

**Модель  
фильтрации  
Бакли-Левретта и  
применение этой  
модели в  
подземной  
гидромеханике**

# Практическая важность изучения двухфазных течений в пористых средах

*При проектировании и анализе разработки нефтяных и газовых месторождений приходится исследовать совместное течение в пористой среде нескольких жидкостей.*

*При разработке нефтяных и газовых месторождений практически всегда возникает двух- или трехфазное течение, поскольку силы, движущие нефть, являются следствием упругости или гидродинамического напора газа и воды.*

# Теория двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей

В случае одномерного течения несжимаемых несмешивающихся жидкостей в условиях, когда поверхностное натяжение между фазами невелико и можно пренебречь капиллярным давлением, а также влиянием силы тяжести, процесс вытеснения допускает простое математическое описание, предложенное С. Бакли и М. Левереттом. Их описание основано на понятиях насыщенности и относительных фазовых проницаемостей и использовании обобщенного закона Дарси.

**Относительная фазовая проницаемость** – отношение проницаемости породы для одной из фаз, движущейся в порах многофазной системы, к абсолютной проницаемости.

**Насыщенность** порового пространства некоторой  $i$ -й фазой ( $S_i$ ) – доля объема пор в элементарном макрообъеме, охватывающем данную произвольную точку, занятого  $i$ -й фазой.

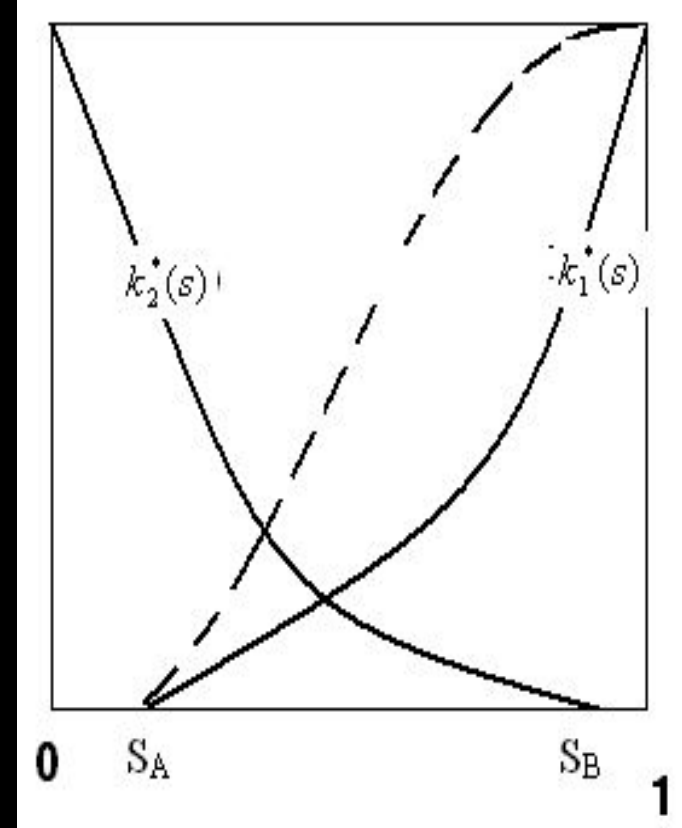
**Скорость фильтрации** – объемный расход жидкости, приходящийся на единицу поперечного сечения пласта, - фиктивная скорость, с которой двигалась бы жидкость, если бы пористая среда отсутствовала и движение происходило в свободном пространстве, ограниченном кровлей и подошвой пласта.

# Фазовые проницаемости

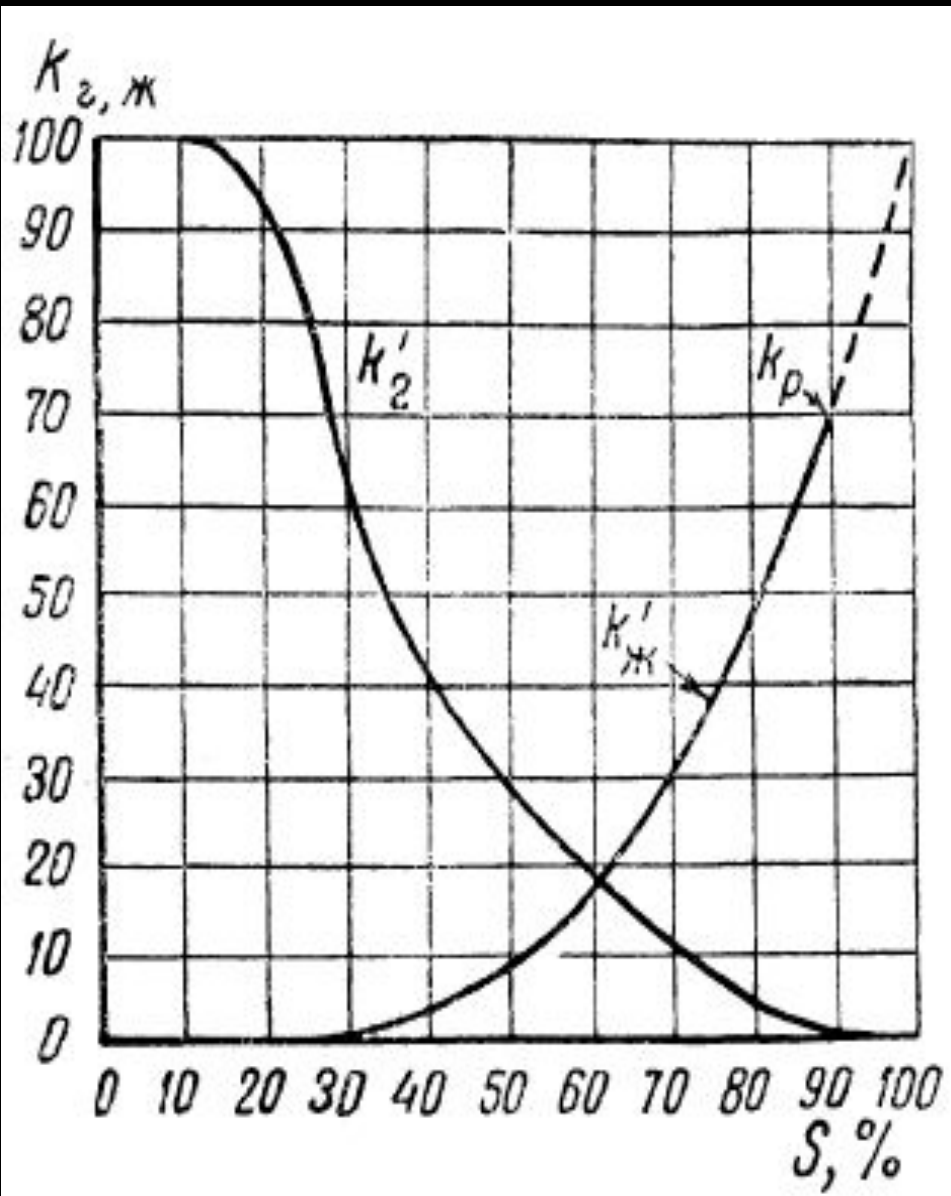
Приведены типовые кривые относительных фазовых проницаемостей для двухфазной смеси. Показаны безразмерные относительные фазовые проницаемости;

$k$  — проницаемость для однородной жидкости;  $S_A$  — связанная компонента первой фазы (для воды обычно около 20%). Движение этой фазы возможно при условии  $S > S_A$ .

Для второй фазы связанная компонента равна  $1 - S_B$

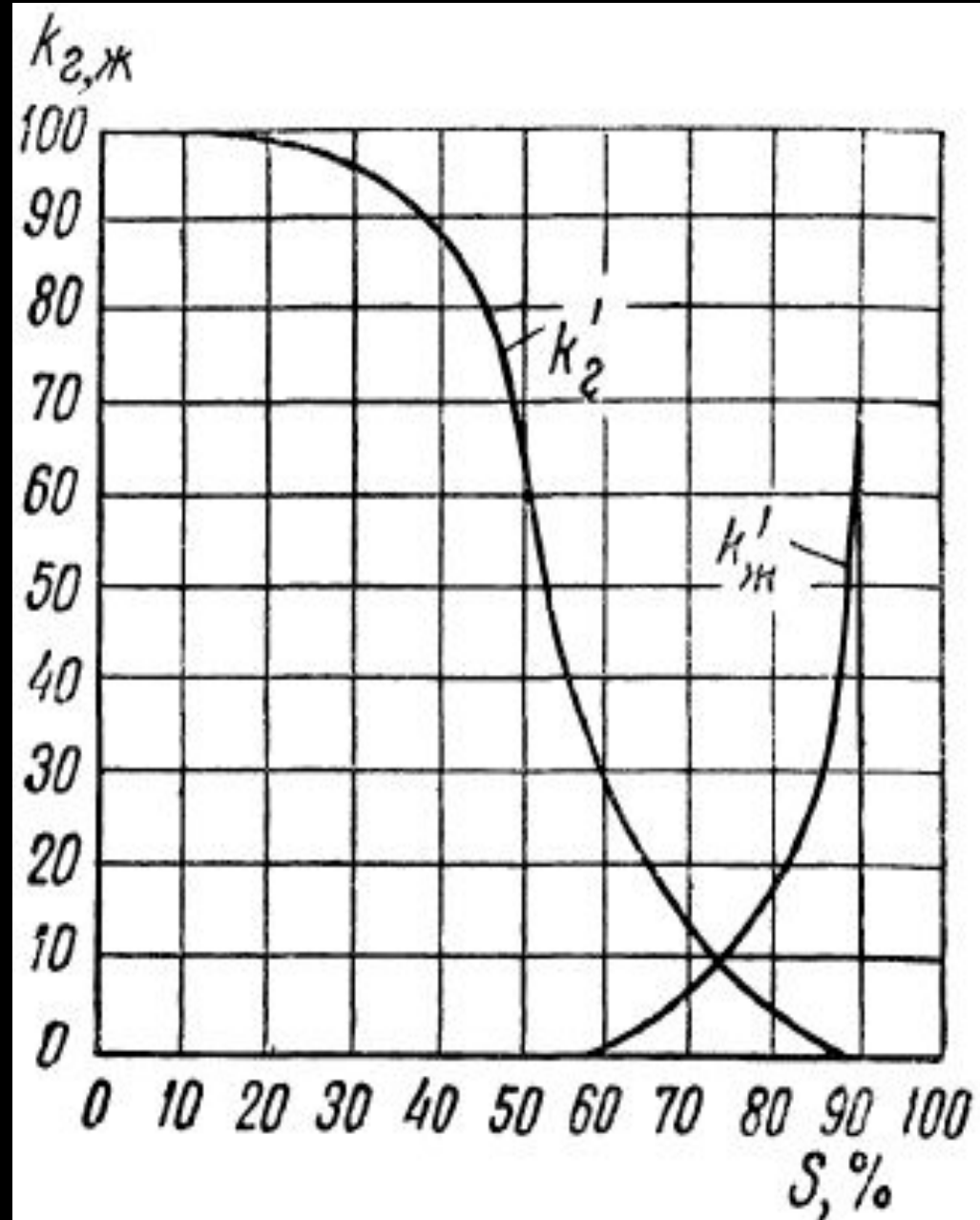


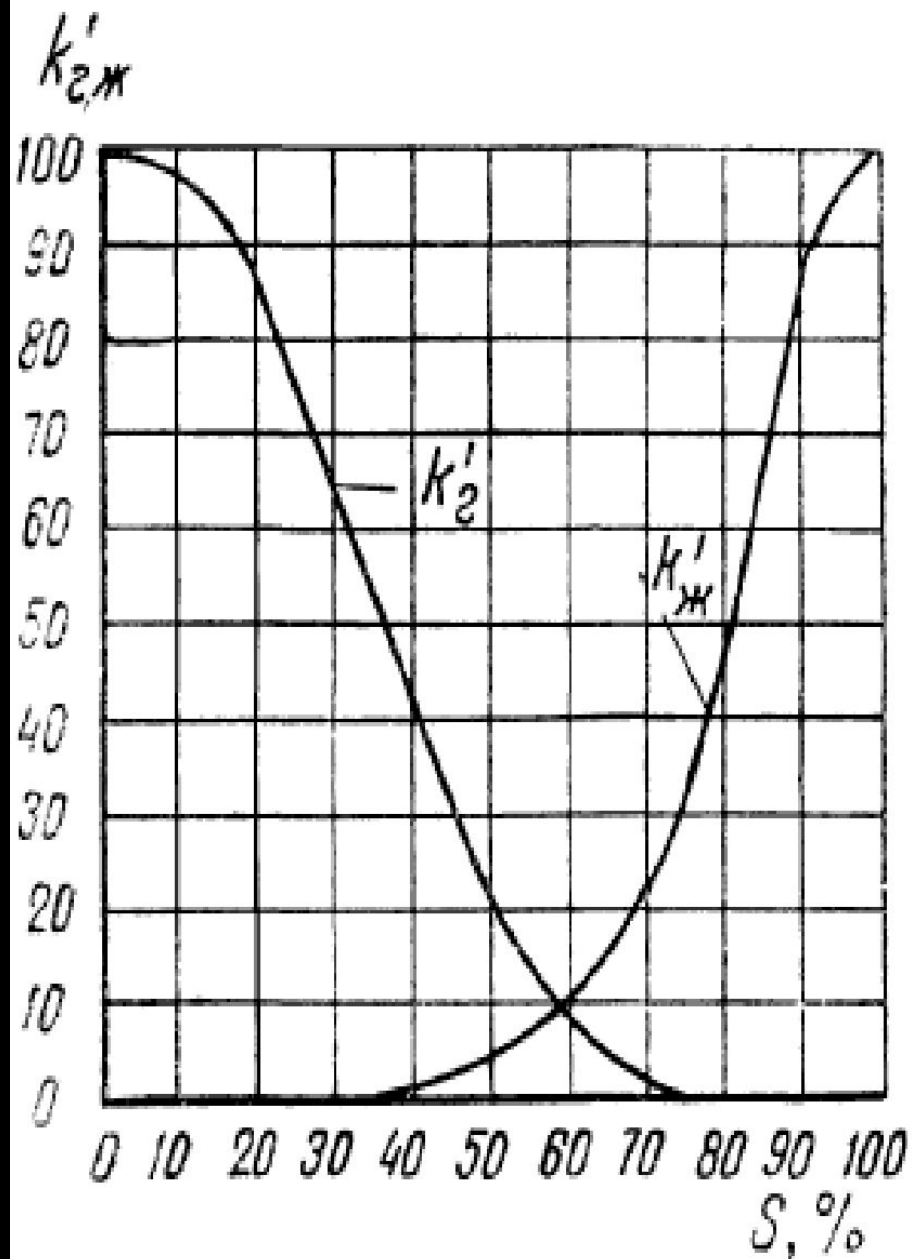
# Графики фазовых проницаемостей



Зависимость фазовых проницаемостей от насыщенности жидкостью порового пространства несцементированных песков

Зависимость фазовых проницаемостей от насыщенности жидкостью порового пространства сцементированных песков (песчаников)





Зависимость фазовых проницаемостей от насыщенности жидкостью порового пространства известняков и доломитов



# Анализ графиков фазовых проницаемостей

При наличии в поровом пространстве несцементированных песков и известняков до 20% жидкости ( $S = 20\%$ ), а в порах песчаников (сцементированных песков) до 50% жидкости, фазовая проницаемость для жидкой фазы газированной жидкости  $k'_{ж}=0$ , а относительная проницаемость для газообразной фазы смеси  $k'_г = 90\%$  для несцементированных песков и известняков и  $k'_г = 98\%$  для песчаников (при  $S = 20\%$ , а при  $S = 50\%$  имеем  $k'_г = 65\%$  для песков-песчаников) Таким образом, жидкость, скопясь в порах, мало мешает прохождению газа.

При содержании в порах песка и песчаника до **20%** газа, а в порах известняка до **30%** газа фазовая проницаемость для газа мала, т.е. газ почти целиком остается в порах, но в отличие от жидкости он сильно мешает фильтрации жидкости, снижая относительную проницаемость  $k'_ж$  до ~ **20%** для известняков, до **48%** для нецементированных песков и до ~ **18 %** для песчаников. Это указывает на отрицательные черты эксплуатации нефтяных месторождений при режиме растворенного газа, поскольку характерное для этого режима наличие в поровом пространстве пласта пузырьков окклюдированного газа приводит к указанному чрезвычайно резкому уменьшению фазовой проницаемости пласта для нефти.

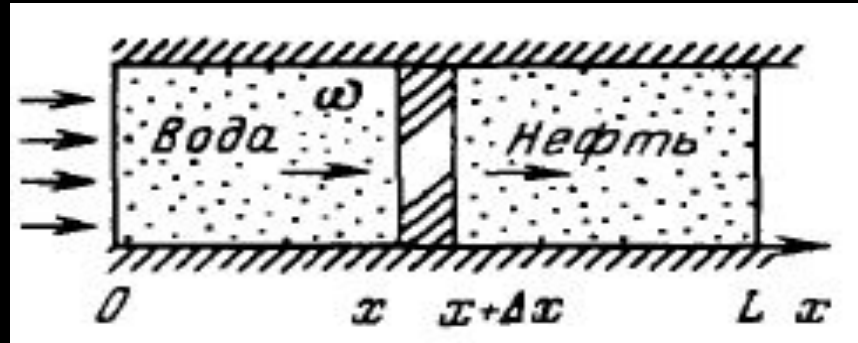
# Анализ одномерных течений позволяет:

- выявить основные эффекты совместной фильтрации двух жидкостей;
- выявить характерные особенности совместной фильтрации двух жидкостей;
- сопоставить полученные данные с результатами лабораторных экспериментов.

# Модель основана на следующих допущениях :

- 1. Процесс вытеснения рассматривается в прямолинейном тонком горизонтальном образце;
- 2. Образец состоит из однородной и изотропной пористой среды (пористость и проницаемость постоянны);
- 3. Поперечное сечение образца настолько мало, что давление и насыщенность можно считать постоянными по сечению;
- 4. Давление  $p$  в нефтяной и водяной фазах одинаковы в силу пренебрежения капиллярным давлением;
- 5. Обе фазы несжимаемы, их температура постоянна;

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ОДНОЙ ЖИДКОСТИ ДРУГОЙ



проведение эксперимента:

1. В рассматриваемый образец через сечение  $x=0$  закачивается вода. 2. В процессе вытеснения образуется зона совместного движения воды и нефти.
3. Образуется связная система.
4. Из-за избирательной смачиваемости твердой породы водой площадь контакта каждой из фаз со скелетом пористой среды значительно превышает площадь контакта фаз между собой. Это позволяет считать, что основной вклад в сопротивление движению дает взаимодействие каждого флюида с твердым скелетом пласта, и пренебречь эффектом увлечения одной жидкостью другой.

# По дифференциальному закону Дарси закон фильтрации для каждой из фаз:

Для воды :

Для нефти:

где  $w_v$  ,  $Q_v$  и  $w_n$ ,  $Q_n$  – скорости фильтрации и объемные расходы соответственно воды и нефти;  $\eta_v$  ,  $\eta_n$  - коэффициенты динамической вязкости фаз;  $k_v(s)$  и  $k_n(s)$ - относительные фазовые проницаемости;  $s = s_v$  – водонасыщенность

# Для вывода уравнения неразрывности рассмотрим баланс водной фазы в макрообъеме :

Через сечение с координатой  $X$  за промежуток времени  $\Delta t$  втекает в объем  $\Delta V$  масса воды

А вытекает через сечение  $X+\Delta X$  масса, равная

изменение массы воды в объеме  $\Delta V$  за время  $\Delta t$  равно :

где

## продолжение

- С другой стороны, это изменение массы должно быть сбалансировано за счет изменения во времени водонасыщенности в поровом объеме  $m\Delta V$  :

приравняв выражения для изменения массы и разделив обе части на  $\rho_v\Delta V\Delta t$  , получим: (1)

Аналогично для нефти:

или

(2)



продолжение

Сложив уравнения неразрывности для обеих фаз (1 и 2), получаем:



Эти равенства показывают, что суммарная скорость  $w$  и суммарный расход фаз  $Q$  не зависят от координаты и является либо постоянной величиной, либо известной функцией времени.

# Функция Бакли-Левверетта

1. Поделим почленно одно на другое уравнения

и

2. Получим

где

3. Применив к последнему равенству выражение суммарных скорости фильтрации и дебита, получим:

Введем функцию  $f$  :

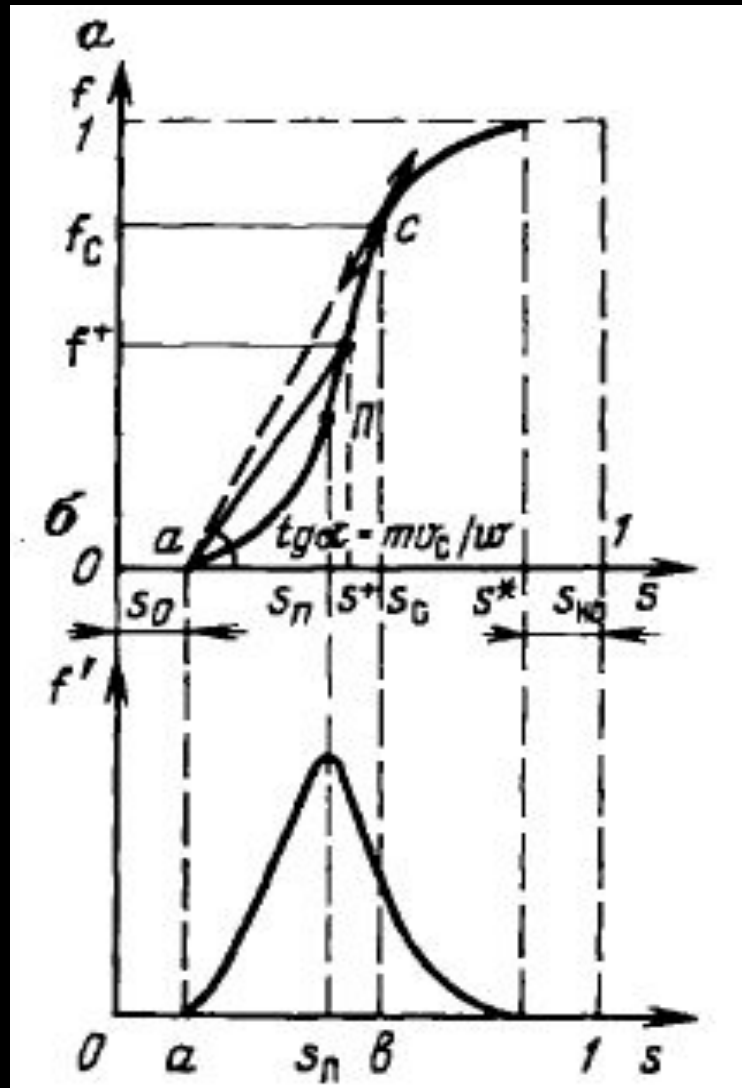
## ■ **Функция**

**называется функцией  
распределения потоков фаз  
или функцией Бакли-  
Левретта**

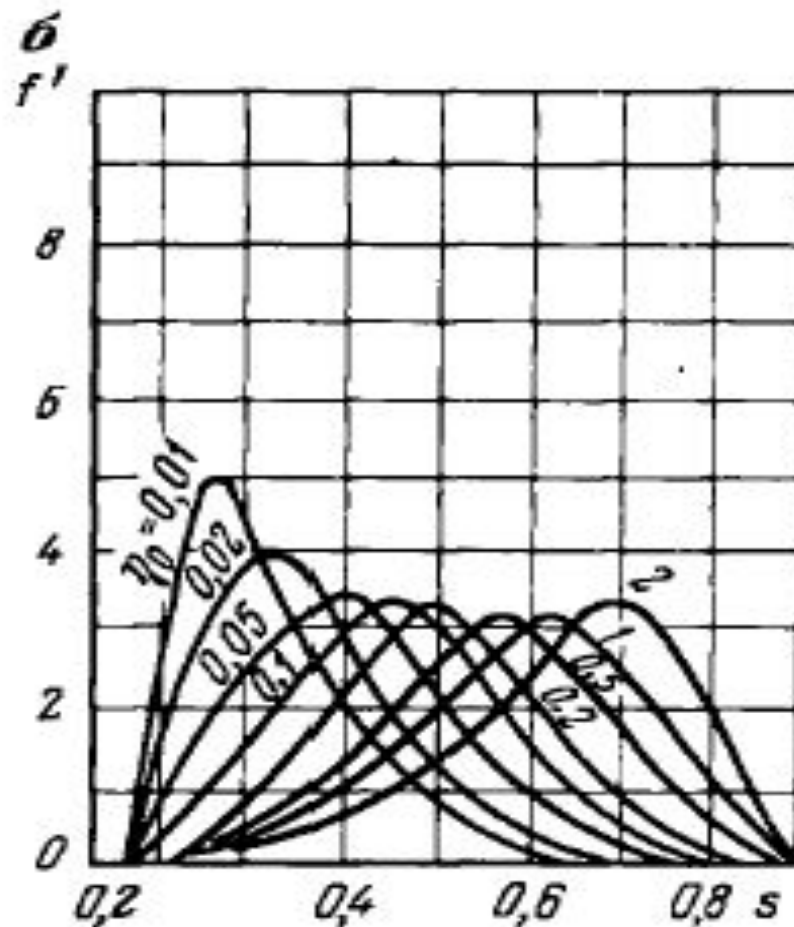
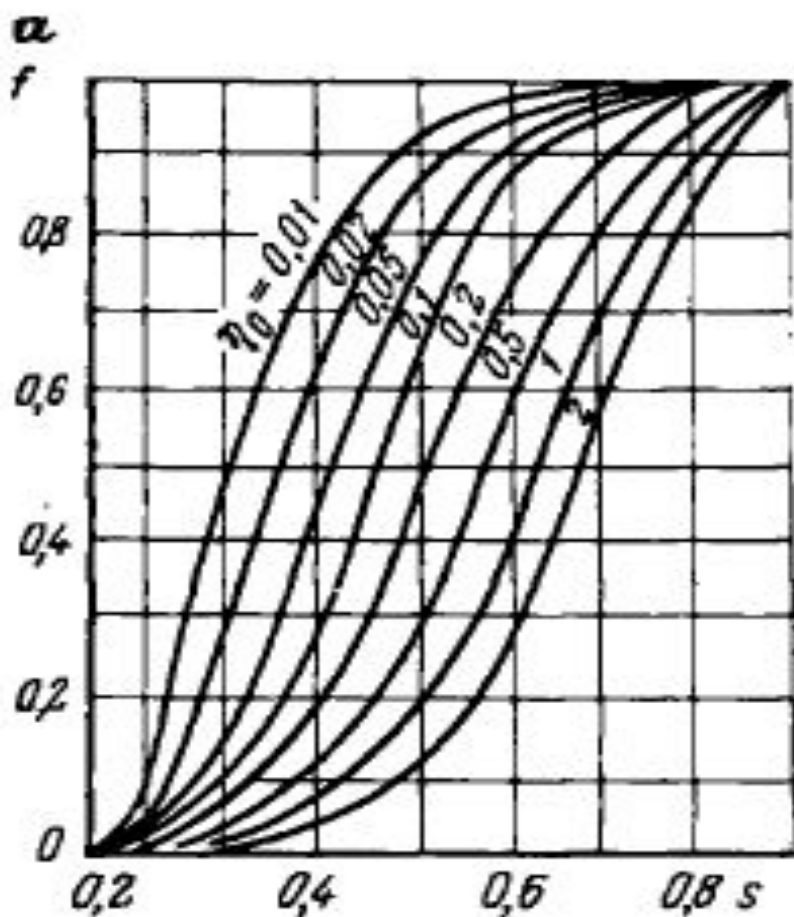
# Физический смысл функции Бакли-Левретта:

$f(s)$ , представляющая отношение скорости фильтрации (или расхода) вытесняющей фазы (воды) и суммарной скорости  $w(t)$  (или расхода  $Q(t)$ ), равна объемной доле воды в суммарном потоке двух фаз.

# Типичные графики $f(s)$ и ее производной $f'(s)$



# Графики функции Бакли-Лeverетта (а) и ее производной (б) для различных отношений коэффициентов вязкости



Производная функции Бакли-Левретта  $f'(s)$  определяет скорость распространения насыщенности заданной величины. Одному и тому же значению  $f'(s)$  соответствует два разных значения насыщенности  $s$ . Это означает, что, начиная с некоторого момента, распределение насыщенности становится многозначным, чего физически невозможно. Многозначность означает, что в зоне движения двухфазной жидкости имеет место скачок насыщенности. Насыщенность на скачке называется **фронтальной насыщенностью**.

# **Модель фильтрации Бакли-Левретта позволяет решать следующие задачи:**

- 1. Определение фронтальной насыщенности;**
- 2. Определение средней насыщенности в безводный период добычи;**
- 3. Расчет средней насыщенности после прорыва воды;**
- 4. Расчет коэффициента нефтеотдачи.**

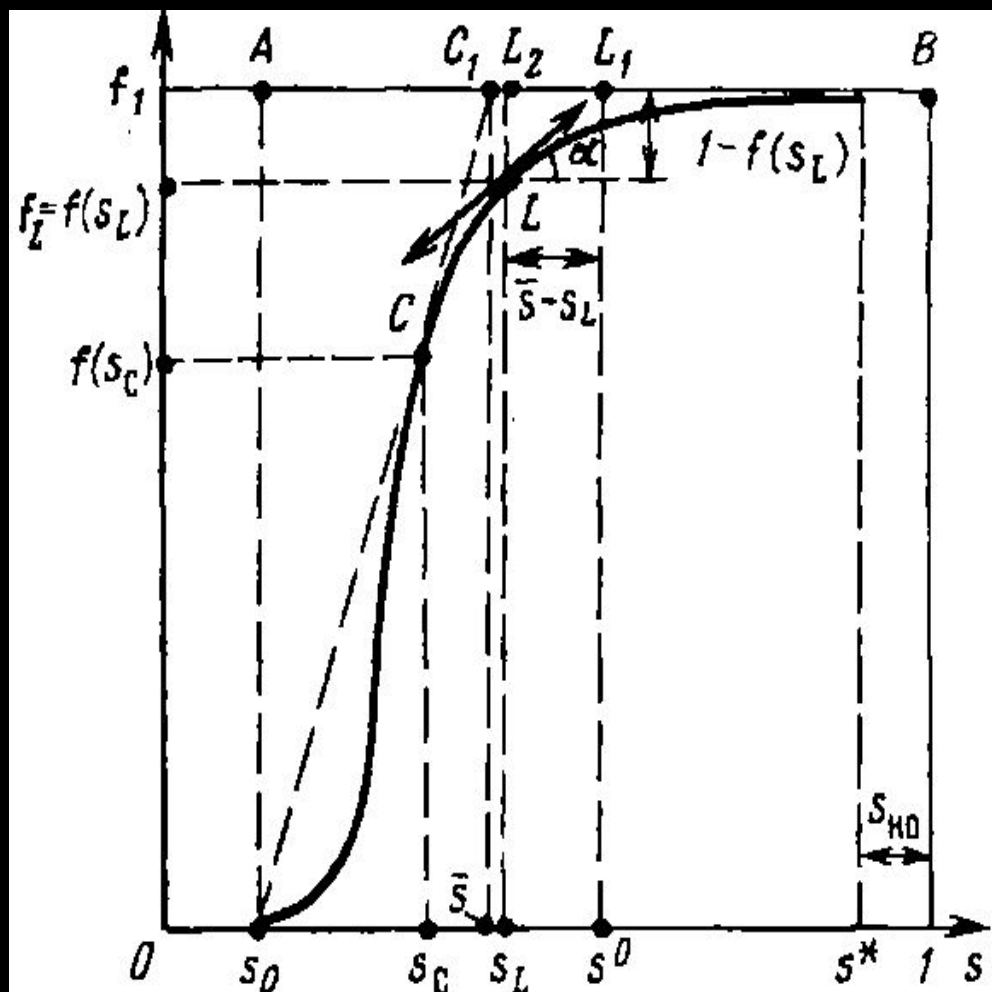


# ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЯ БАКЛИ-ЛЕВЕРЕТТА

1. фронтальная насыщенность  $S_c$  возрастает с ростом отношения коэффициентов вязкости  $\eta_0$ :

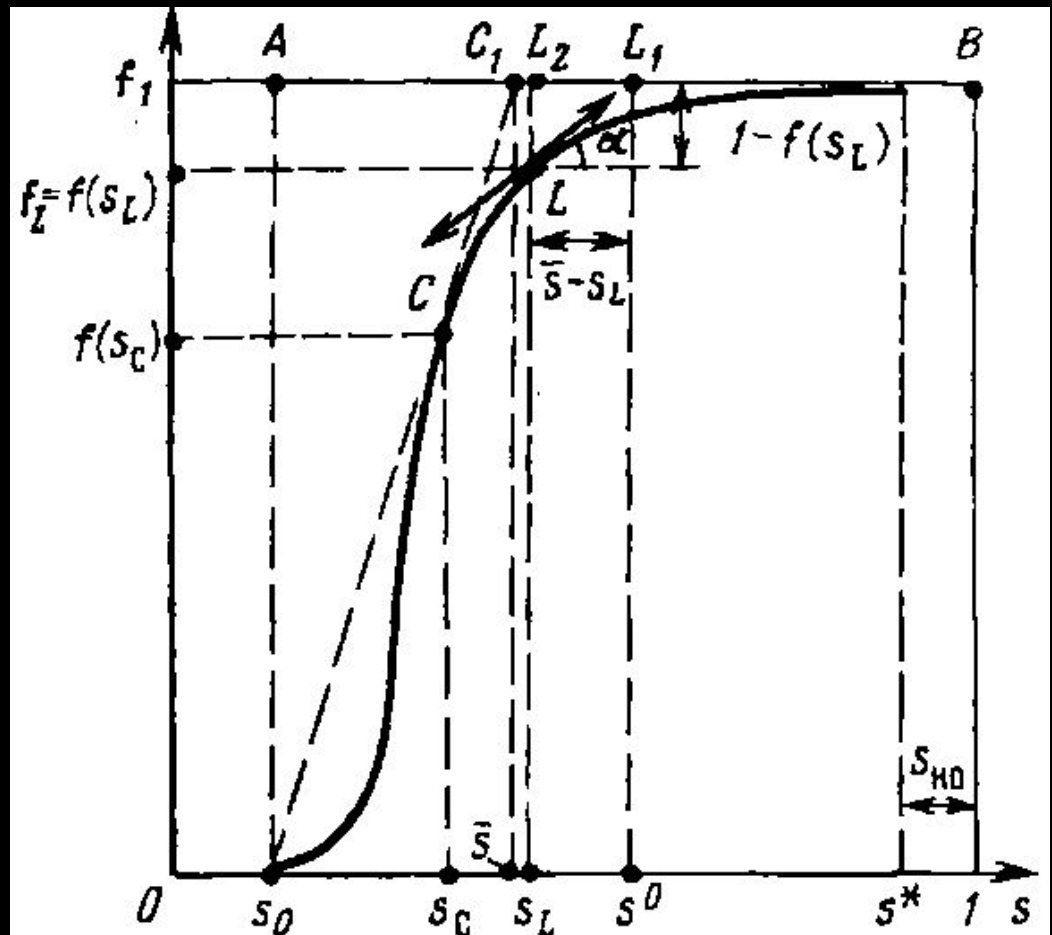
эффективность вытеснения возрастает с ростом вязкости  $\eta_v$  вытесняющей жидкости и уменьшением вязкости  $\eta_n$  вытесняемой нефти .

Графически определяется как абсцисса точки касания  $C$  прямой к графику  $f(s)$



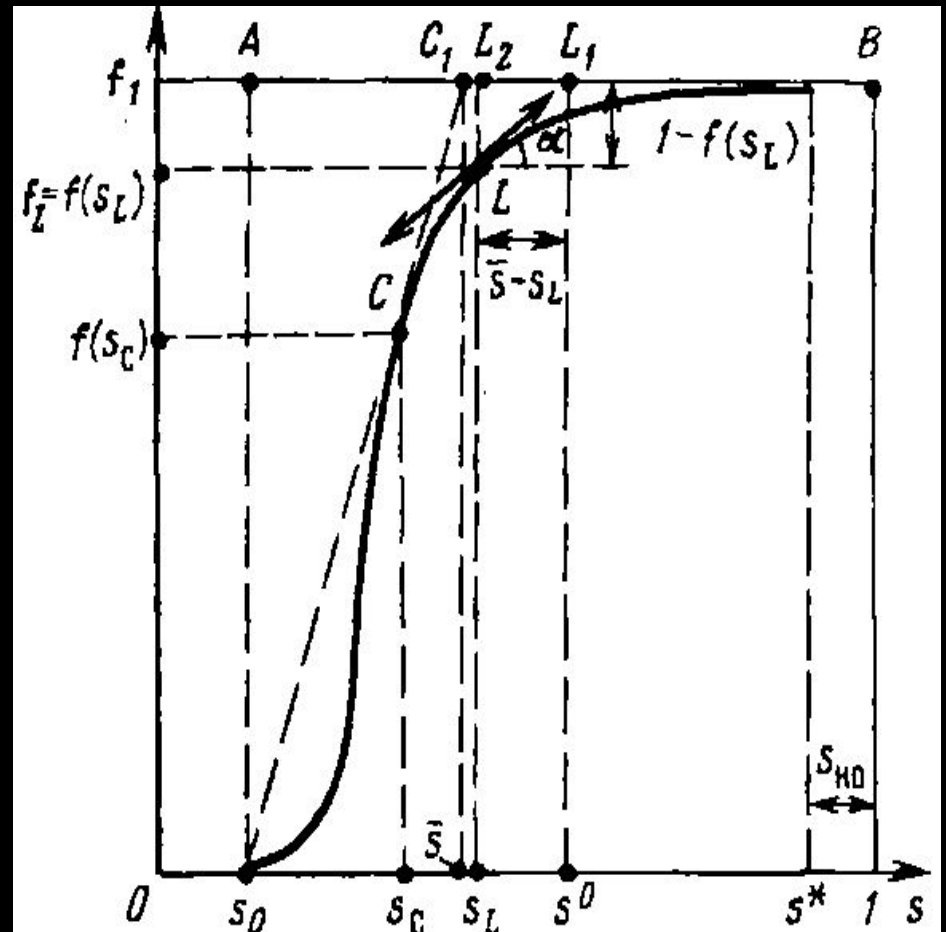
## 2. Определение средней насыщенности в безводный период добычи :

средняя насыщенность — это абсцисса точки пересечения **C1** касательной к кривой **f(s)**, определяющей фронтальную насыщенность, с прямой **f=1**:



### 3. Расчет средней насыщенности после прорыва воды :

средняя водонасыщенность после прорыва воды есть абсцисса точки пересечения  $L_1$  касательной, проведенной к точке  $(s_L, f(s_L))$ , с прямой  $f=1$  :



Точка  $L$  с координатами  $(s_L, f_L)$

# 4. Расчет коэффициента безводной нефтеотдачи.

Для модельных относительных фазовых проницаемостей

и соответствующей функции распределения фаз

получено выражение для коэффициента нефтеотдачи :

где

Коэффициент безводной нефтеотдачи увеличивается при увеличении вязкости вытесняющей фазы или уменьшении вязкости вытесняемой фазы.

