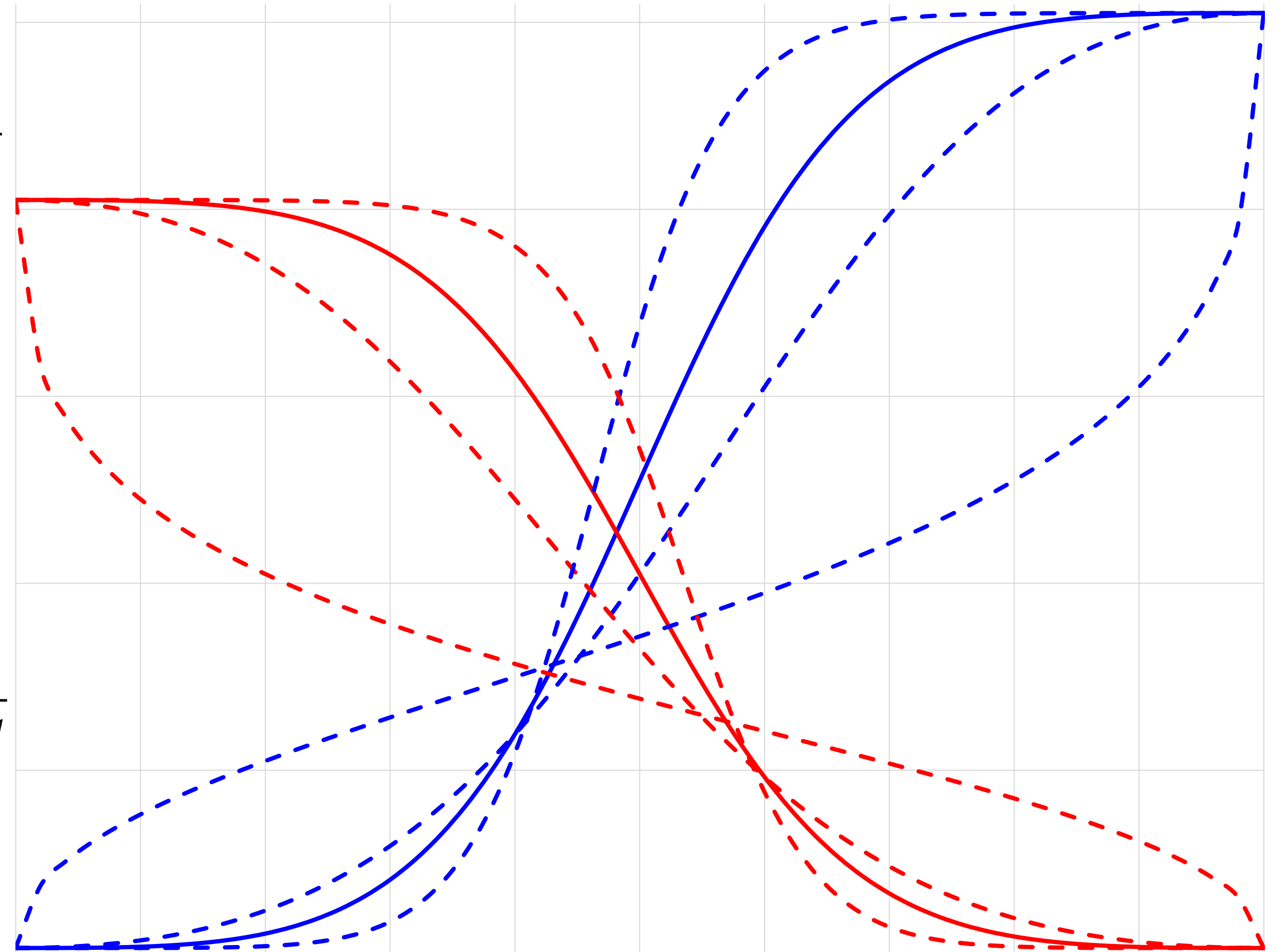
$$K_{rgw} = \frac{n \cdot (1 - S_{wn})^{L_g}}{(1 - S_{wn})^{L_g} + E_g \cdot (S_{wn})^{T_g}}$$

Параметры корреляции LET:

$L \geq 1$  L – задает нижнюю часть кривой

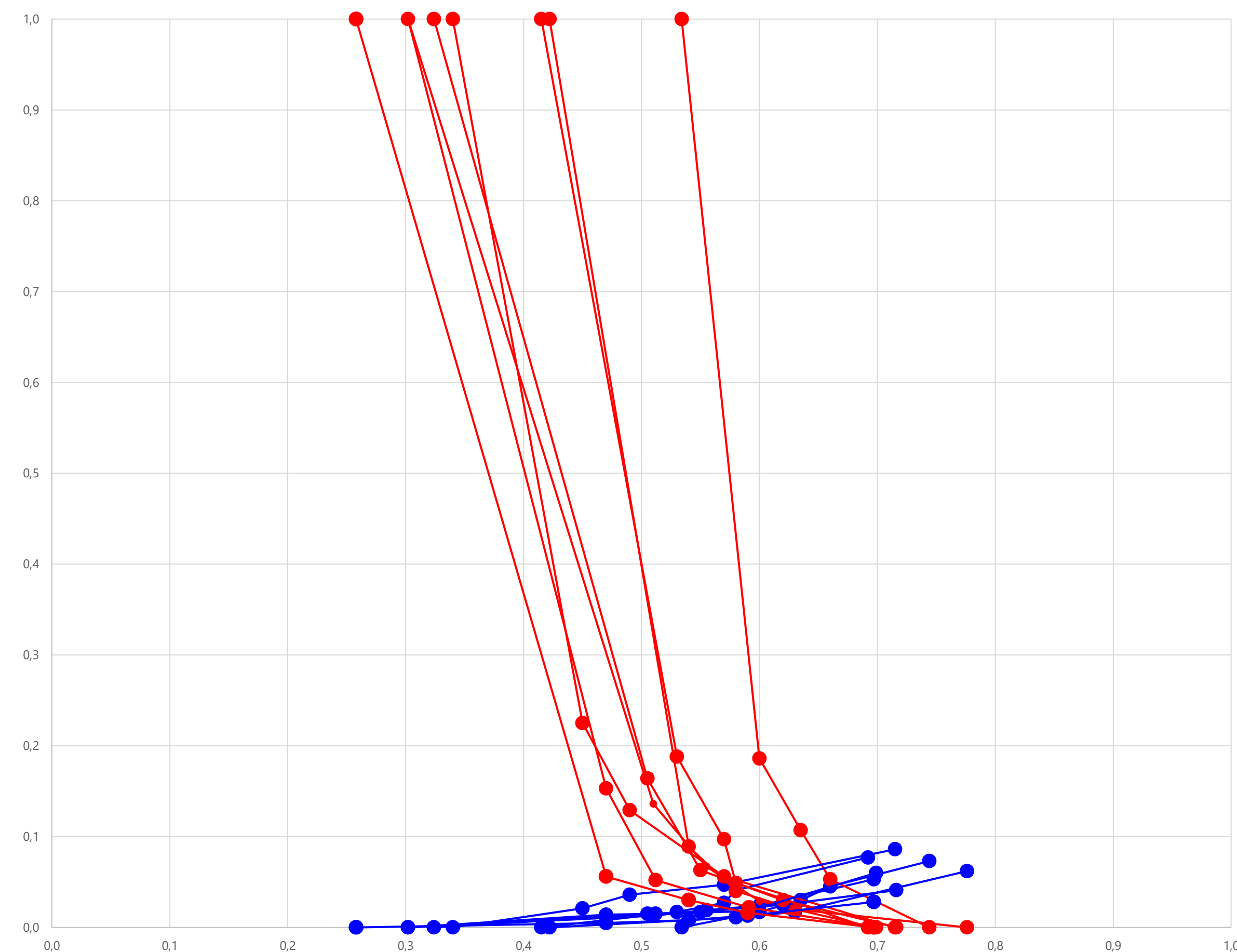
$E > 0$  E – задает положение наклонной части кривой

$T \geq 0.5$  T – задает верхнюю часть кривой



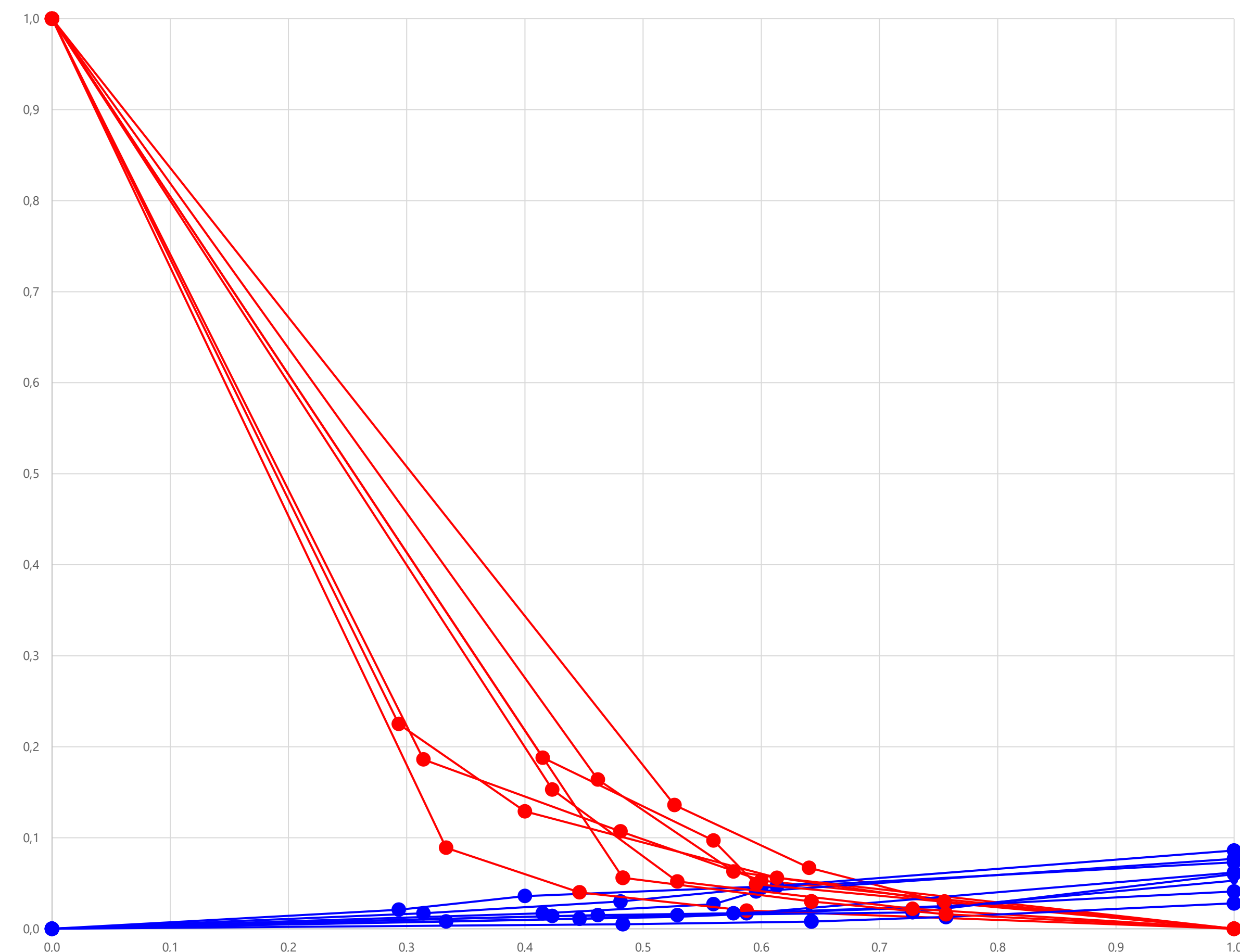
# Пример аппроксимации лабораторных исследований

- Разные исследования могут иметь разные концевые точки и разные значения ОФП
- Для аппроксимации нескольких исследований нужно привести кривые к единому диапазону по насыщенности и (опционально) к единому диапазону значений ОФП



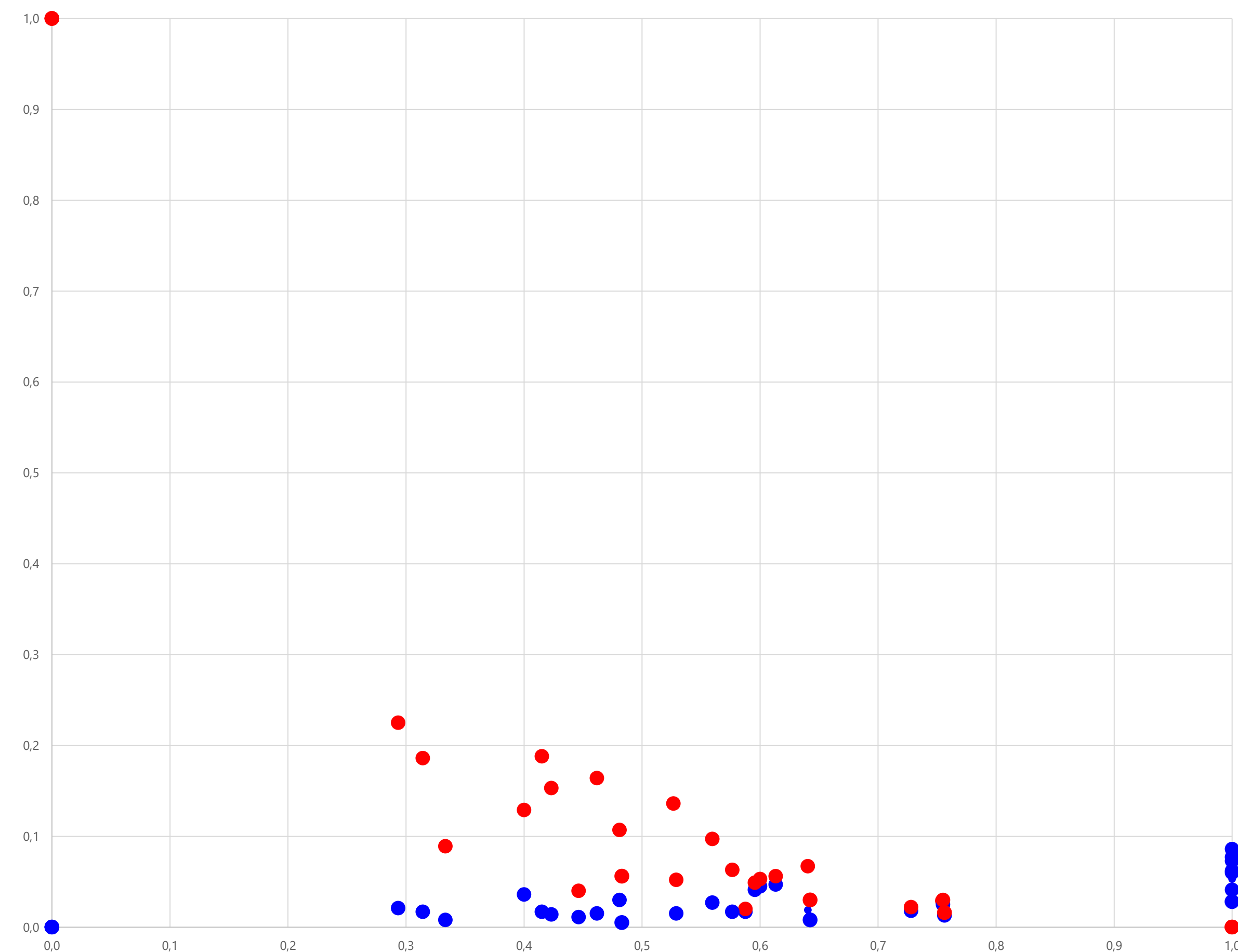
# Пример аппроксимации лабораторных исследований

- После приведения кривых ОФП к единому диапазону насыщенности (нормализация) можно производить осреднение кривых
- В данном примере нормализация по насыщенности не проводилась



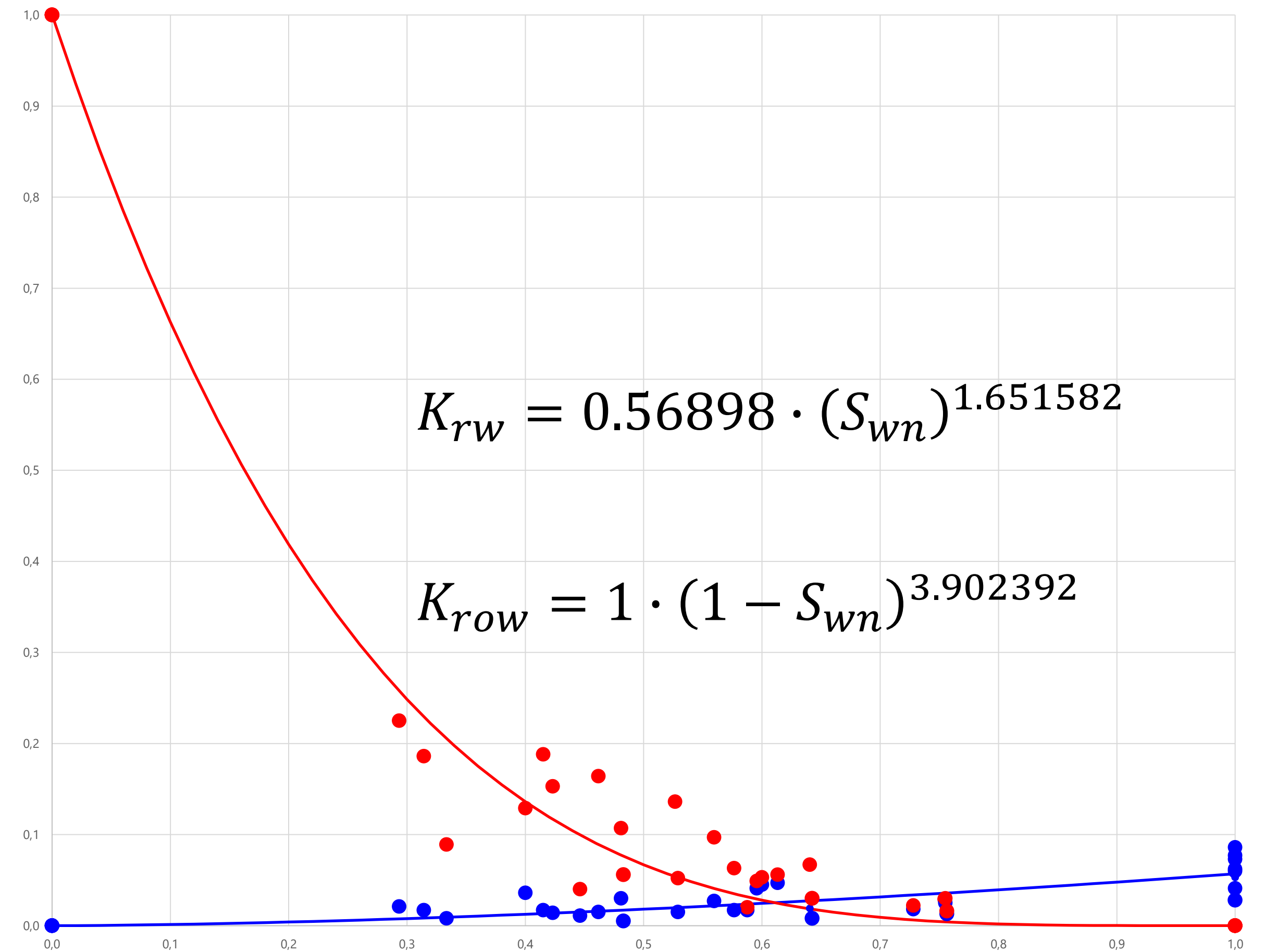
# Пример аппроксимации лабораторных исследований

- Для удобства восприятия лучше представлять лабораторные кривые в виде точек без соединения линиями



# Пример аппроксимации лабораторных исследований

- Через получившееся облако точек проводятся кривые по выбранной корреляции.
- Параметры корреляций подбираются для получения лучшего значения коэффициента корреляции
- Полученные кривые заносятся в модель любым удобным способом



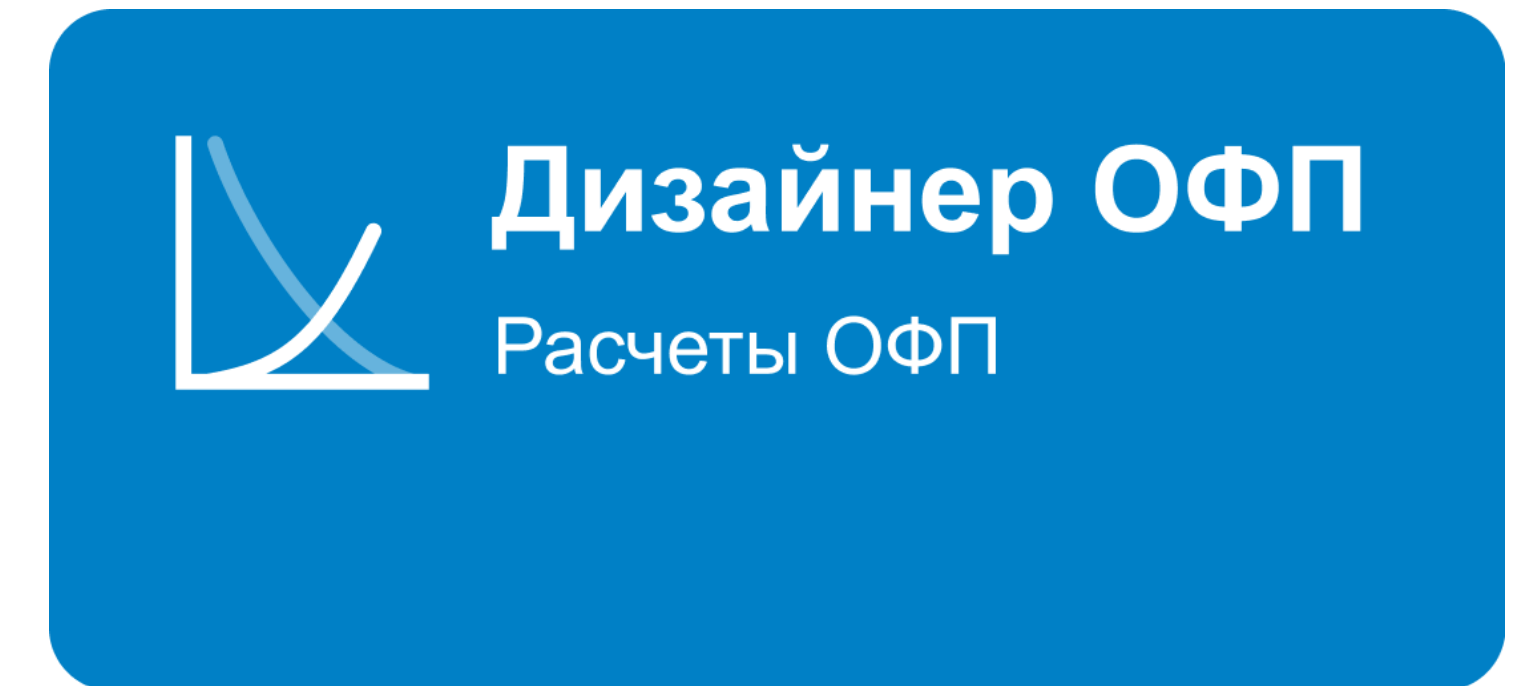
# Содержание

## Относительные фазовые проницаемости

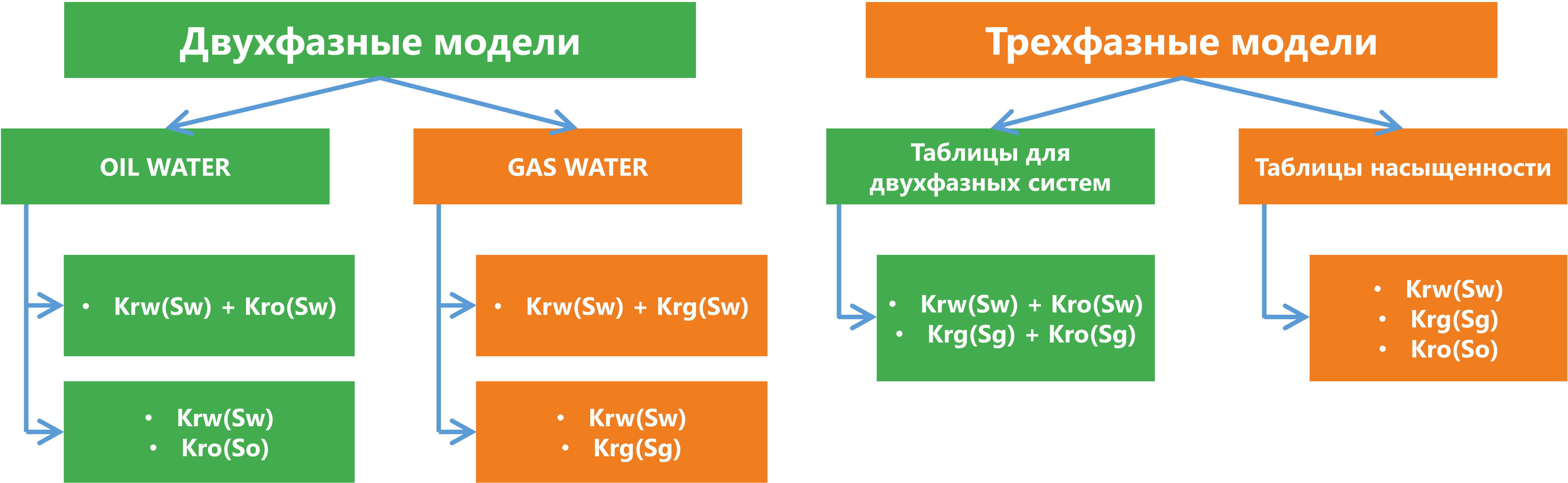
- Общие понятия:  
Проницаемость  
Фазовая проницаемость  
Виды исследований
- Характеристики кривых ОФП
- Аппроксимация кривых ОФП по корреляциям
- **Задание ОФП в гидродинамических моделях**
- Получение значений ОФП в процессе расчета

# Дизайнер ОФП

- **Обработка результатов лабораторных исследований по определению ОФП и капиллярных давлений**
- **Фильтрация и ранжирование результатов измерений**
- **Нормирование результатов измерений**
- **Аппроксимация табличных данных по корреляциям**
- **Создание вариантов для использования в гидродинамических моделях**
- **Интеграция с другими модулями tНавигатор**

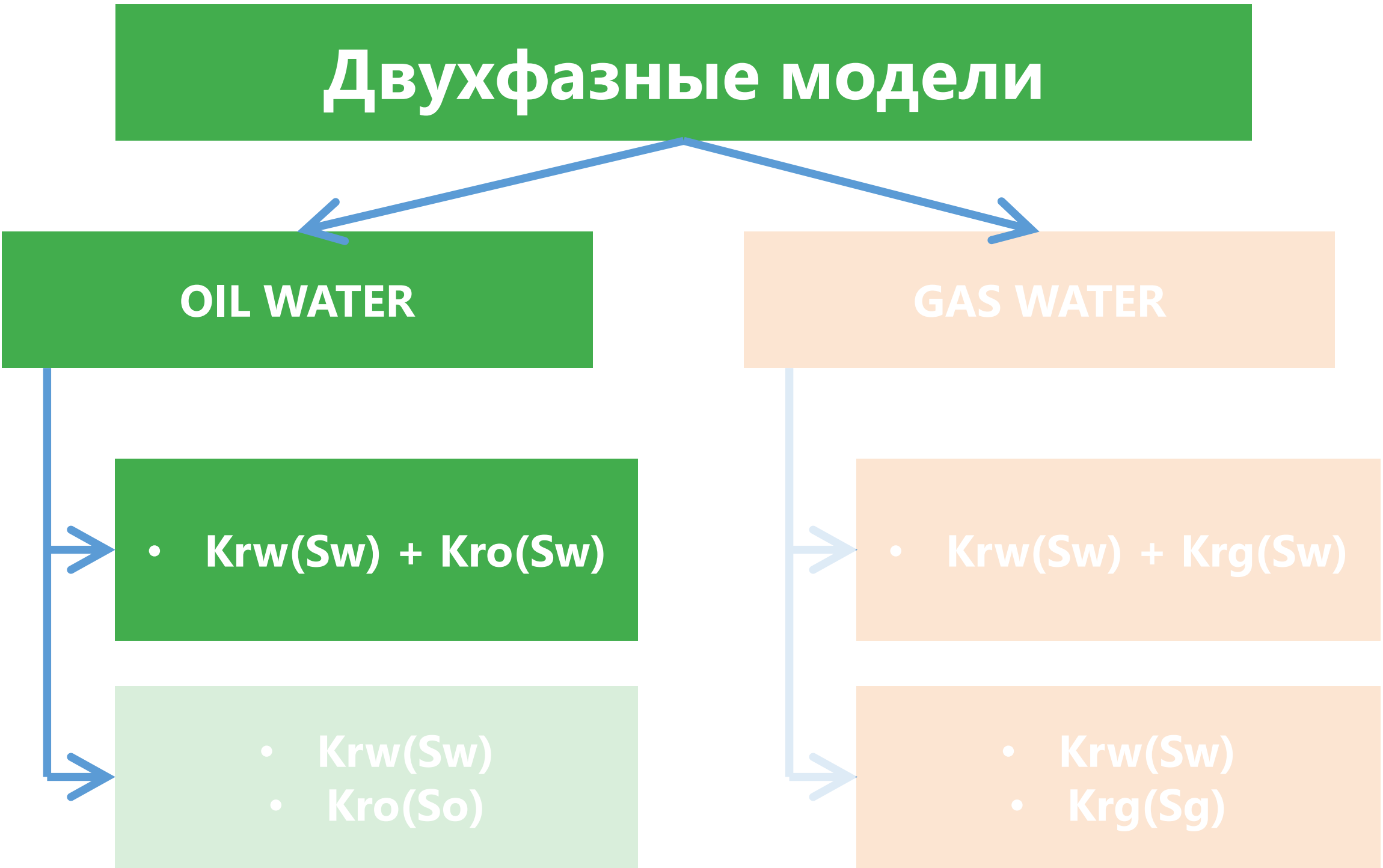


# Задание ОФП в модели





# Задание ОФП в модели – ключевые слова



● Таблицы:

**SWOF**

● Корреляции:

**COREYWO**

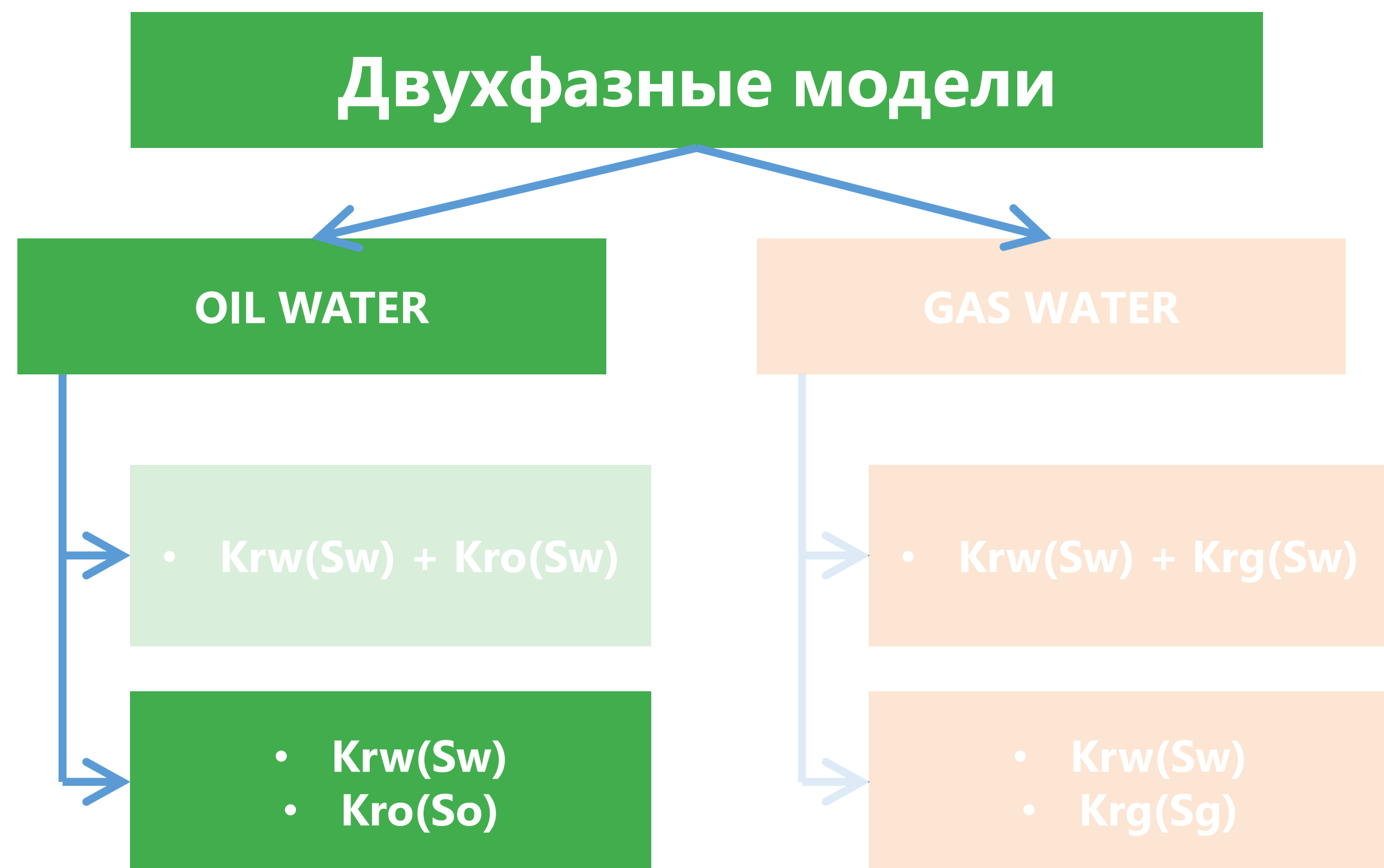
**LETWO**

SWOF		
0.3	0.0000	1.0000
0.4	0.0000	0.5120
0.5	0.0139	0.2160
0.6	0.0556	0.0640
0.7	0.1250	0.0080
0.8	0.2222	0.0000
0.9	0.3472	0.0000
1.0	0.5000	0.0000
/		

COREYWO													
0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1	/
/													

LETWO																	
0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1	2	1	2	1	/
/																	

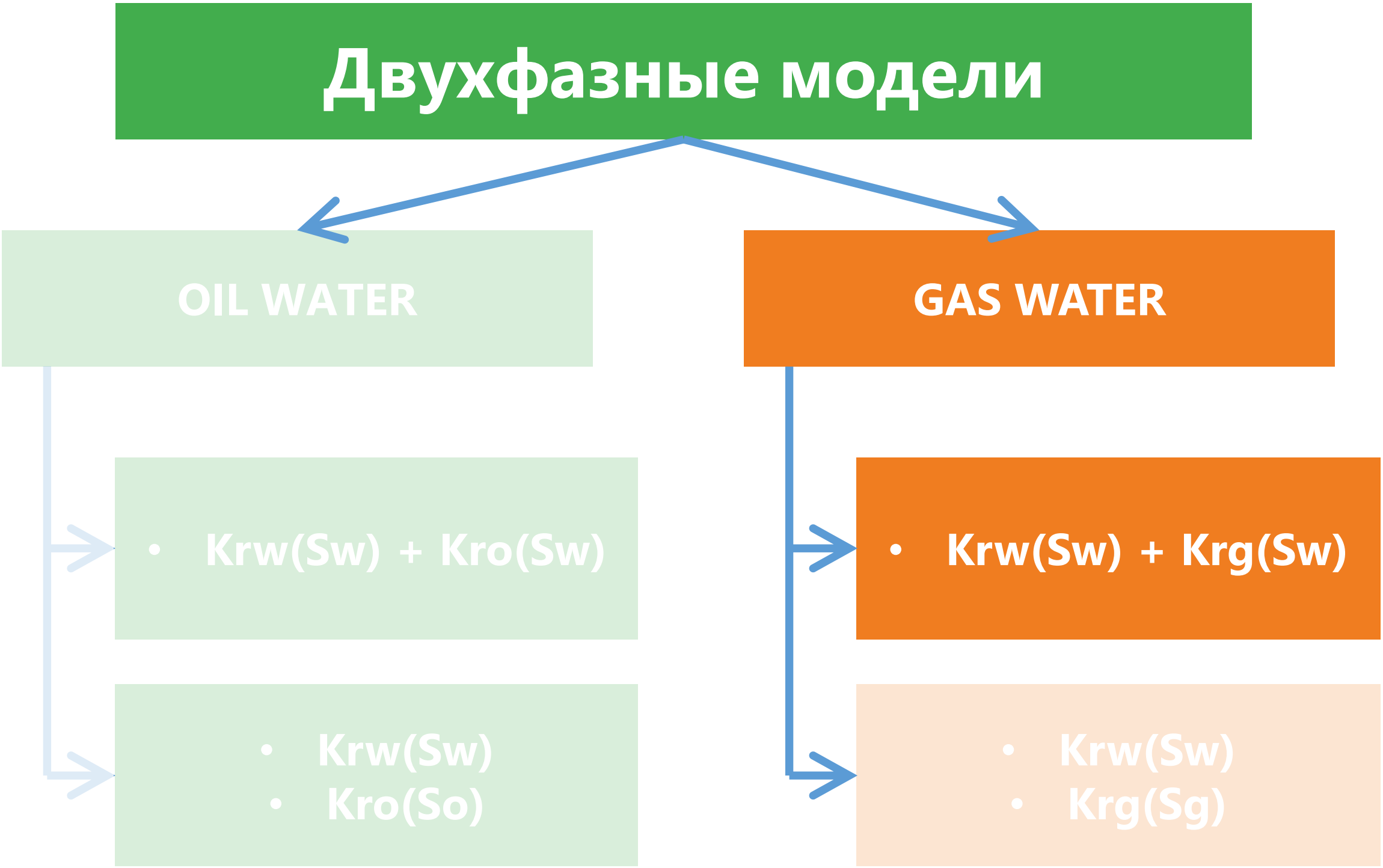
# Задание ОФП в модели – ключевые слова



● Таблицы:  
**SWFN** + **SOF2**

SWFN	
0.3	0.0000
0.4	0.0000
0.5	0.0139
0.6	0.0556
0.7	0.1250
0.8	0.2222
0.9	0.3472
1.0	0.5000
/	
SOF2	
0.0	0.0000
0.2	0.0000
0.3	0.0080
0.4	0.0640
0.5	0.2160
0.6	0.5120
0.7	1.0000
/	

# Задание ОФП в модели – ключевые слова



● Таблицы:

**SWOF**

● Корреляции:

**COREYWG**

**LETWG**

**SWOF**

0.3	0.0000	1.0000
0.4	0.0000	0.5120
0.5	0.0139	0.2160
0.6	0.0556	0.0640
0.7	0.1250	0.0080
0.8	0.2222	0.0000
0.9	0.3472	0.0000
1.0	0.5000	0.0000
/		

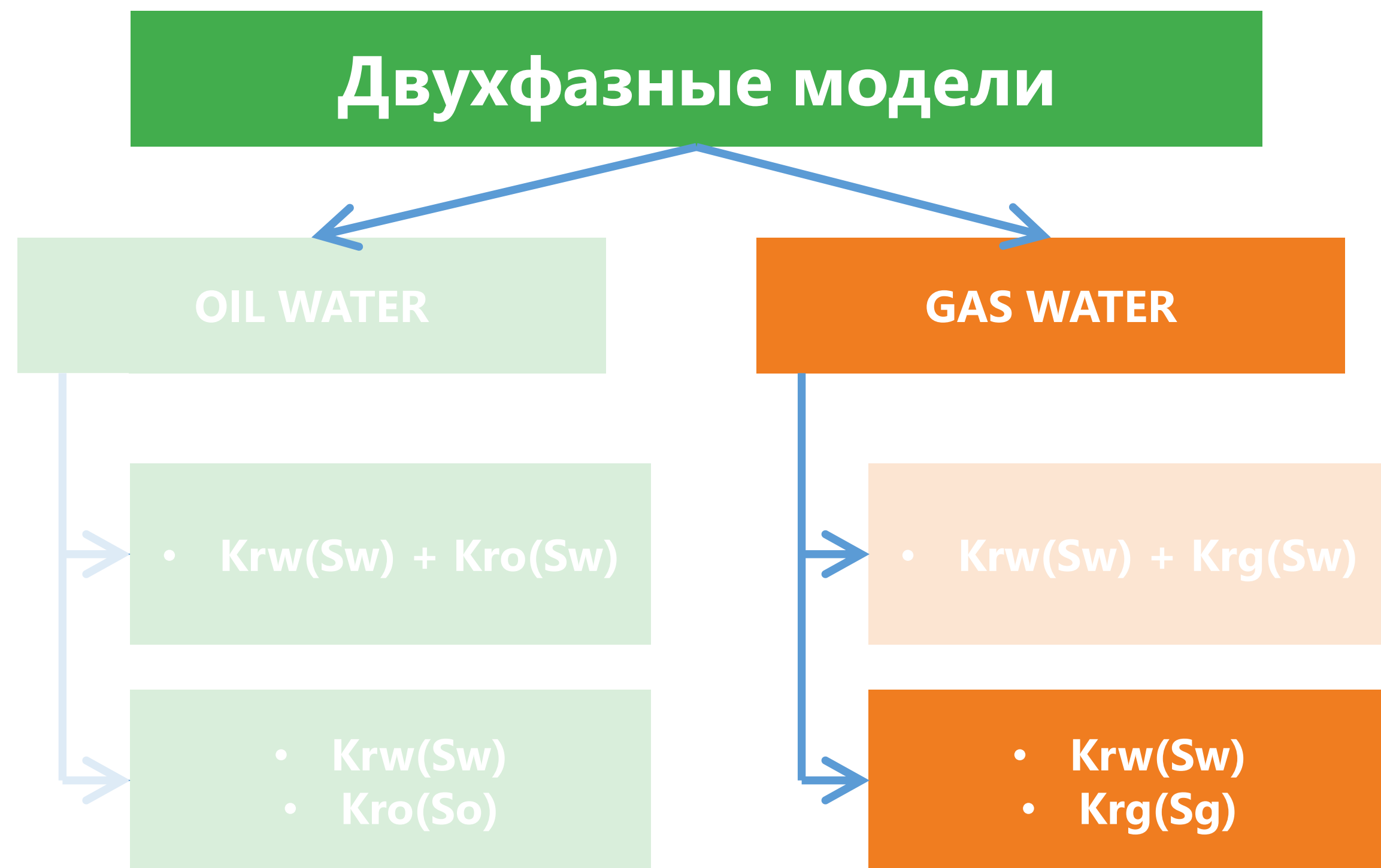
**COREYWG**

0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1
/												
/												

**LETWG**

0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1	2	1	2	1	/
/																	

# Задание ОФП в модели – ключевые слова



- Таблицы:  
**SWFN + SGFN**

SWFN	
0.3	0.0000
0.4	0.0000
0.5	0.0139
0.6	0.0556
0.7	0.1250
0.8	0.2222
0.9	0.3472
1.0	0.5000
/	
SGFN	
0.0	0.0000
0.2	0.0000
0.3	0.0080
0.4	0.0640
0.5	0.2160
0.6	0.5120
0.7	1.0000
/	

# Задание ОФП в модели – ключевые слова

● Таблицы:

**SWOF + SGOF**

● Корреляции:

**COREYWO + COREYGO**

**LETWO + LETGO**

SWOF		
0.3	0.0000	1.0000
0.4	0.0000	0.5120
0.5	0.0139	0.2160
0.6	0.0556	0.0640
0.7	0.1250	0.0080
0.8	0.2222	0.0000
0.9	0.3472	0.0000
1.0	0.5000	0.0000
/		
SGOF		
0.0	0.0000	1.0000
0.1	0.0077	0.5354
0.2	0.0436	0.2392
0.3	0.1202	0.0769
0.4	0.2468	0.0110
0.5	0.4312	0.0000
0.6	0.6802	0.0000
0.7	1.0000	0.0000
/		

COREYWO													
0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1	/
/													
COREYGO													
0	0.7	0	0.2	1	0.6	0.4	1	0	2	3	4	1	/
/													



LETWO																	
0.3	1	0.4	0.2	1	0.6	0.3	0.5	0	2	3	4	1	2	1	2	1	/
/																	
LETGO																	
0	0.7	0	0.2	1	0.6	0.4	1	0	2	3	4	1	2	1	2	1	/
/																	

# Задание ОФП в модели – ключевые слова

● Таблицы:

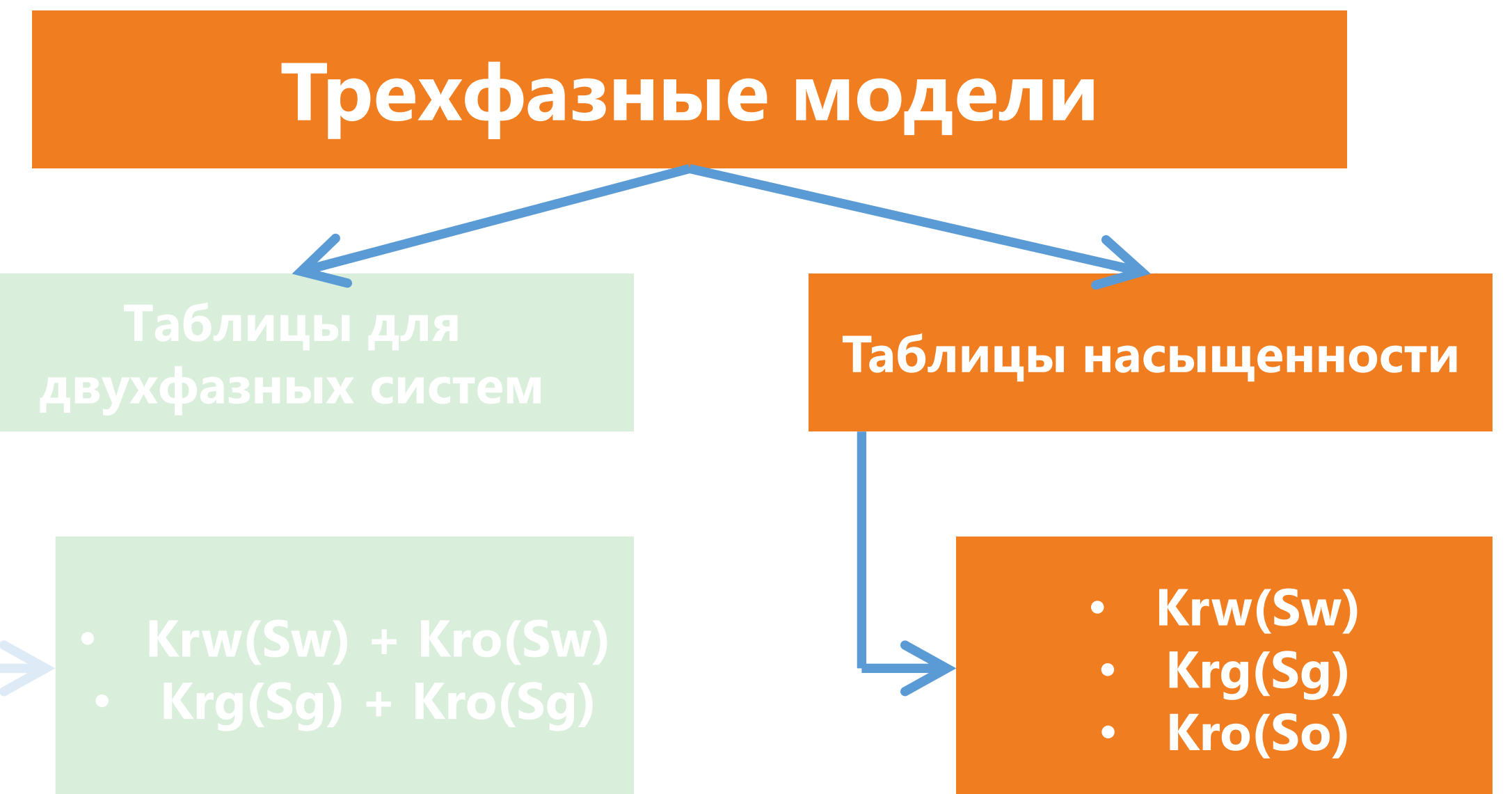
**SWFN + SGFN + SOF3**

**SWFN + SGF3 + SOF3**

**SWF3 + SGFN + SOF3**

**SWF3 + SGF3 + SOF3**

SWFN		SGFN		SOF3		
0.3	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0000
0.4	0.0000	0.1	0.0077	0.1	0.0000	0.0000
0.5	0.0139	0.2	0.0436	0.2	0.0000	0.0000
0.6	0.0556	0.3	0.1202	0.3	0.0080	0.0110
0.7	0.1250	0.4	0.2468	0.4	0.0640	0.0769
0.8	0.2222	0.5	0.4312	0.5	0.2160	0.2392
0.9	0.3472	0.6	0.6802	0.6	0.5120	0.5354
1.0	0.5000	0.7	1.0000	0.7	1.0000	1.0000
/		/		/		



# Расчет кривых ОФП по корреляциям

## Стандартный подход

### ● ОФП воды:

[ SWL ; SWCR ]

Горизонтальная линия  $K_{rw}=0$

[ SWCR ; 1-SOWCR ]

Расчет по соответствующей корреляции

[ 1-SOWCR ; SWU ]

Линейная интерполяция между  $K_{rwr}$  и  $K_{rw}$

### ● ОФП нефти:

[ SWL ; SWCR ]

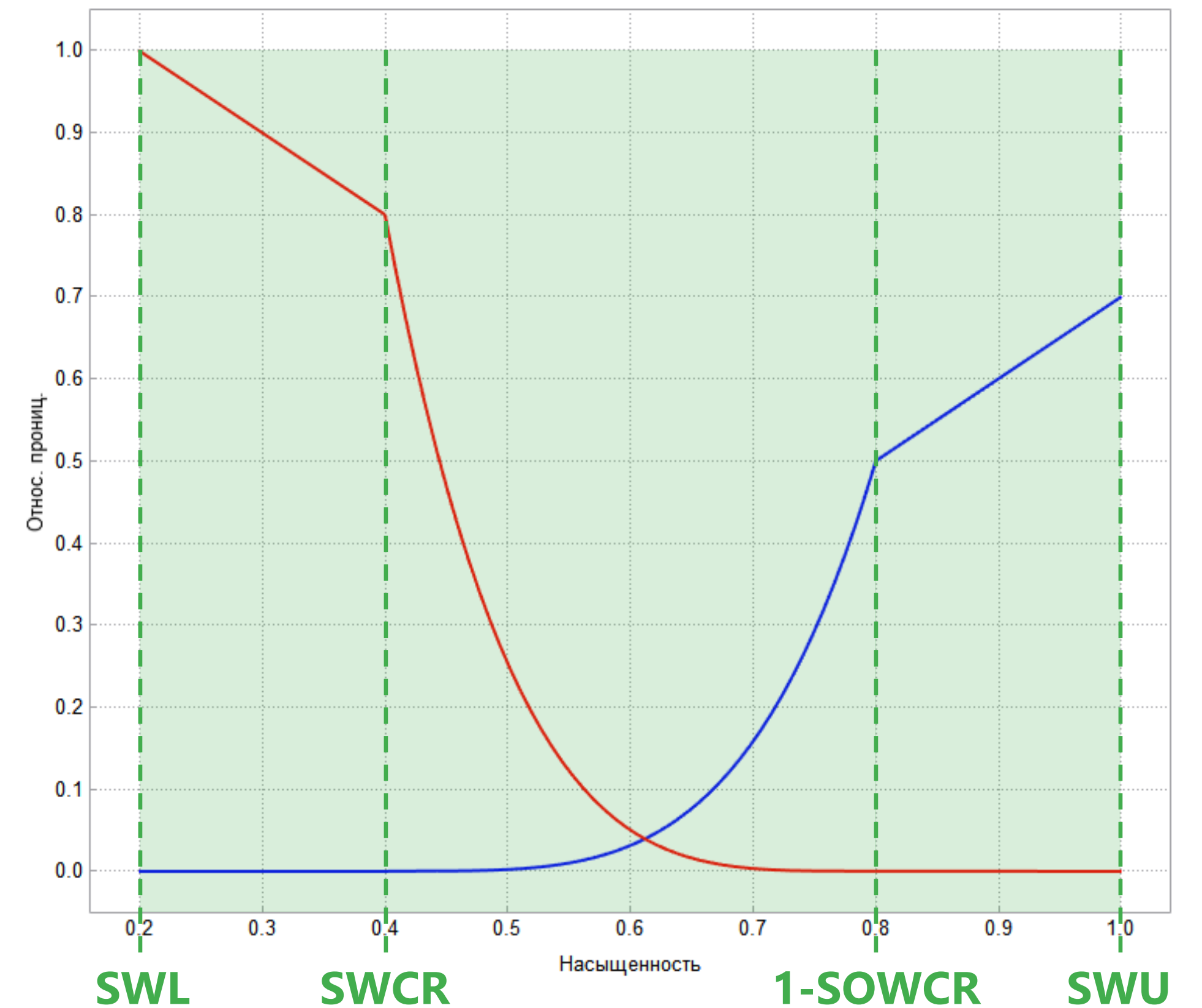
Линейная интерполяция между  $K_{rorw}$  и  $K_{ro}$

[ SWCR ; 1-SOWCR ]

Расчет по соответствующей корреляции

[ 1-SOWCR ; SWU ]

Горизонтальная линия  $K_{ro}=0$



# Расчет кривых ОФП по корреляциям Модифицированный подход

## ● ОФП воды:

[ SWL ; SWCR ]

Горизонтальная линия  $K_{rw}=0$

[ SWCR ; SWU ]

Расчет по соответствующей корреляции

## ● ОФП нефти:

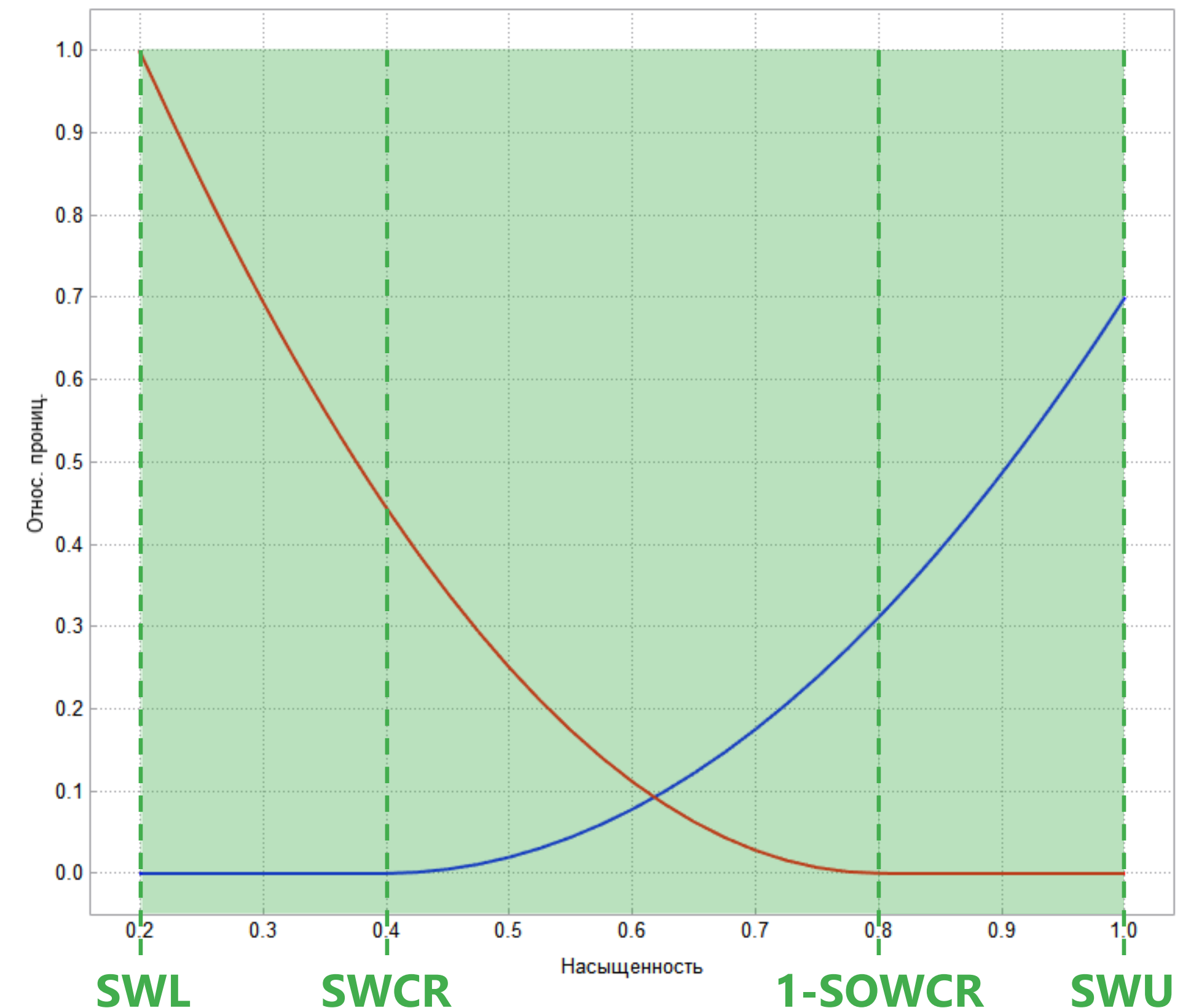
[ 1-SOWCR ; SWU ]

Горизонтальная линия  $K_{ro}=0$

[ SWL ; 1-SOWCR ]

Расчет по соответствующей корреляции

\* **Значения  $K_{rw}$  и  $K_{rog}$  заданы по умолчанию**





# Функции капиллярных давлений

## ОФП – таблицы Pc – таблицы

---

Кривые задаются явно в таблицах ОФП

- **P<sub>cow</sub>(S<sub>w</sub>):**
  - SWOF (4й столбец)
  - SWFN (3й столбец)
  - SWF3 (4й столбец)
- **P<sub>cog</sub>(S<sub>g</sub>):**
  - SGOF (4й столбец)
  - SGFN (3й столбец)
  - SGF3 (4й столбец)

## ОФП – корреляции Pc – корреляции

---

Кривые рассчитываются по корреляциям (степенной закон)

Параметры 9, 12 и 13 в ключевых словах:

- **P<sub>cow</sub>(S<sub>w</sub>):**
  - COREYWO
  - LETWO
- **P<sub>cog</sub>(S<sub>g</sub>):**
  - COREYGO
  - LETGO

## ОФП – корреляции Pc – таблицы

---

Кривые задаются явно в таблицах ОФП

- **P<sub>cow</sub>(S<sub>w</sub>):**
  - SWOF (4й столбец)
- **P<sub>cog</sub>(S<sub>g</sub>):**
  - SGOF (4й столбец)

Кривые ОФП задаются ключевыми словами корреляций

# Регионы ОФП

- **Разные кривые ОФП в разных ячейках модели**  
ячейках модели

Разные пласты/зоны

Разные значения проницаемости

- **Задание разных кривых ОФП**

Несколько таблиц

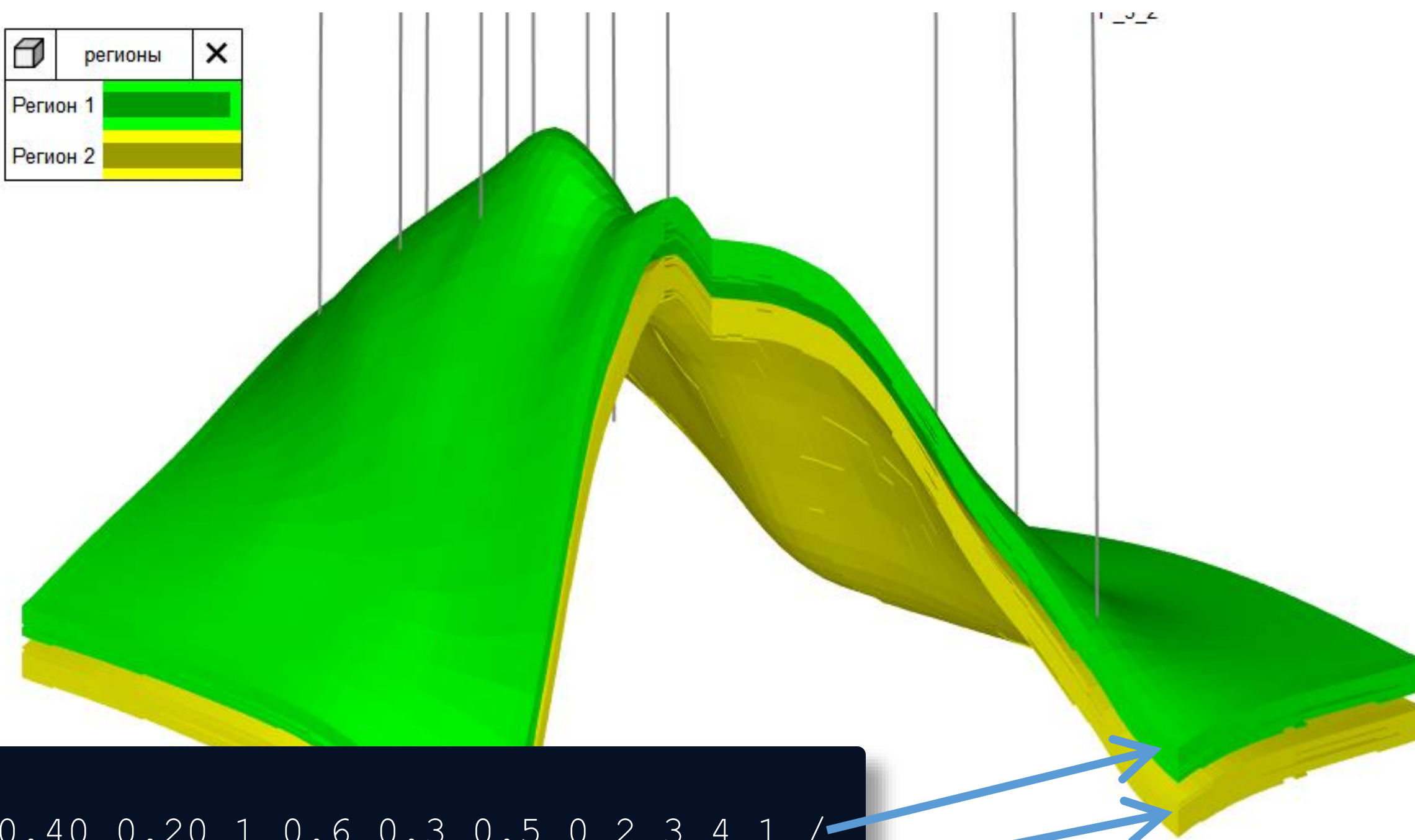
Несколько корреляций

- **Привязка конкретных таблиц к ячейкам сетки**

Целочисленный массив **SATNUM**

Значение в массиве SATNUM –  
порядковый номер таблицы и  
корреляции

регионы	X
Регион 1	
Регион 2	



COREYWO

```
0.30 1 0.40 0.20 1 0.6 0.3 0.5 0 2 3 4 1 /  
0.33 1 0.45 0.19 1 0.6 0.3 0.5 0 2 3 4 1 /  
/
```

# Направленные ОФП

- **Перетоки между ячейками:**

Значения ОФП из ячеек с бОльшим потенциалом

- **Разные ОФП для разных направлений потока**

- **Для каждого направления могут быть заданы отдельные таблицы ОФП в каждой ячейке:**

$X+ (I+)$  – **KRNUMX**

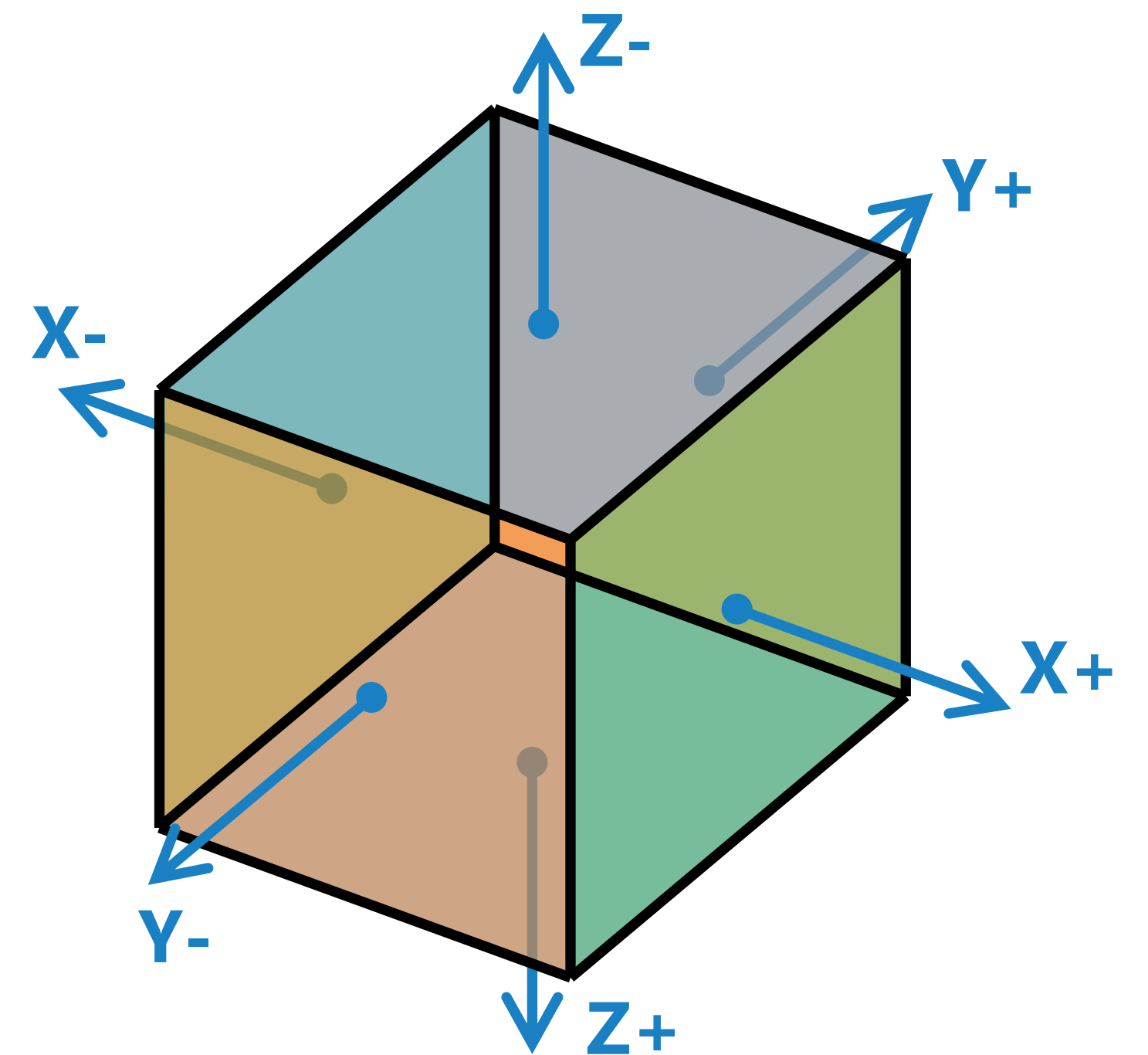
$X- (I-)$  – **KRNUMX-**

$Y+ (J+)$  – **KRNUMY**

$Y- (J-)$  – **KRNUMY-**

$Z+ (K+)$  – **KRNUMZ**

$Z- (K-)$  – **KRNUMZ-**



# Отдельные ОФП для несоседних соединений и ячеек перфорации скважин

- **Переток между ячейками NNC:**

Значения ОФП из ячеек с большим потенциалом

- **Отдельные ОФП для отдельных NNC:**

**EDITNNC** – параметры 8 и 9

- **Приток флюида в скважину:**

Значения ОФП из проперфорированных ячеек

- **Отдельные ОФП для отдельных ячеек перфорации скважин и интервалов перфорации**

**COMPDAT** – параметр 7

**COMPDATMD** – параметр 7

# Масштабирование ОФП

## Масштабирование по насыщенности

---

Разные блоки сетки могут иметь разные значения критических и максимальных насыщенностей. Масштабирование по насыщенности позволяет изменять эти значения, не задавая регионы по ОФП и несколько таблиц. Достаточно одной таблицы.

## Масштабирование по значению

---

Разные блоки сетки могут иметь различные максимальные значения ОФП и капиллярных давлений. Масштабирование по значению позволяет изменять эти значения, не задавая регионы по ОФП и несколько таблиц. Достаточно одной таблицы.

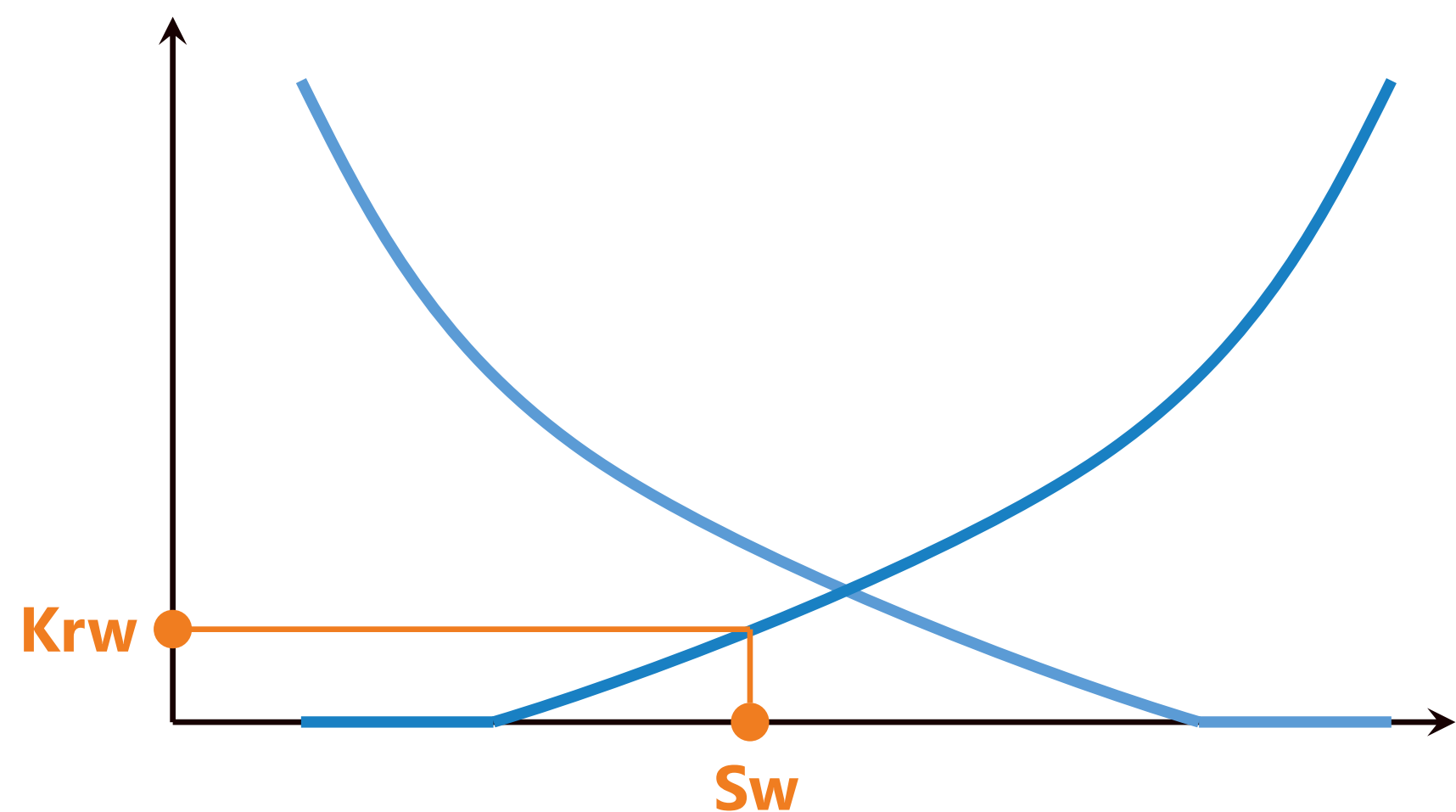
# Содержание

## Относительные фазовые проницаемости

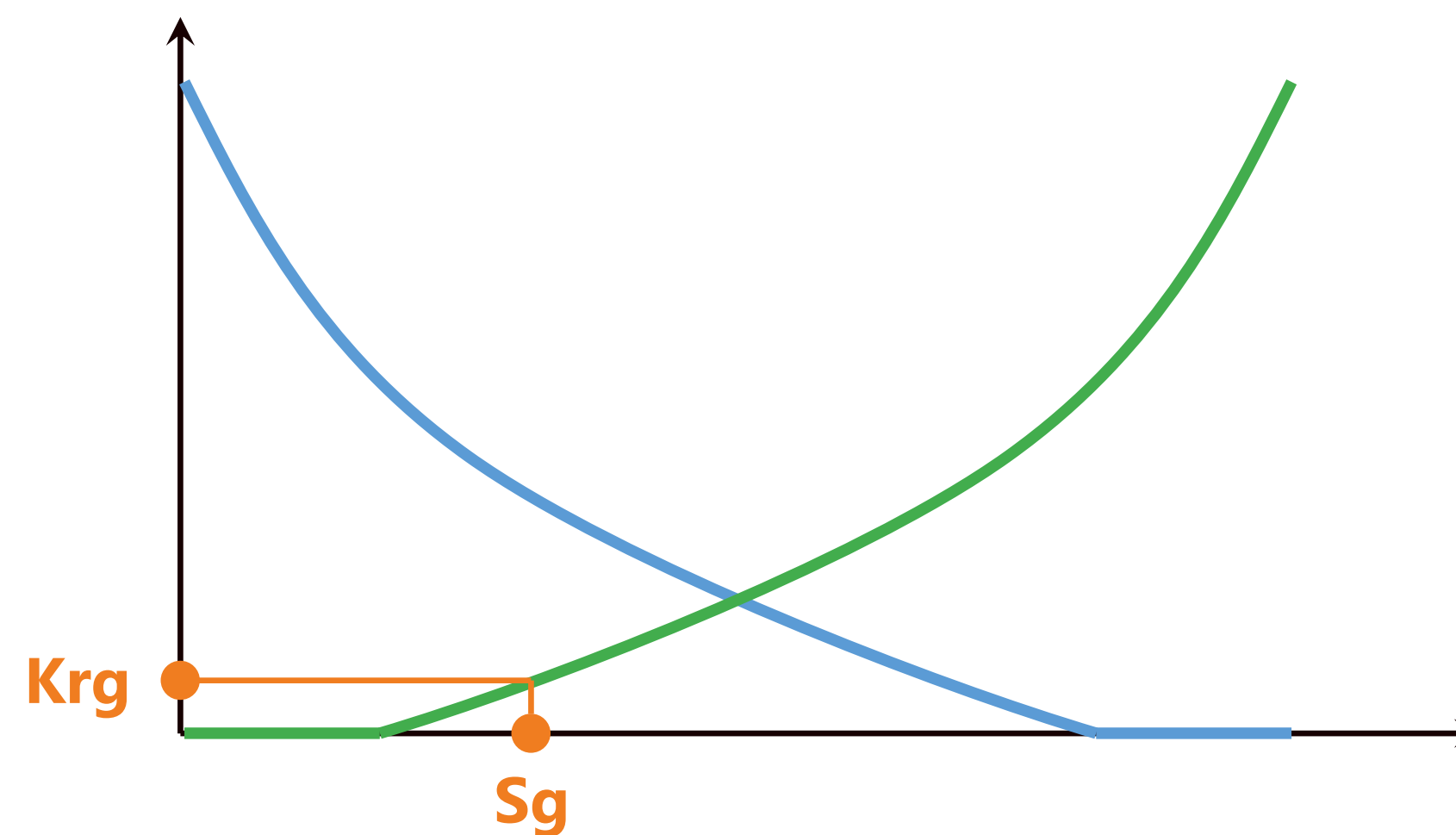
- Общие понятия:  
Проницаемость  
Фазовая проницаемость  
Виды исследований
- Характеристики кривых ОФП
- Аппроксимация кривых ОФП по корреляциям
- **Задание ОФП в гидродинамических моделях**
- Получение значений ОФП в процессе расчета

# Получение значений ОФП в процессе расчета Смачивающая и несмачивающая фазы

Нефть – Вода  
Определение ОФП воды



Газ – Нефть  
Определение ОФП газа

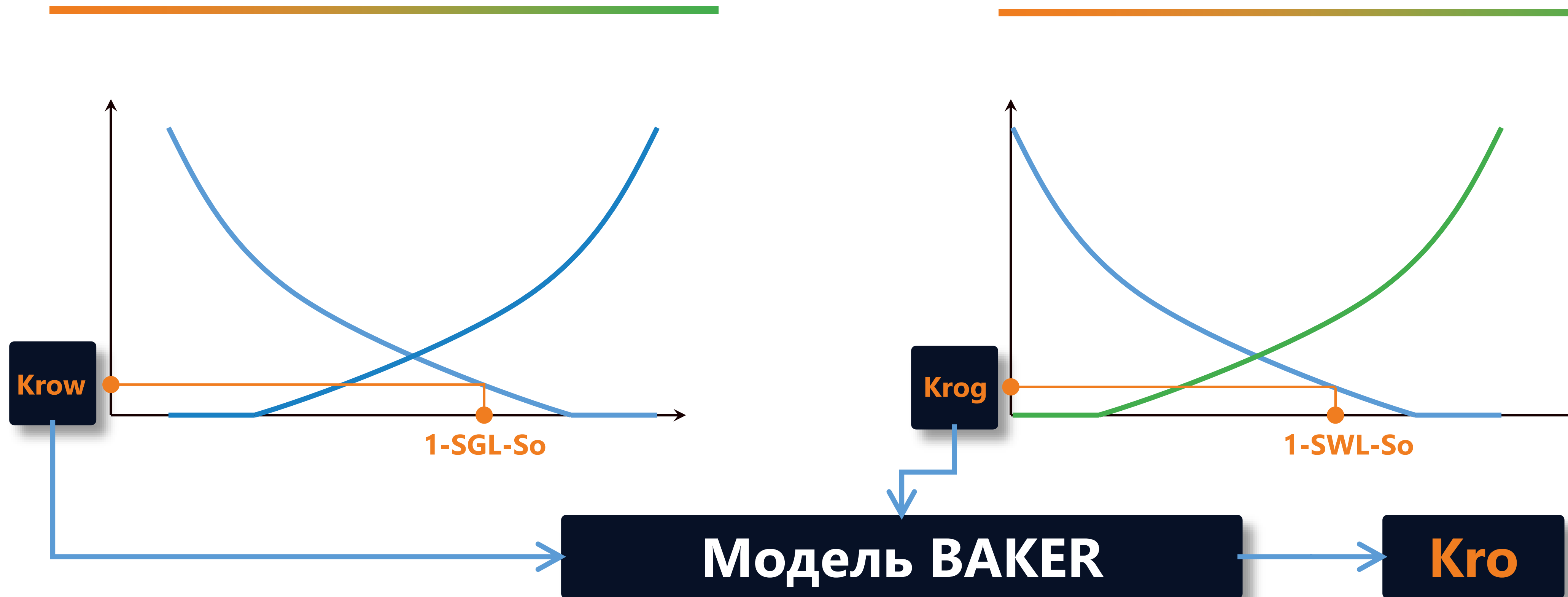


# Получение значений ОФП в процессе расчета

## Промежуточная фаза – модель BAKER

Нефть – Вода

Газ – Нефть

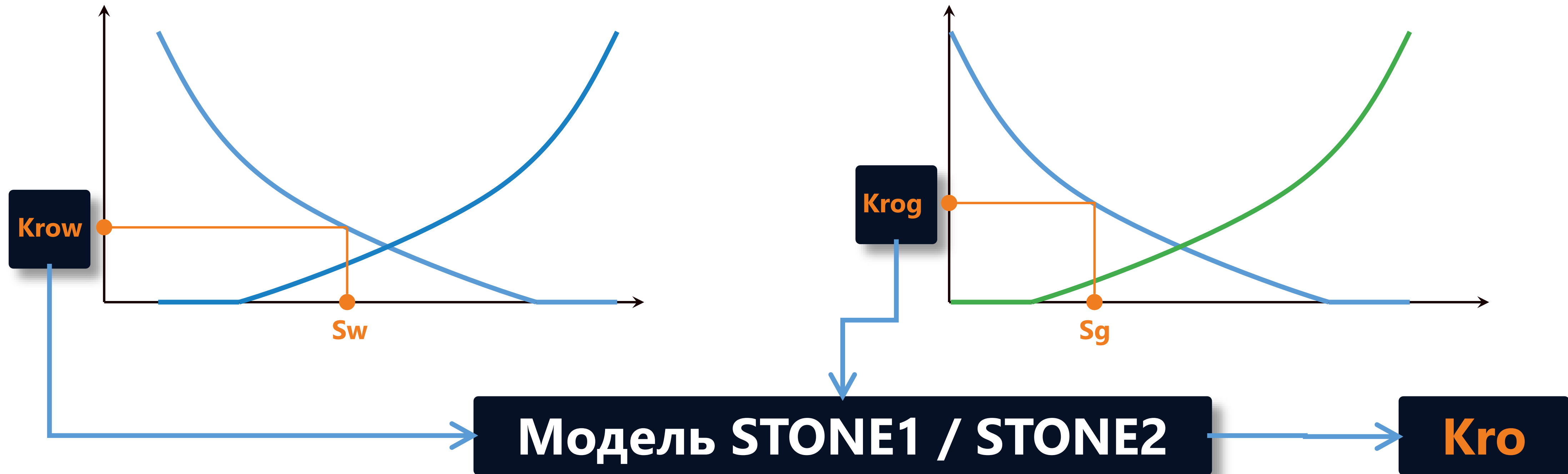




# Получение значений ОФП в процессе расчета Промежуточная фаза – модели STONE1 и STONE2

Нефть – Вода  
Определение ОФП воды

Газ – Нефть  
Определение ОФП газа



# Основные выводы:

- **Относительные фазовые проницаемости – один из важнейших параметров модели**
- **ОФП влияют на большое количество начальных и динамических параметров модели**
- **В тНавигатор есть широкие возможности по подготовке данных ОФП при создании ГДМ**
- **Поддержка разных форматов ОФП предоставляют гибкость при задании данных в модель**