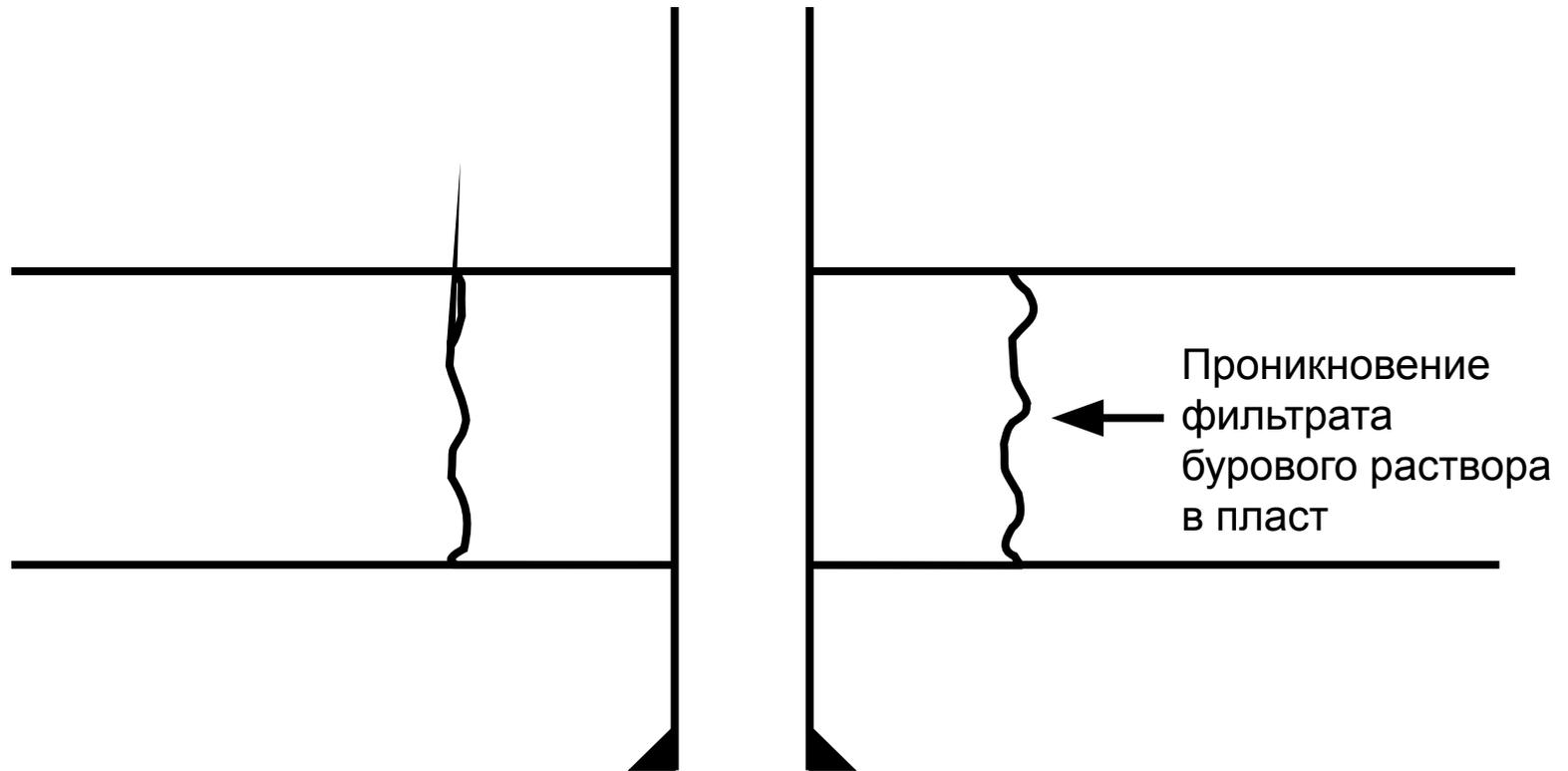


СКИН - фактор

Причины изменения фильтрационных свойств призабойной зоны:

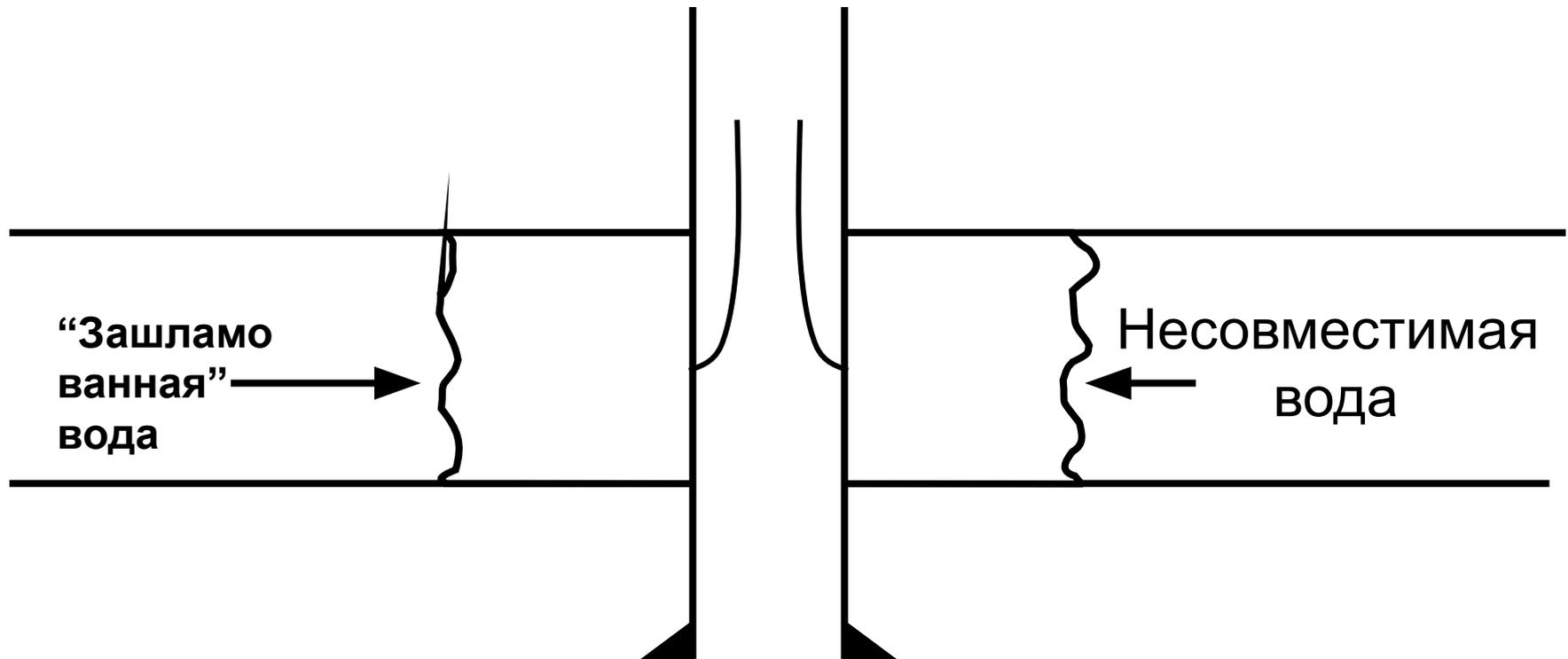
- 1) Кольматирование буровым раствором;**
- 2) Осаждение солей из-за несовместимости пластовой и нагнетаемой воды.**
- 3) Разрушения естественного цемента пласта и вынос его в призабойную зону.**
- 4) Гидроразрыв пласта.**
- 5) Проведение кислотных обработок**
- 6) Торпедирование**

Повреждения, вызванные закачкой бурового раствора



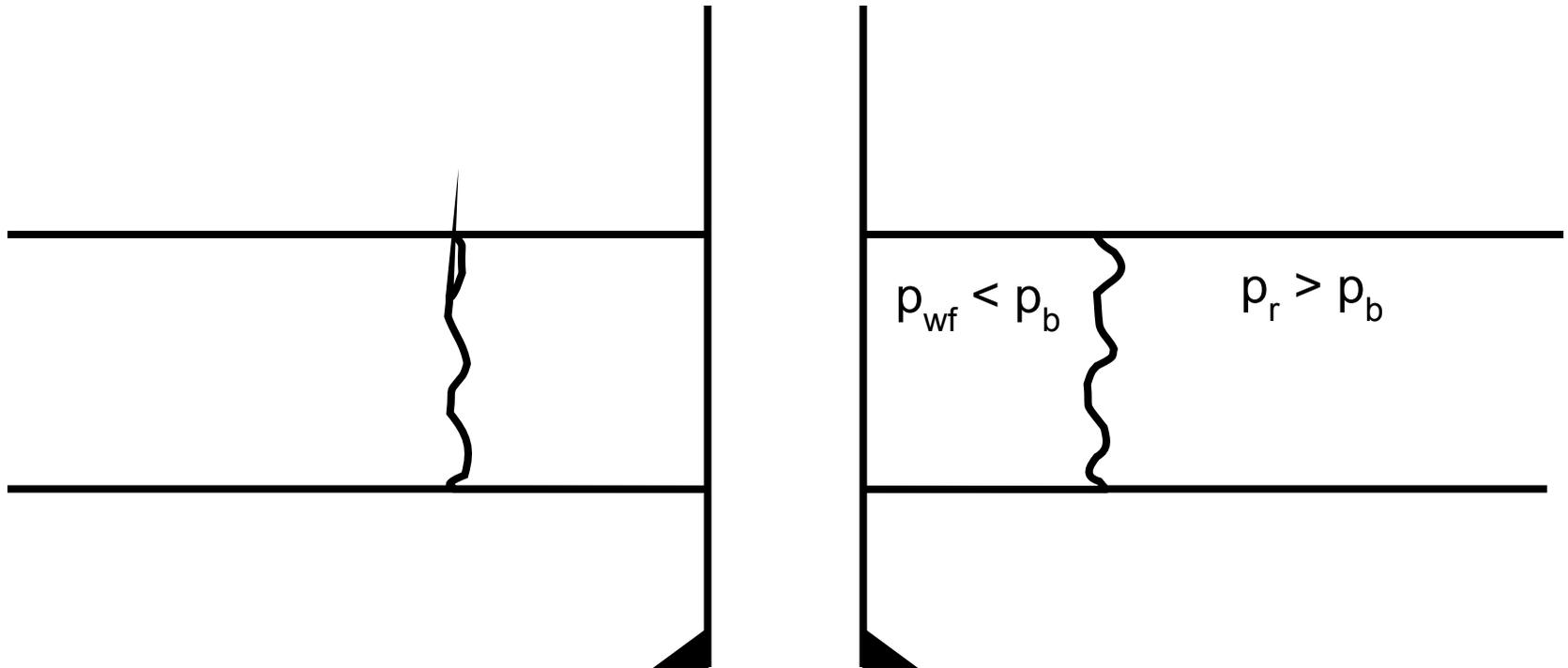
- Проникновение фильтрата бурового раствора сокращает эффективную проницаемость в призабойной зоне.
- Буровой фильтрат может вызвать разбухание глин, что приведет к повреждению.

Повреждения при закачке



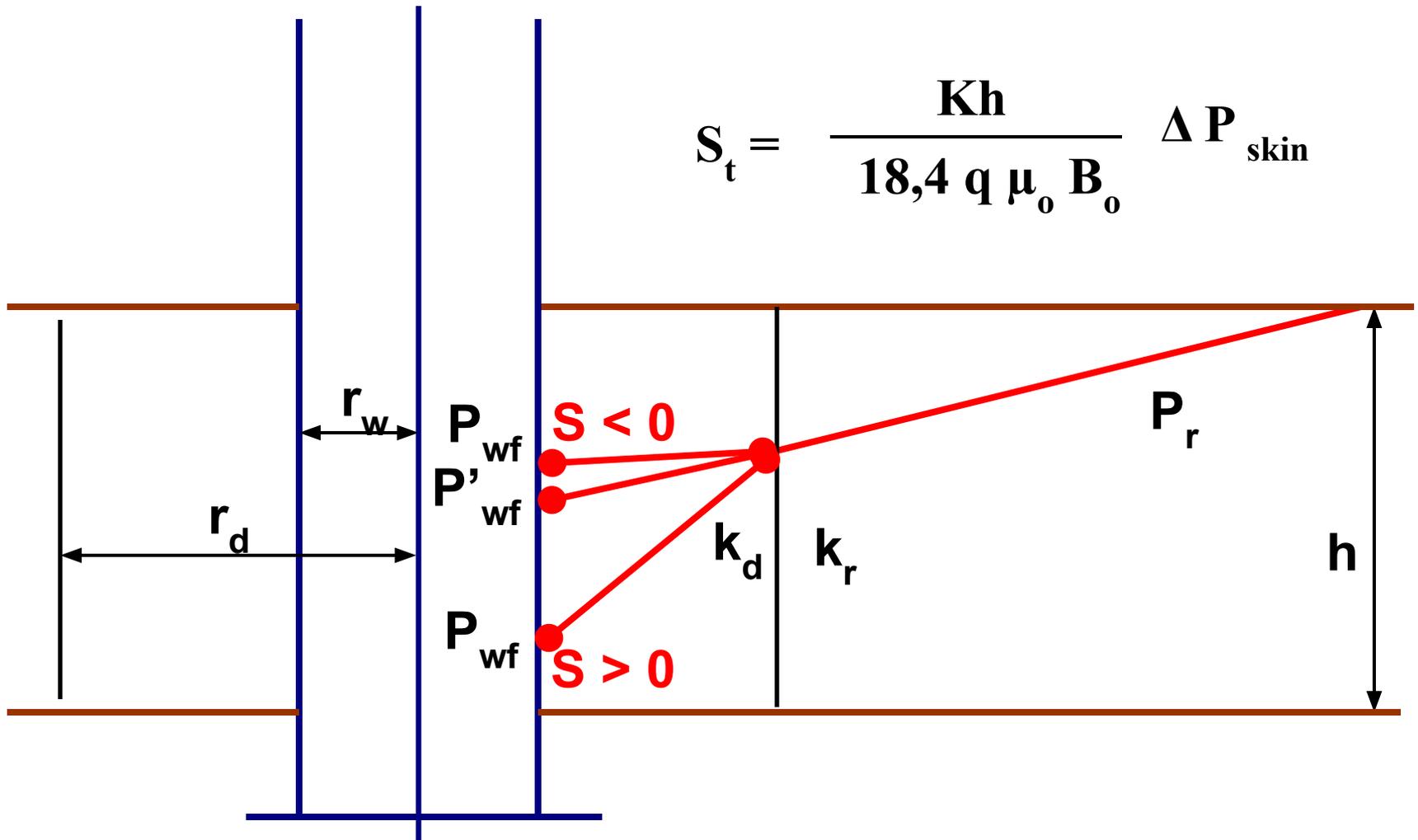
- Закачиваемая вода может быть «грязной» – мелкие частицы могут закупорить отверстия перфораций.
- Закачиваемая вода может быть несовместимой с пластовой водой – может вызвать образование осадков и закупорить отверстия перфораций.
- Закачиваемая вода может оказаться несовместимой с глинистыми минералами пласта; вода может дестабилизировать некоторые глины, вызывая движение мелких частиц и закупоривая отверстия перфораций.

Повреждения в результате добычи



- В нефтеносном пласте околоскважинное давление может быть ниже давления насыщения. При этом происходит выделение свободного газа, который снижает эффективную проницаемость по нефти в околоскважинной зоне.
- В ретроградном газоконденсатном коллекторе околоскважинное давление может быть ниже точки росы. При этом образуется неподвижное конденсатное кольцо, что снижает эффективную проницаемость по газу в околоскважинной зоне.

Модель скин-эффекта



Скин-фактор – безразмерная величина, связывающая изменение давления в прискважинной зоне, дебит и гидропроводность породы

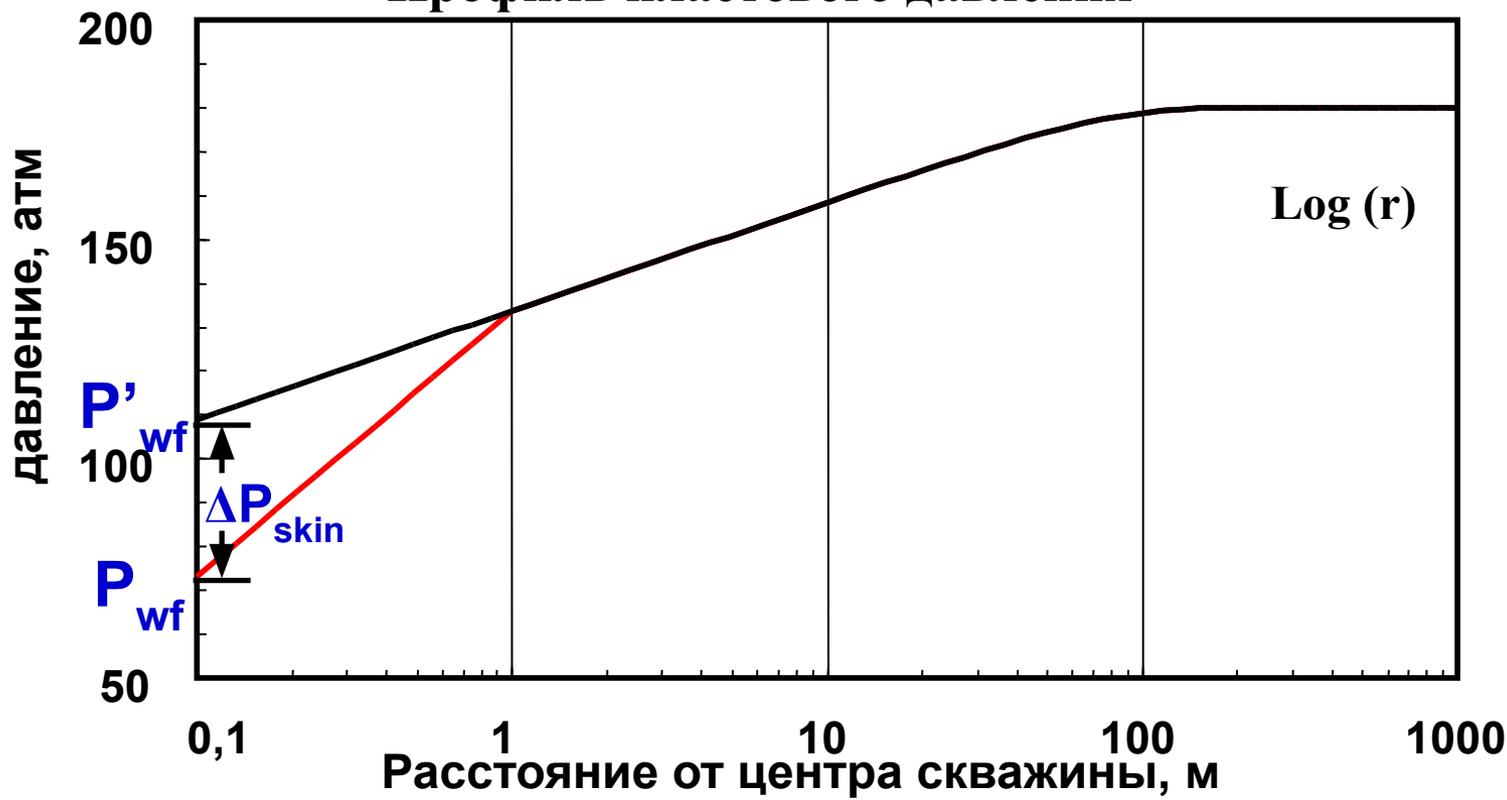
Хорнер выразил скин-фактор через дополнительное падение давления в результате повреждения:

$$\Delta P_{\text{skin}} = 0.87 m S_t = (P'_{\text{wf}} - P_{\text{wf}})$$

где m – наклон полулогарифмической прямой Хорнера,
 S_t – суммарный скин-эффект

$$S_t = \Delta P_{\text{skin}} / 0.87 m = (P'_{\text{wf}} - P_{\text{wf}}) / 0.87 m$$

Профиль пластового давления



S_t – суммарный скин-эффект - совокупность скин-эффектов, возникших по различным причинам:

$$S_t = S_d + S_p + S_{pp} + S_{turb} + S_o + S_s + \dots$$

S_d – скин-эффект вследствие повреждения породы (+)

S_p – скин-эффект из-за перфорации (+)

S_{pp} – скин-эффект вследствие частичного проникновения скважины в пласт (+)

S_{turb} – скин-эффект вследствие турбуленции или скин, зависящий от темпа отбора (+)

S_o – скин-эффект вследствие наклона скважины (-)

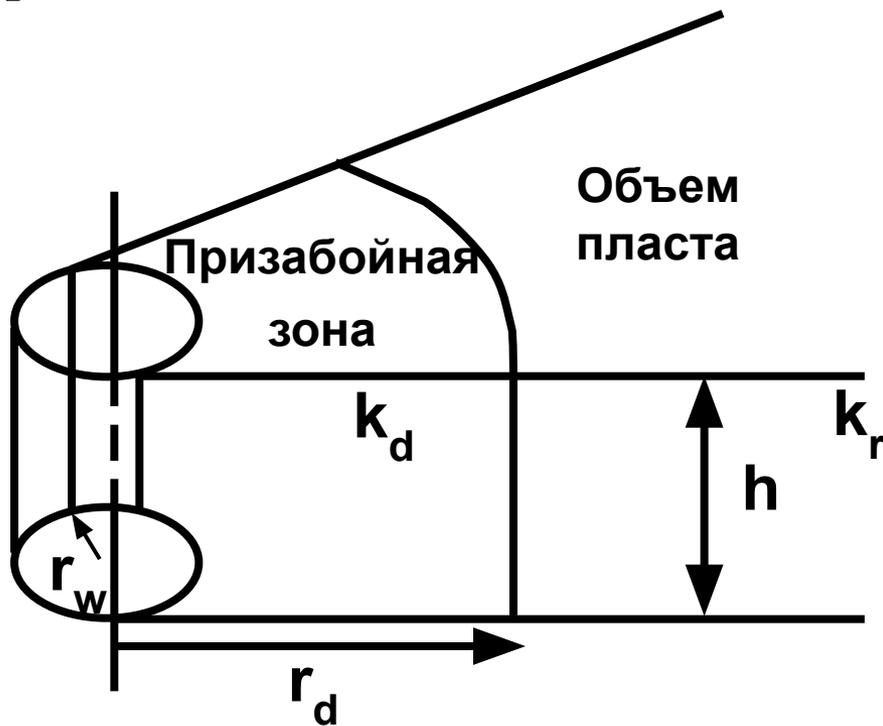
S_s – скин-эффект, возникающий вследствие стимуляции (-)

Скин-эффект вследствие повреждения породы S_d в лучшем случае может быть уменьшен до нуля (например - кислотной обработкой).

Отрицательный скин возникает вследствие образования трещин (гидро разрыв).

Скин-фактор и свойства призабойной зоны

Используя концепцию скина как кольцеобразной зоны вокруг скважины с измененной проницаемостью, Хокинс построил модель скважины, как показано на рисунке. Скин-фактор может быть вычислен с помощью свойств призабойной зоны.



$$S_d = \left(\frac{k_r}{k_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right)$$

k_r – проницаемость коллектора

k_d – проницаемость измененной зоны

r_d – радиус измененной зоны

r_w – радиус скважины

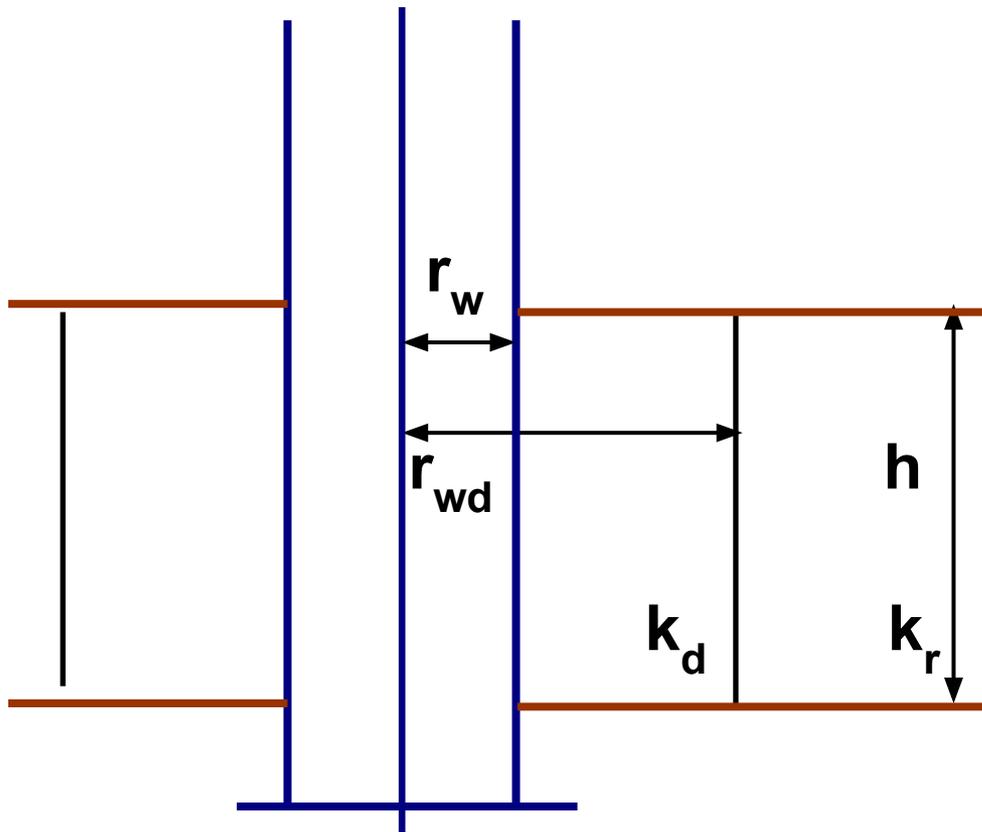
Если $k_d < k_r$ (повреждение), скин-фактор является положительным.

Если $k_d > k_r$ (интенсификация), скин-фактор является отрицательным.

Если $k_d = k_r$, скин-фактор равен 0.

Эффективный радиус скважины

Если проницаемость в зоне изменения k_d намного выше, чем проницаемость пласта k_r , то скважина будет вести себя как скважина с вероятным радиусом r_{wd} - эффективный радиус скважины. r_{wd} может быть вычислен на основе реального радиуса и скин-фактора:



$$s = -\ln\left(\frac{r_{wd}}{r_w}\right)$$

$$r_{wd} = r_w e^{-s}$$

Минимальный скин-фактор

(максимально отрицательный скин-фактор)

достигается при условии $r_{wd} = r_e$,

где r_{wd} - эффективный радиус скважины
 r_e - радиус зоны дренирования

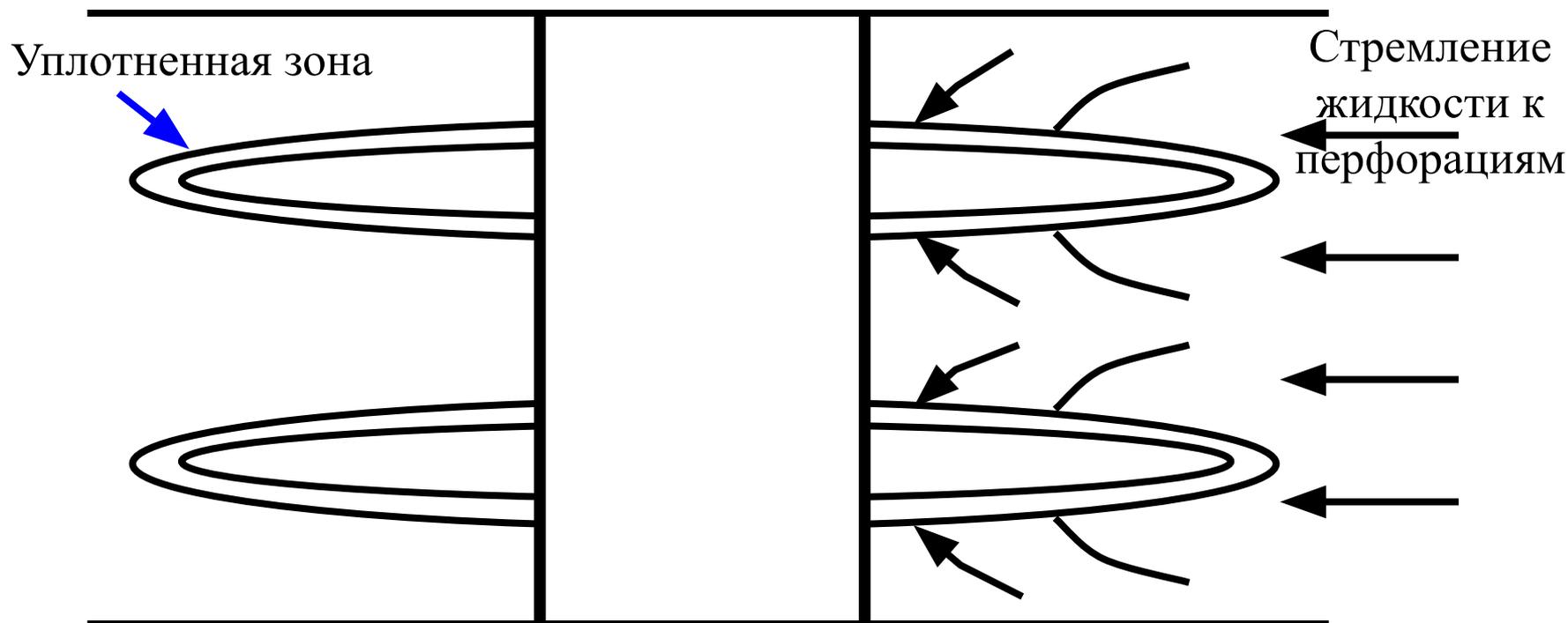
$$S_{\min} = -\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)$$

Пример:

$$S_{\min} = -\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) = -\ln\left(\frac{250}{0.1}\right) = -7.8$$

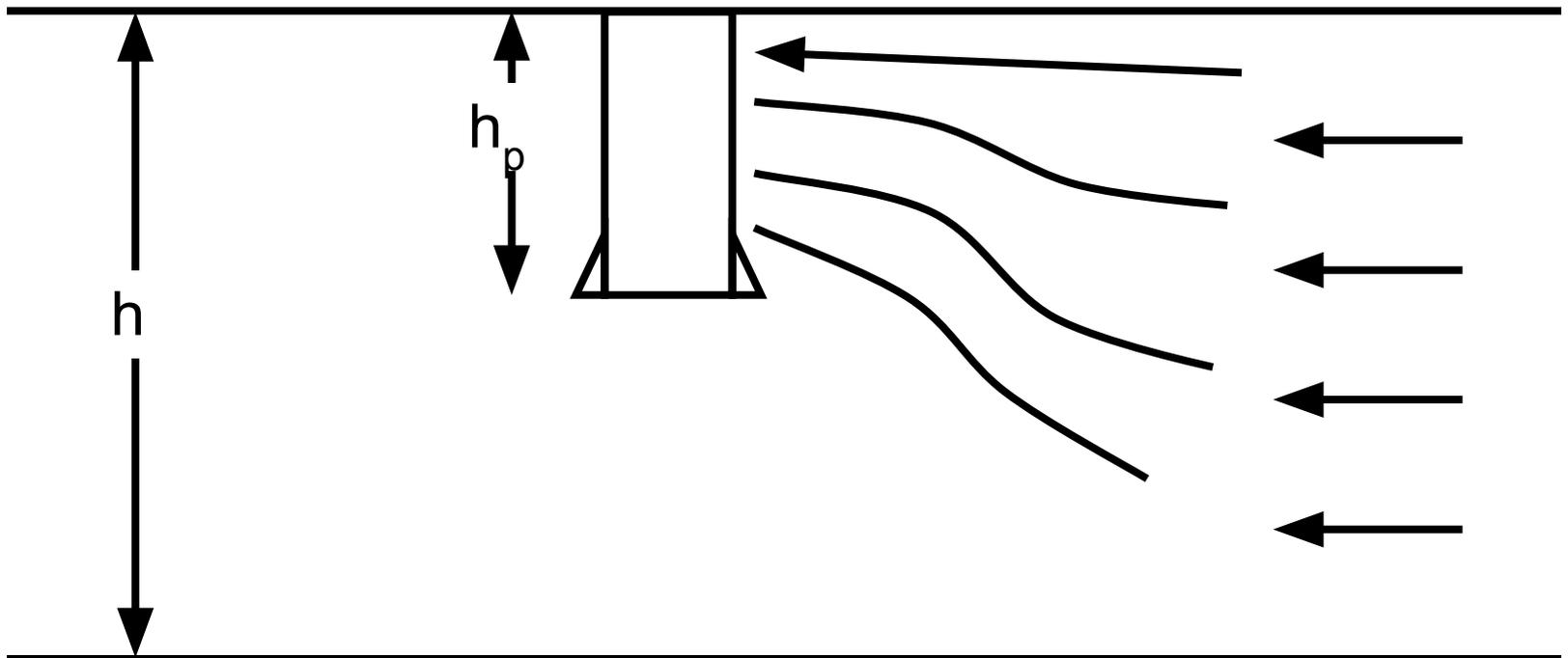
Геометрические скин-факторы

Вследствие воздействия кумулятивной струи на породу, вокруг перфорационного канала образуется уплотненная зона уменьшенной проницаемости. S_p – скин-фактор, учитывающий геометрию перфорации (+)



Геометрические скин-факторы

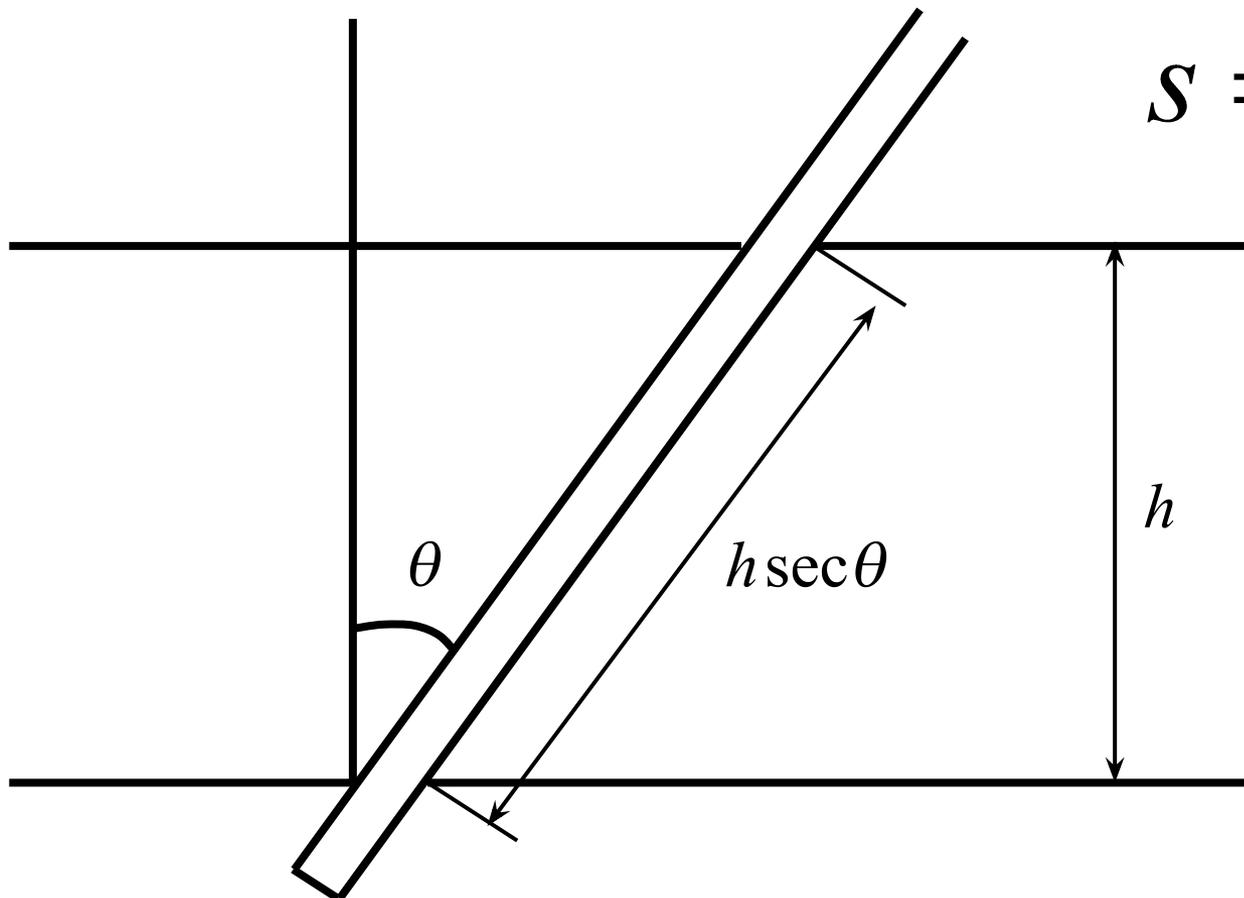
Частичное проникновение – скважина частично вскрывает продуктивный пласт или произведена перфорация только участка продуктивного слоя пласта, S_{pp} – скин-фактор, учитывающий несовершенство вскрытия (+)



Геометрические скин-факторы

Когда скважина входит под углом более, чем 90° , в контакте с пластом находится больший участок поверхности скважины.

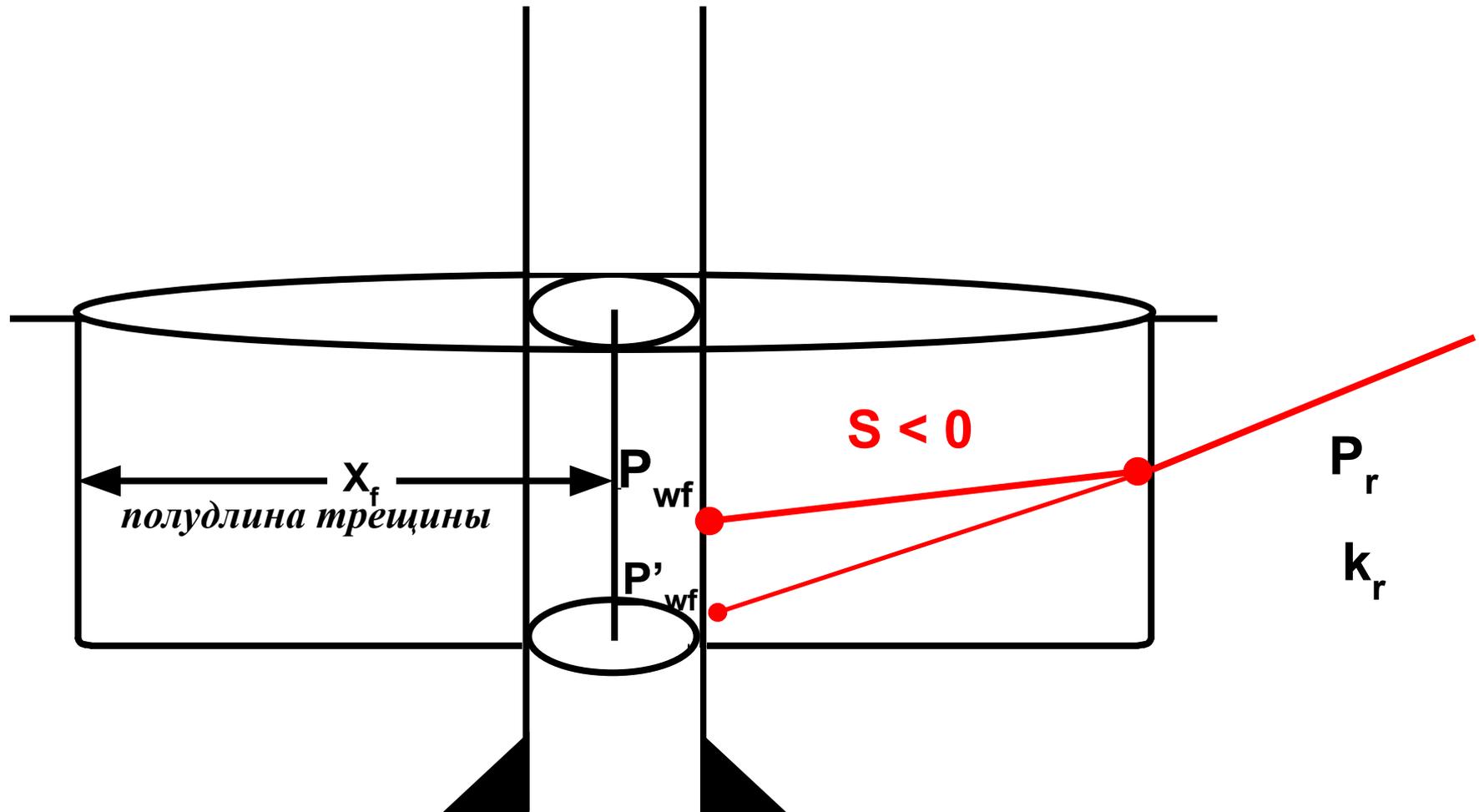
S_θ - скин-фактор вследствие наклона скважины (-)



$$S = S_d + S_\theta$$

Геометрические скин-факторы

В результате гидроразрыва пласта (ГРП) между скважиной и пластом создается зона высокой проводимости. S_s – скин-эффект, возникающий вследствие стимуляции (-)



Скин-фактор и порванные пласты

r_{wd} - эффективный радиус

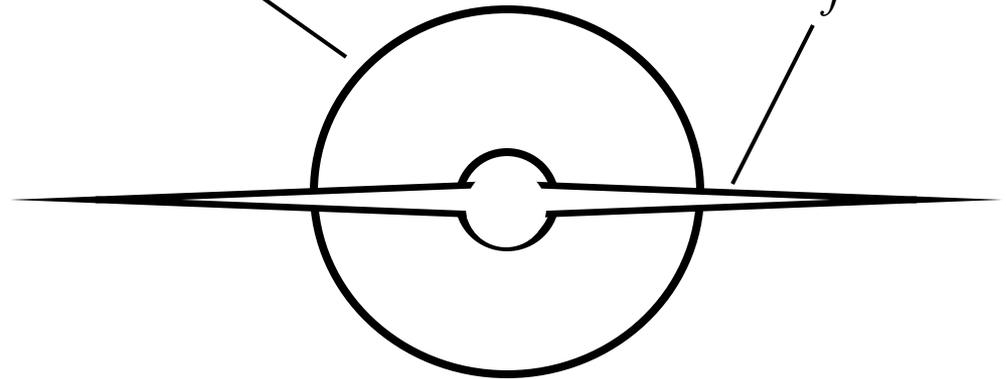
x_f - полудлина трещины

Площадь притока =

$$2\pi r_{wd} h$$

Площадь притока =

$$4 x_f h$$



$$r_{wd} = \frac{X_f}{2}$$

$$X_f = 2r_{wd}$$

Вычисление скин - фактора

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\text{общ}} &= \Delta P_{\text{нач}} + \Delta P_{\text{скин}} = \frac{18,41 \cdot \overline{q\mu B}}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_d}\right) + \frac{18,41 \cdot \overline{q\mu B}}{k_d h} \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \right] = \\
 &= \frac{18,41 \cdot \overline{q\mu B}}{h} \left(\frac{1}{k_r} \ln\left(\frac{r_e}{r_d}\right) + \frac{1}{k_d} \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \right) = \\
 &= \frac{18,41 \cdot \overline{q\mu B}}{hk} \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_d}\right) + \frac{k_r}{k_d} \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \right) = \\
 &= A \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_d}\right) + \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) - \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) + \frac{k_r}{k_d} \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \right) = \\
 &= A \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_d}\right) + \left(\frac{k_r}{k_d} - 1 \right) \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \right)
 \end{aligned}$$

Введем обозначения $\left(\frac{k_r}{k_d} - 1 \right) \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) = S$ - скин- фактор, то формула

Дюшои может быть записана в виде:

$$q = \frac{kh}{18,41 \cdot \overline{\mu B} \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0,75 + S \right)} (\overline{P} - P_{wf})$$

Упражнение: расчет скин - фактора

- *В процессе глушения скважины, отфильтровавшаяся в призабойную зону жидкость, изменила проницаемость со 100 мД до 60 мД в радиусе 0,6 м. Радиус скважины – 0,1 м. Вычислить скин – фактор.*
- *Для очистки призабойной зоны применили кислотную обработку при этом проницаемость восстановилась до 80% от исходной. Вычислить скин – фактор.*

Пример диапазона значений скина

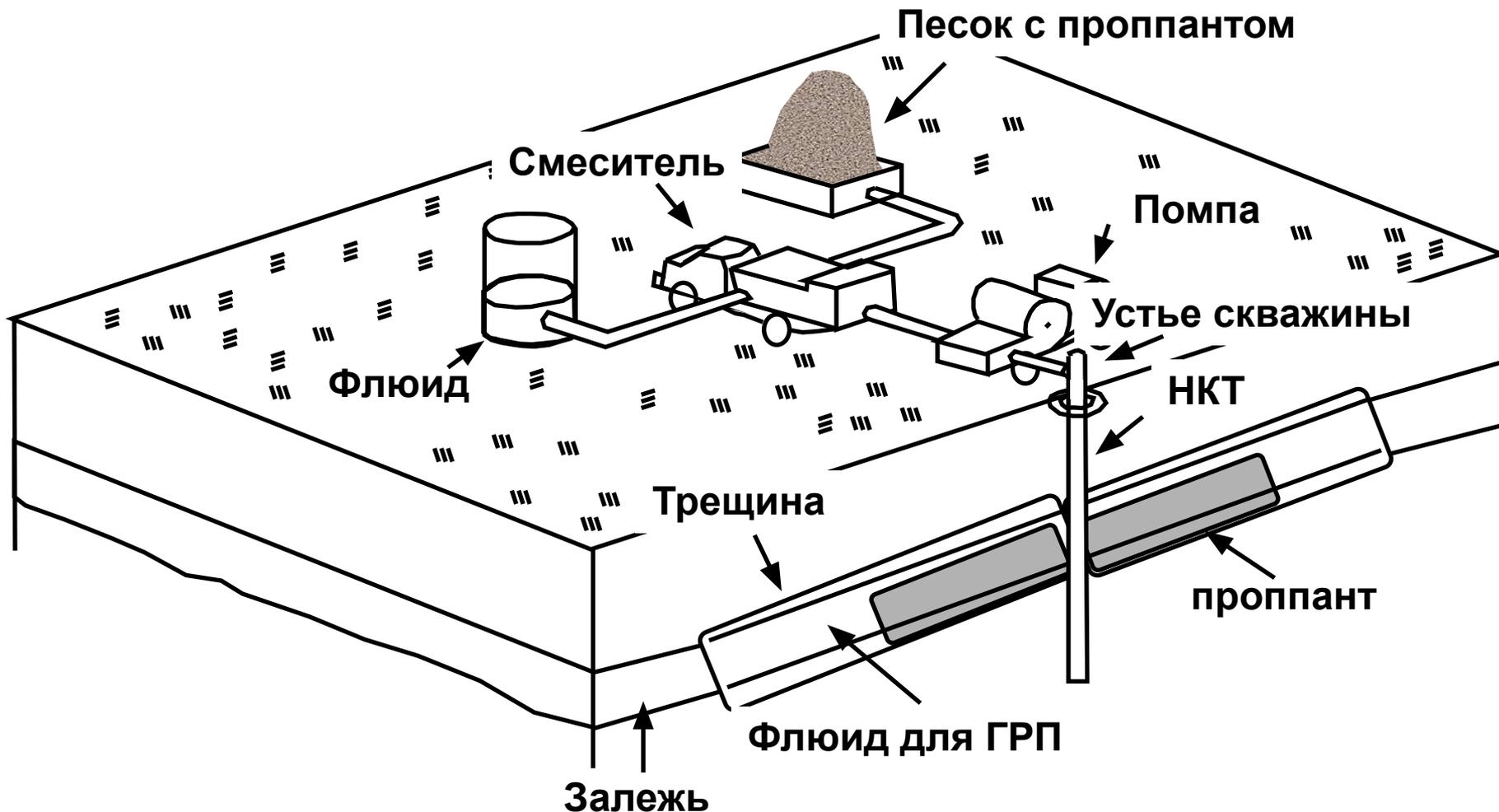
Нелинейная шкала



Гидравлический разрыв

- Гидравлический разрыв – это процесс использования гидравлического давления для создания искусственных трещин в пласте
- Трещина увеличивается в длину, высоту и ширину путем закачки смеси флюида и проппанта под высоким давлением

Гидравлический разрыв

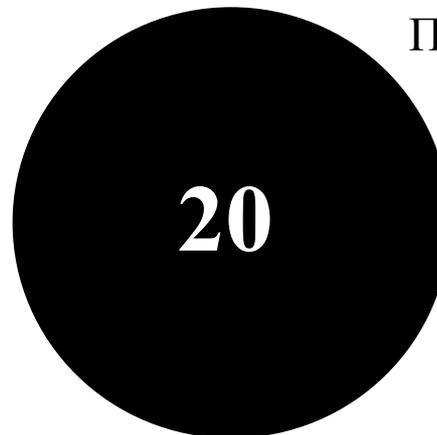


Причины проведения ГРП

- Увеличение добычи
- Запасы:
 - Ускорить извлечение
 - Новый пласт:
 - Извлекать запасы, добыча которых ранее считалась невыгодной
 - Увеличить жизненный цикл пласта
- Увеличить приток в скважину
 - **Обойти** повреждения в призабойной зоне
 - Увеличить эффективный радиус скважины

радиус скважины

$r_{\text{эф}} = 0.1 \text{ м}$ (или меньше)

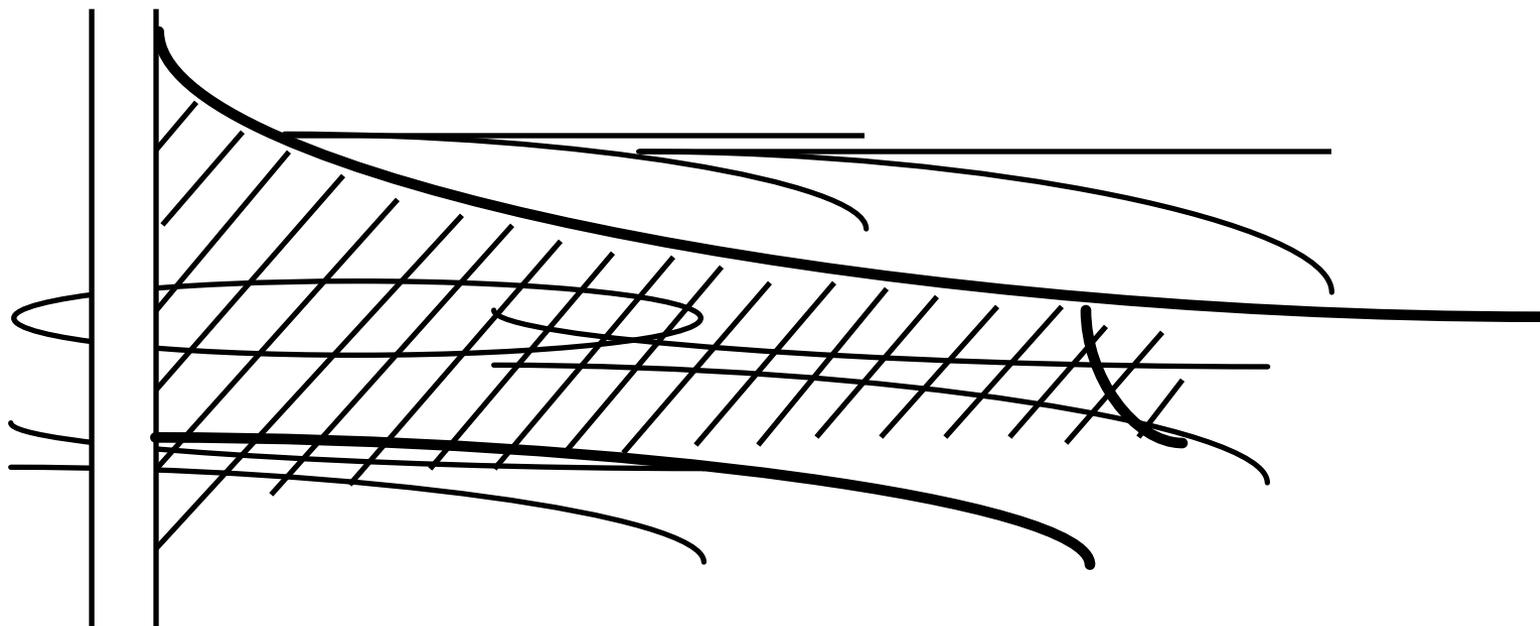


При ГРП ($S = -3$)

$r_{\text{эф}} = 2 \text{ м}$

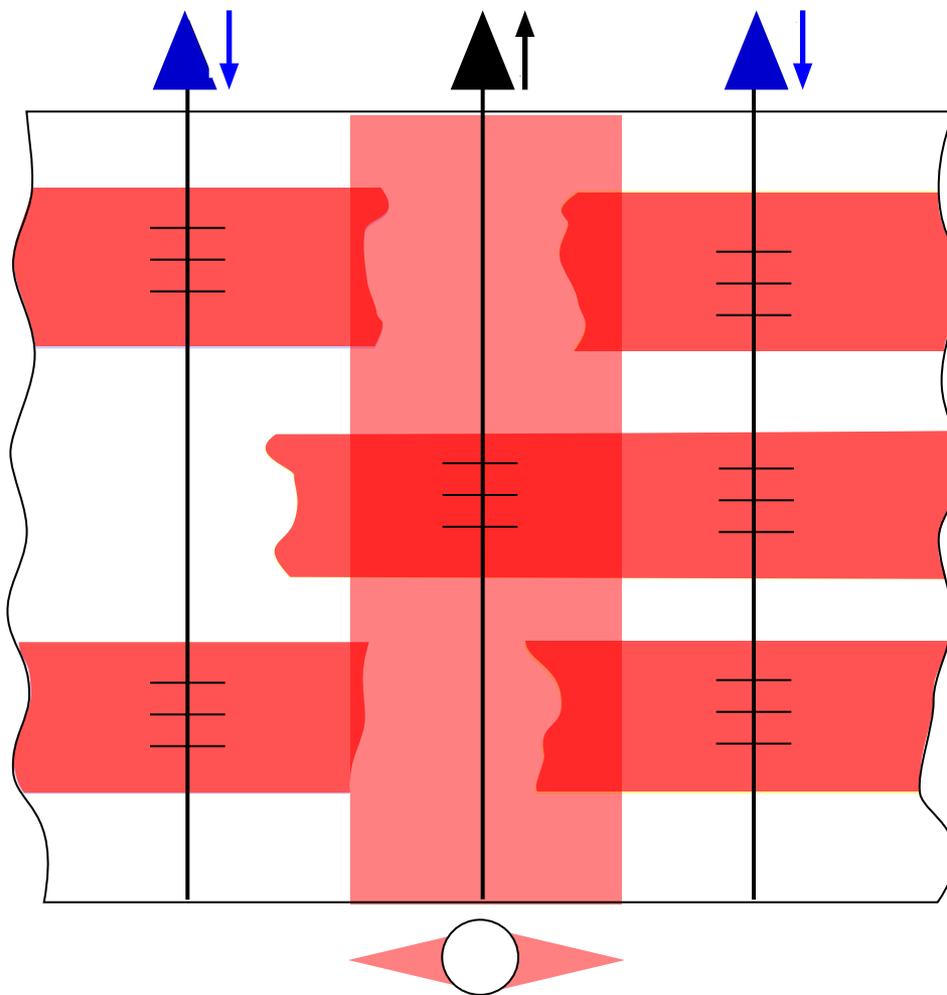
Причины проведения ГРП

Соединение линзообразных резервуаров



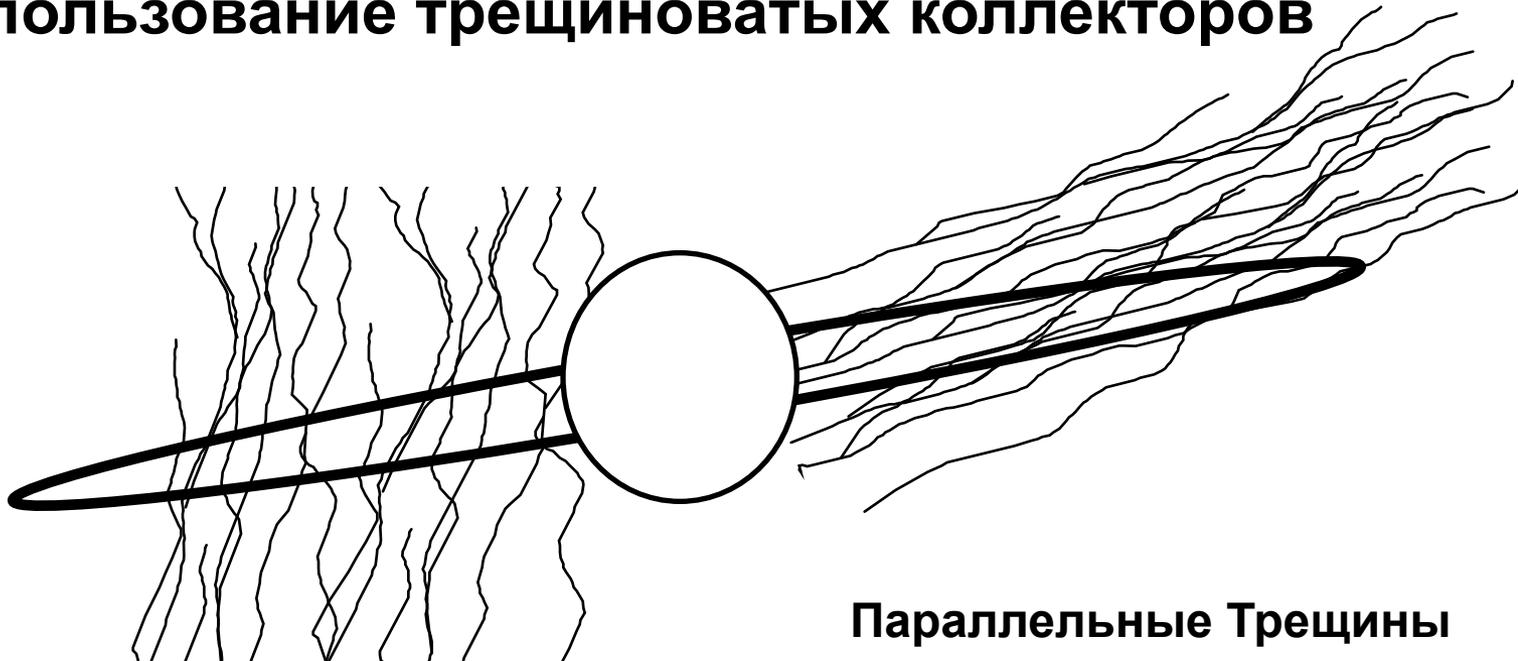
Причины проведения ГРП

Увеличение коэффициента охвата сеткой за счёт ГРП



Причины проведения ГРП

Использование трещиноватых коллекторов



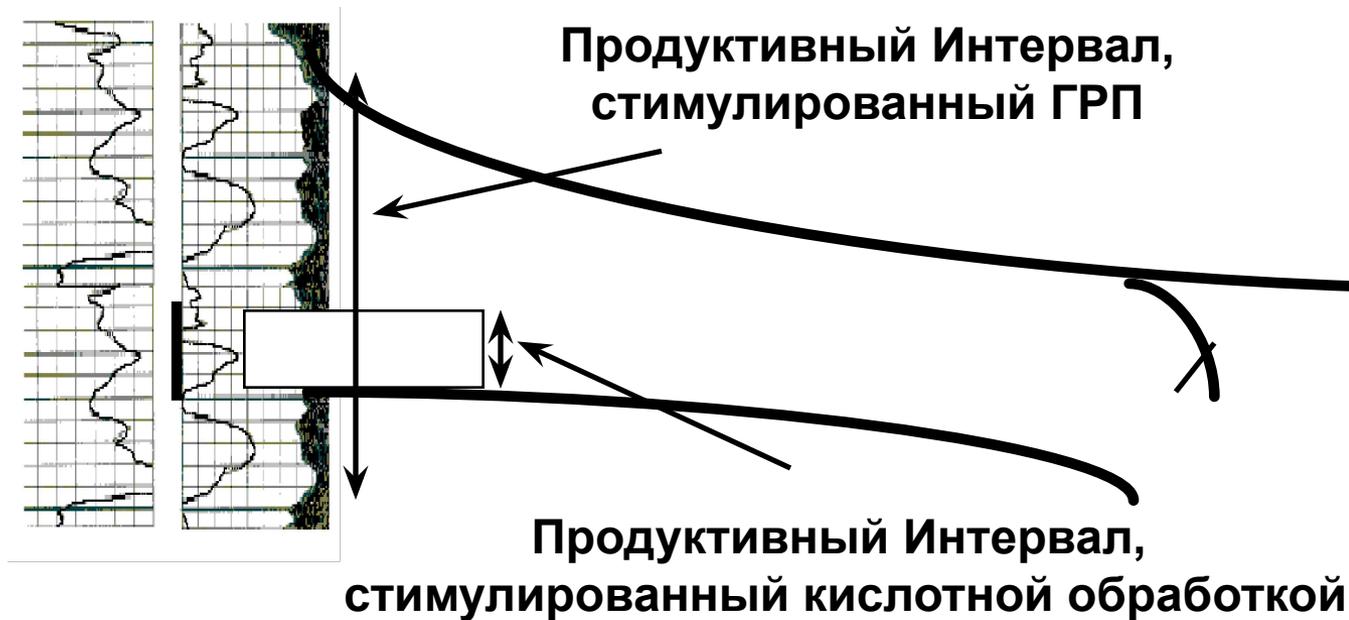
Ортогональные Трещины

Параллельные Трещины

Причины проведения ГРП

Соединение расслоенных формаций

- Обеспечение соединения всех продуктивных пропластков



Скин – фактор после ГРП

- Создается давление в пласте, вызывающее образование трещины
- Проппант или кислота закачиваются в созданную трещину
- Модель основывается на понятии о едином плоском разрыве
- Безразмерная проводимость трещины F_{CD} зависит от разницы проницаемостей проппанта и пласта. F_{CD} это отношение способности трещины пропускать поток к возможности пласта этот поток поставлять в трещину, т.е. проводимости трещины к проводимости пласта.

$$F_{CD} = \frac{k_f w}{k x_f}$$

k_f - проницаемость проппанта (мД)

k - проницаемость пласта (мД)

w - ширина трещины (м)

x_f - полудлина трещины (м)

Неограниченная проводимость ($F_{CD} > 10$)

Ограниченная проводимость ($F_{CD} < 10$)

Расчет скин – фактора после ГРП по корреляционной зависимости для месторождений России

- Время наступления псевдоустановившегося режима

$$t_{нур} = \frac{0.12 \cdot \theta \mu C_t A}{0,00864 \cdot k}$$

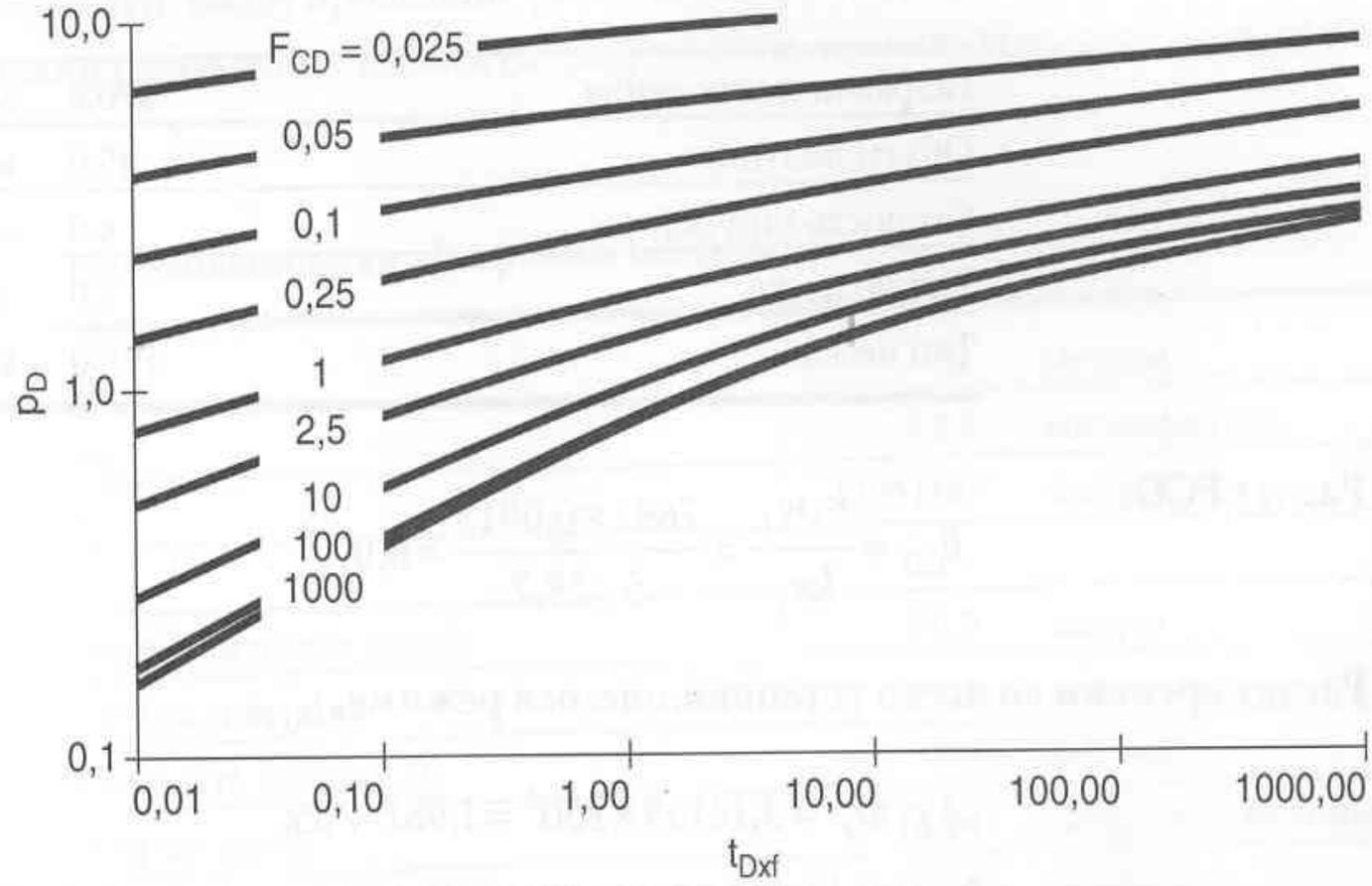
- Безразмерное время

$$t_{Dx_f} = \frac{0,12 A}{t_{нур} x_f^2} \quad A = \square r_e^2$$

- Находим безразмерное давление P_D (по корреляциям для месторождений России)
- Находим скин - фактор

$$S = P_D - \square n \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + 0,75$$

Корреляционная зависимость для расчета скин – фактора после ГРП для месторождений России



Упражнение : расчет скин - фактора

Данные по скважине 6186 Приобского месторождения, пласт А₁₁

1. Даны параметры ГРП:

Проницаемость проппанта $k_f = 430 \text{ Д}$

Проницаемость пласта $k = 7,8 \text{ мД}$

Эффективная толщина пласта $h = 19.8 \text{ м.}$

Полудлина трещины $x_f = 60 \text{ м}$

Ширина трещины $w_f = 0.008 \text{ м}$

2. Даны параметры скважины:

Вязкость нефти $\mu = 1,36 \text{ сПз}$

Коэффициент сжимаемости $C_t = 0,000294 \text{ атм}^{-1}$

Пористость $\theta = 0,15$

Радиус контура дренирования $r_e = 500 \text{ м}$

Радиус скважины $r_w = 0,1 \text{ м}$

3. Вычислить безразмерную проводимость трещины, оценить является ли проводимость трещины ограниченной или неограниченной.

4. Вычислить скин – фактор.

Гидравлический разрыв

В пластах с низкой проницаемостью, $k < 1$ мД

Требуются глубоко проникающие (длинные) трещины

- Кислотные или расклинивающие наполнители закачиваются на большее расстояние от скважины

В пластах с высокой проницаемостью, $k > 50$ мД

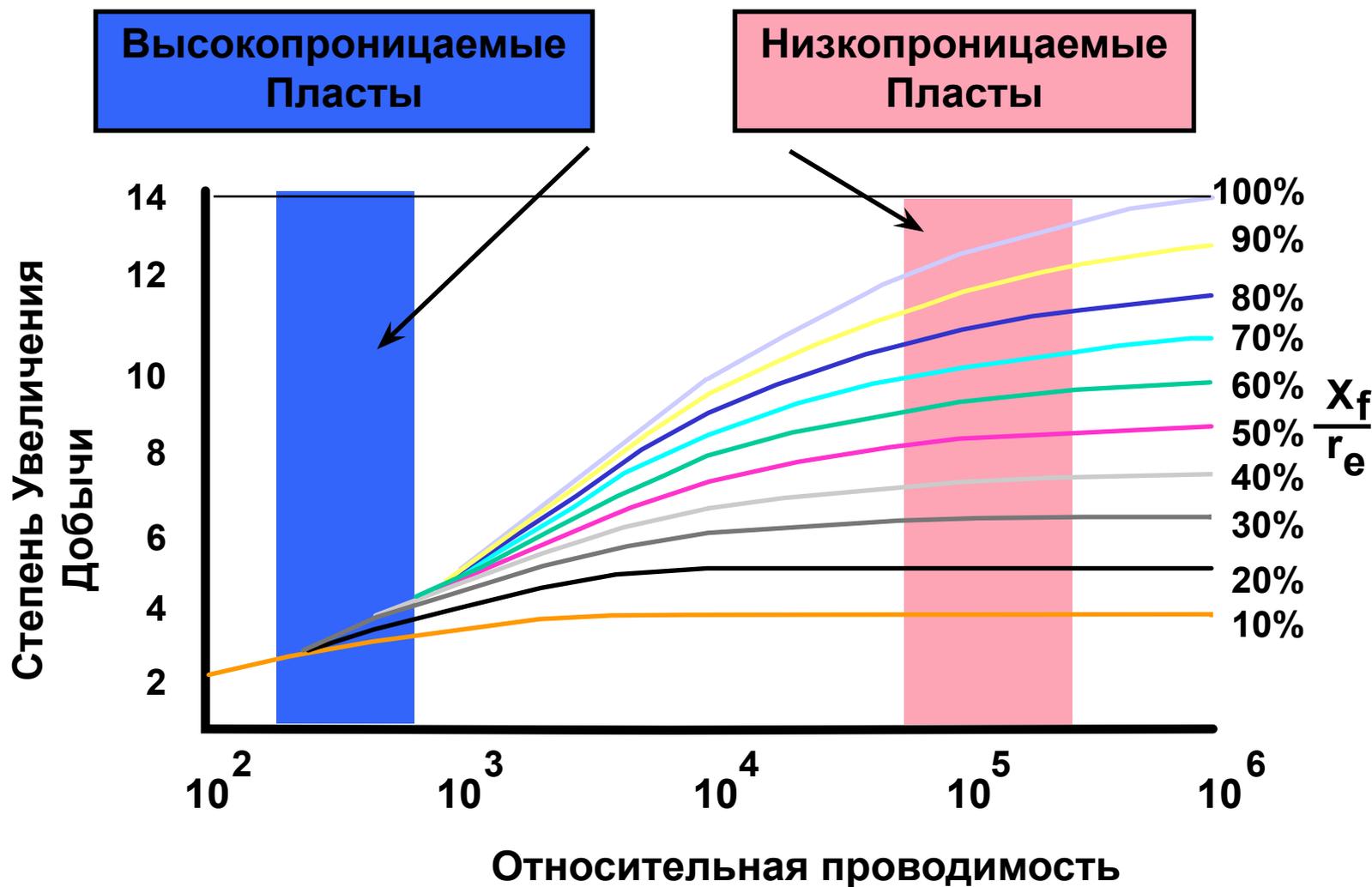
Требуются высокопроводимые короткие трещины

- Более высокий показатель проводимости способствует росту добычи
- Стимуляция призабойной зоны

В пластах со средней проницаемостью, $1 < k < 50$ мД

- Требуется очень высокая проводимость трещины ГРП более 4-5 тысяч мД·м

Увеличение добычи после ГРП для различных длин трещин



□ Теоретически Скин-фактор достигает - 8

Выводы из статьи «Большие дебиты после эффективного ГРП в России»

(Джо Мак - ЮКОС, Дон Уолкотт - ЮКОС, Михаил Холодов – ЮКОС):

- 1. В то время как дебит типичной сибирской скважины 5 мД при умеренном скине составляет ~ 20 м³/сут, эта же скважина, эффективно простимулированная, даст до 175 м³/сут в зависимости от забойного давления, создаваемого системой мехдобычи.**
- 2. На скважинах с проницаемостями от 20 до 50 мД после эффективного ГРП и с соответствующей системой мехдобычи можно ожидать дебиты от 500 до 1200 м³/сут.**
- 3. При проницаемости пласта более 5 мД в России проводимость трещины $k_f w_f$ ГРП должна быть не меньше 1500 мД*м.**
- 4. Традиционные ГРП неэффективны на средних проницаемостях российских коллекторов. С особым вниманием надо следить за тем, чтобы в Россию не просочились низкопроницаемые работы ГРП из Северной Америки.**

5. **Остаточный скин, создаваемый в результате проведения ГРП, рассчитывается путем определения P_D по типовым кривым в момент достижения псевдоустановившегося режима.**
6. **Необходимы ГРП на основе технологии концевого экранирования. Требуется очень высокая проводимость трещины $k_f w_f$ ГРП для эффективного проведения работ в пластах средней проницаемости.**
7. **По окончании периода неустановившегося режима необходимо применять закон Дарси с отрицательным скином для расчета притока. Для расчета притока при давлениях ниже давления насыщения необходимо использовать поправку Вогеля.**
8. **Каждый ГРП должен рассчитываться индивидуально с использованием конкретных данных со скважины для получения правильной стимуляции. Эффективная геометрия трещин ГРП очень чувствительна к изменениям проницаемости в коллекторах средней проницаемости.**

Корреляция Пратса

- Из графика по вычисленному значению F_{CD} находим отношение

$$\frac{r_{эф}}{x_f} \rightarrow r_{эф}$$

- Находим скин - фактор

$$S = -\ln\left(\frac{r_{эф}}{r_c}\right)$$

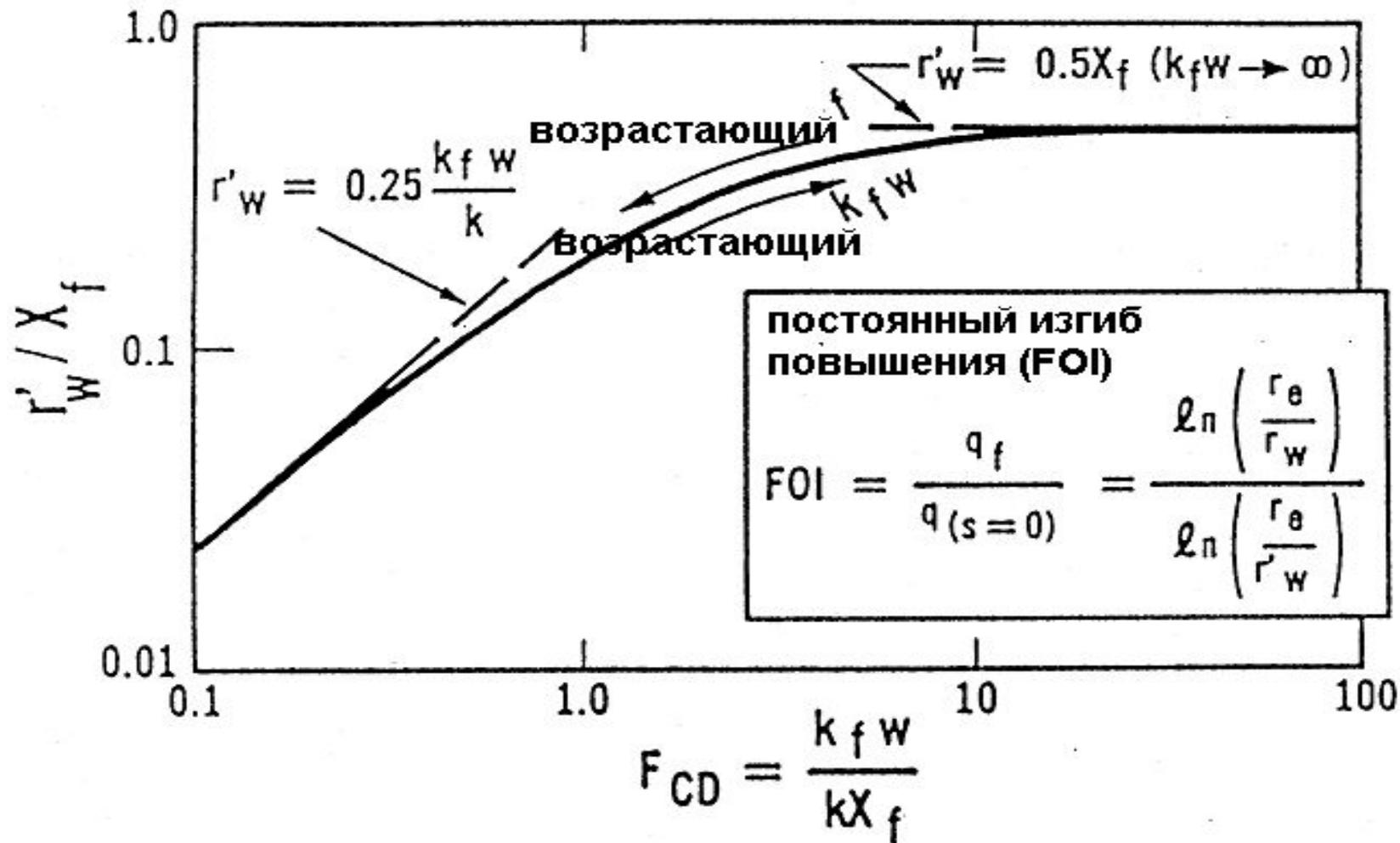
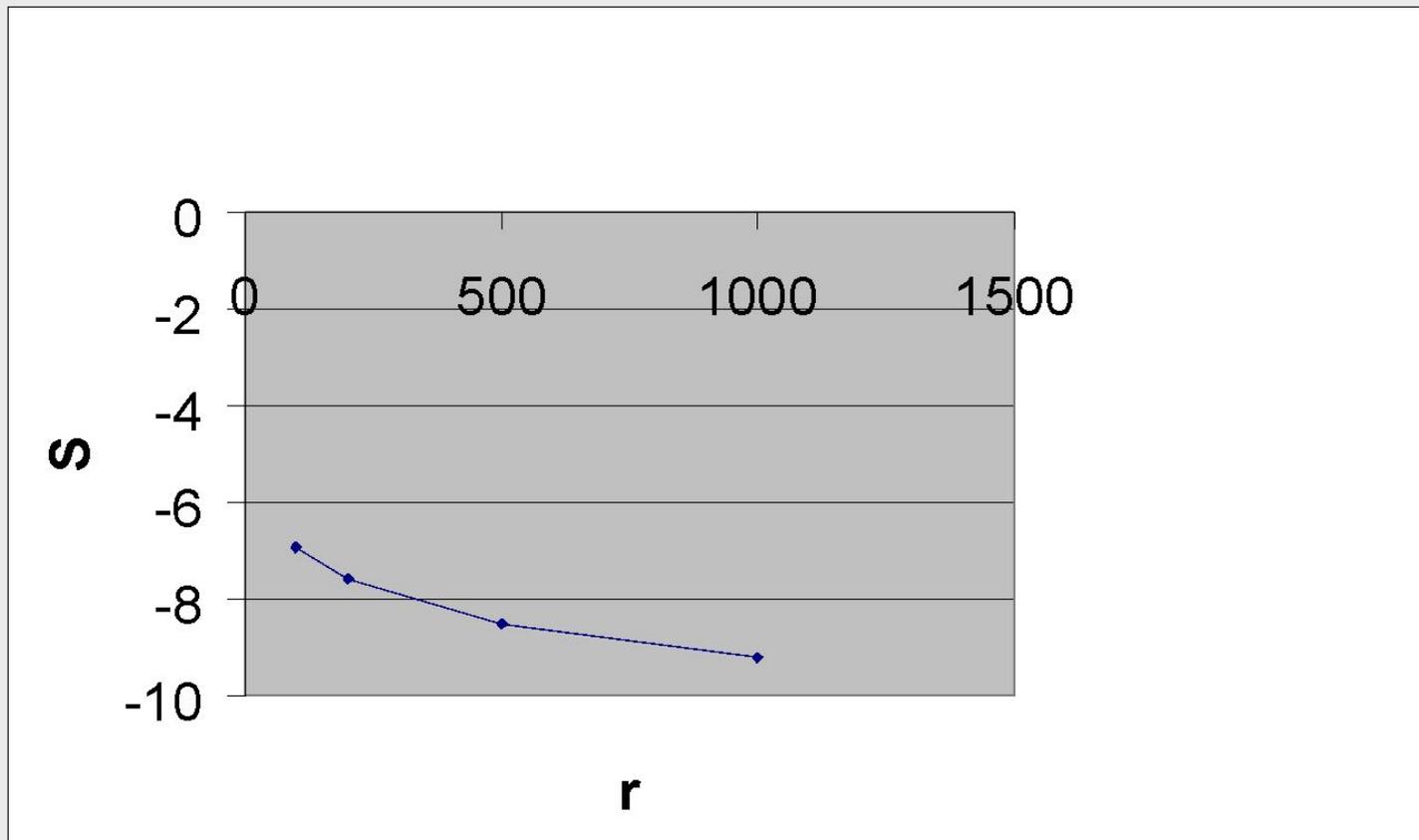


РИС. 1.2— Корреляция Пратса

Влияние контура питания на значения минимально возможного скина



Форм-факторы

Радиальный пласт

$$J = \frac{q}{(\bar{p} - p_{wf})} = \frac{54,32 \times 10^{-3} kh}{\mu_o B_o \left(\ln \left(\frac{r_k}{r_c} \right) - \frac{3}{4} + s \right)}$$

Каково уравнение для нерадиального пласта?

Форм-факторы

форм-фактор по Диеццу

$$J = \frac{q}{(\bar{p} - p_{wf})} = \frac{54,32 \times 10^{-3} kh}{\mu_o B_o \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10.06 A}{C_A r_c^2} \right) - \frac{3}{4} + s \right)}$$

Форм-факторы

форм-фактор по Одеху

$$J = \frac{q}{(\bar{p} - p_{wf})} = \frac{54,32 \times 10^{-3} kh}{\mu_o B_o \left(\ln \left(\frac{C_{A Odeh} \sqrt{A}}{r_c} \right) - \frac{3}{4} + s \right)}$$

Форм-факторы

Скин, вызванный формой пласта и расположением скважины по Феткович-Вьеноту

$$J = \frac{q}{(\bar{p} - p_{wf})} = \frac{54,32 \times 10^{-3} kh}{\mu_o B_o \left(\ln \left(\frac{r'_k}{r_c} \right) - \frac{3}{4} + s_{CA} + s \right)}$$

$$r'_k \equiv \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

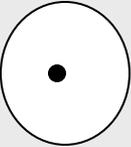
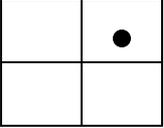
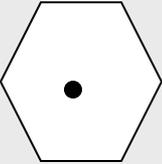
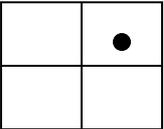
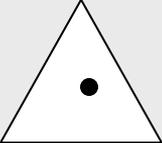
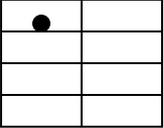
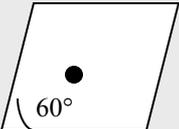
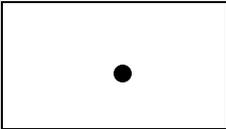
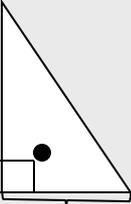
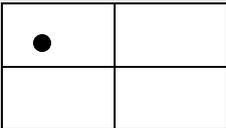
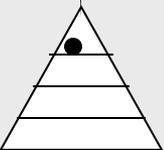
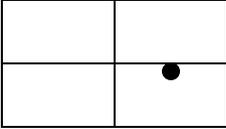
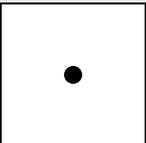
Отношения форм-факторов

$$C_A = \frac{10.07}{C_{A Odeh}^2} = \frac{10.07\pi^2}{\exp(2s_{CA})}$$

$$C_{A Odeh} = \sqrt{\frac{10.07}{C_A}} = \frac{\exp(s_{CA})}{\pi}$$

$$s_{CA} = \ln(\pi C_{A Odeh}) = \ln\left(\pi \sqrt{\frac{10.07}{C_A}}\right)$$

Форм-факторы

	C_A	t_{DA}		C_A	t_{DA}
	31.6200	0.100		12.9851	0.700
	31.6000	0.100		4.5132	0.600
	27.6000	0.200		3.3351	0.700
	27.100	0.200		21.8369	0.300
	21.900	0.400		10.8374	0.400
	0.0980	0.900		4.5141	1.500
	30.8828	0.100		2.0769	1.700

Упражнение

Скважину пробурили ближе к точке пересечения 2-х разломов, чем к центру пласта. Рисунок показывает расположение скважины на основе обработанных геологических данных. Такое неудачное расположение скважины приведет к низкому дебиту.



Рассчитайте положительный скин-фактор, связанный с неудачным расположением скважины

Порядок расчета форм - фактора

1. Находим $C_{A,Od}$, соответствующее геометрии контура питания.

$$C_{A,Od} = \frac{3,173}{\sqrt{C_A}}$$

2. Вычисляем скин форм – фактора

$$S_f = \ln\left(\frac{C_{A,Od} \sqrt{A}}{r_c}\right)$$