

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН

Проведение и интерпретация опытно-фильтрационных опробований

Синдаловский Л.Н.

annik@ansdimat.com

Санкт-Петербург

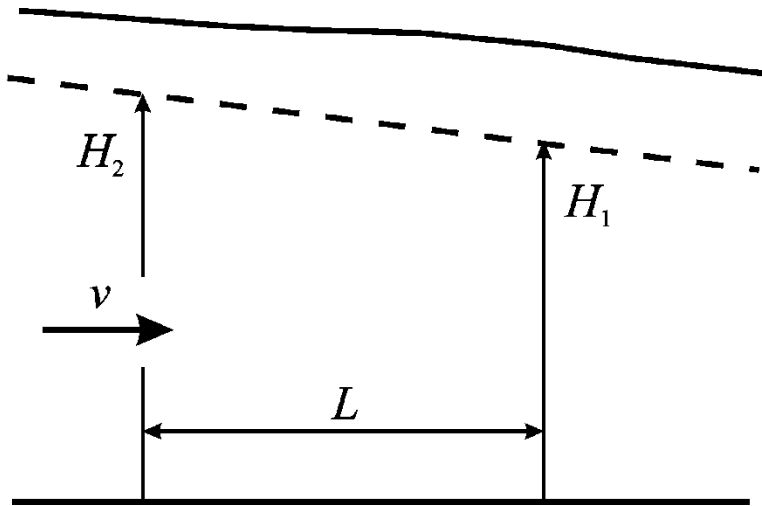
2020 г.

www.ansdimat.com

Фильтрационные параметры

- Коэффициент фильтрации
- Водоотдача

Коэффициент фильтрации



Скорость фильтрации, м/сут

$$v = kI$$

Расход, м³/сут

$$Q = k\omega I$$

Площадь, м²

Проницаемость, м²

$$k = \frac{k_0 \rho g}{\mu}$$

Коэффициент фильтрации, м/сут

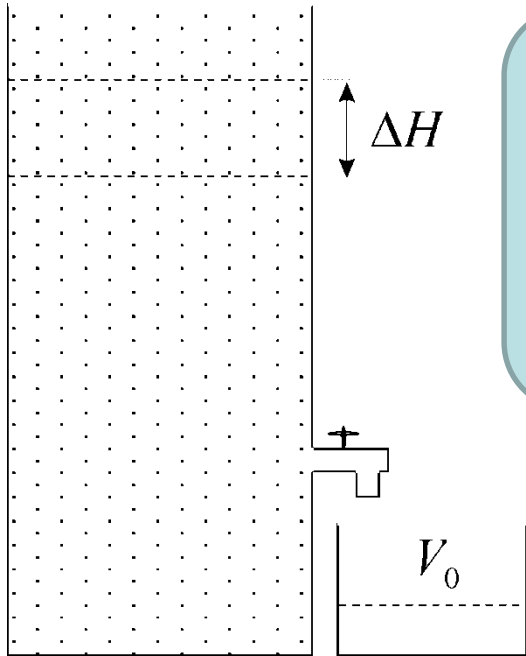
Градиент

$$I = \frac{H_2 - H_1}{L}$$

Проводимость, м²/сут

$$T = km$$

Водоотдача



Гравитационная водоотдача, –

$$S_y = \frac{V_0}{\omega \Delta H} = \frac{V_0}{V}$$

Водоотдача, –

Удельная водоотдача, 1/м

$$S = S_s m$$

μ (мю)

η (эта)

$$S = T / a = km / a$$

Уровнепроводность, м²/сут

$$a = k\bar{m} / S_y$$

Пьезопроводность, м²/сут

$$a = T / S = km / S = k / S_s$$

Сжимаемость воды, 1/Па

Сжимаемость пород, 1/Па

Пористость, –

Насыщенность, –

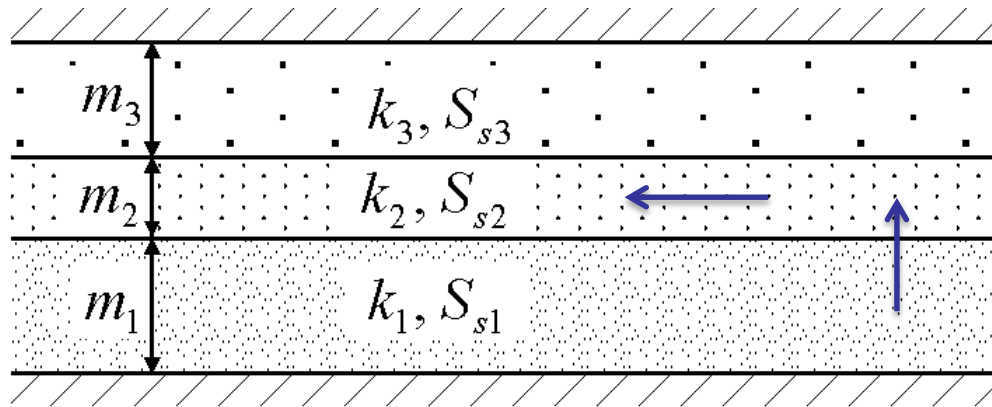
Влажность, –

$$S_s = \rho g [n\beta_w + (1-n)a_c]$$

$$S_s = \rho g [n\beta_w + \alpha]$$

$$S_y = n(1 - S_r) = n - \theta_r$$

Параметры слоистых систем



Коэффициент фильтрации, м/сут

По напластованию: $\bar{k}_r = \frac{\sum_{i=1}^n k_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$

Перпендикулярно напластованию:

$$\bar{k}_z = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i / k_i}$$

Водоотдача, – $S = \sum_{i=1}^n S_{si} m_i$

Удельная водоотдача, 1/м $\bar{S}_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_{si} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$

Проводимость, м²/сут

$$T = \sum_{i=1}^n k_i m_i = \sum_{i=1}^n T_i = \bar{k}_r \sum_{i=1}^n m_i$$

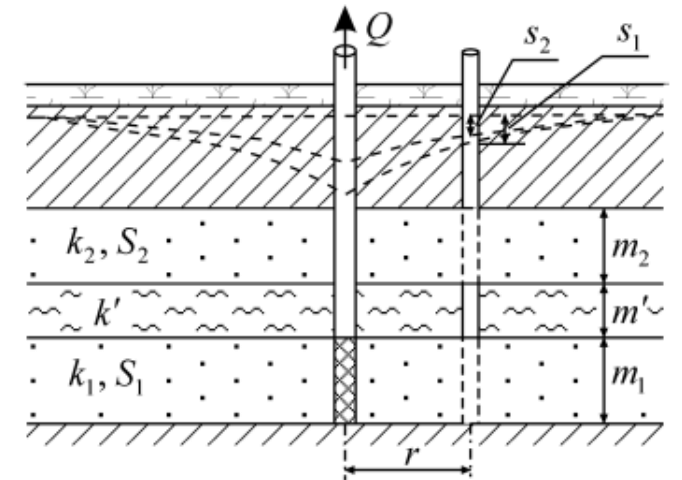
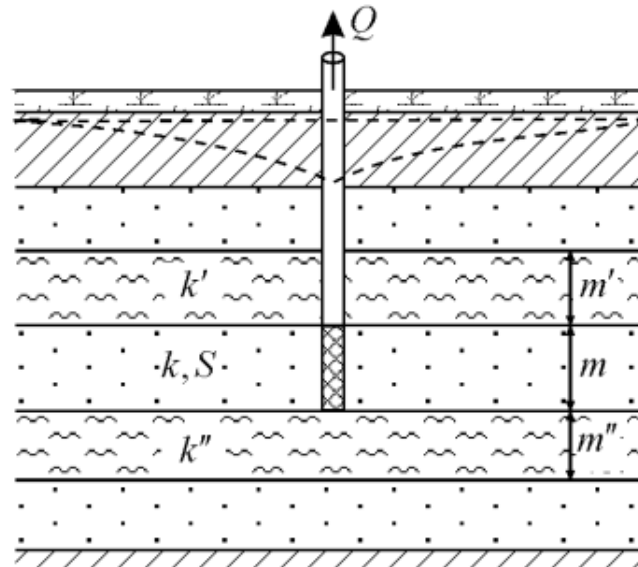
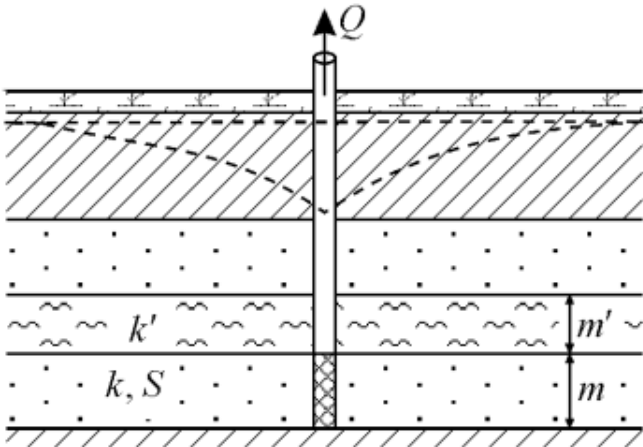
Параметр перетекания

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}$$

$$B = \sqrt{T \frac{m'm''}{k'm'' + k''m'}}$$

$$B_1 = \sqrt{T_1 \frac{m'}{k'}}$$

$$B_2 = \sqrt{T_2 \frac{m'}{k'}} = B_1 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$



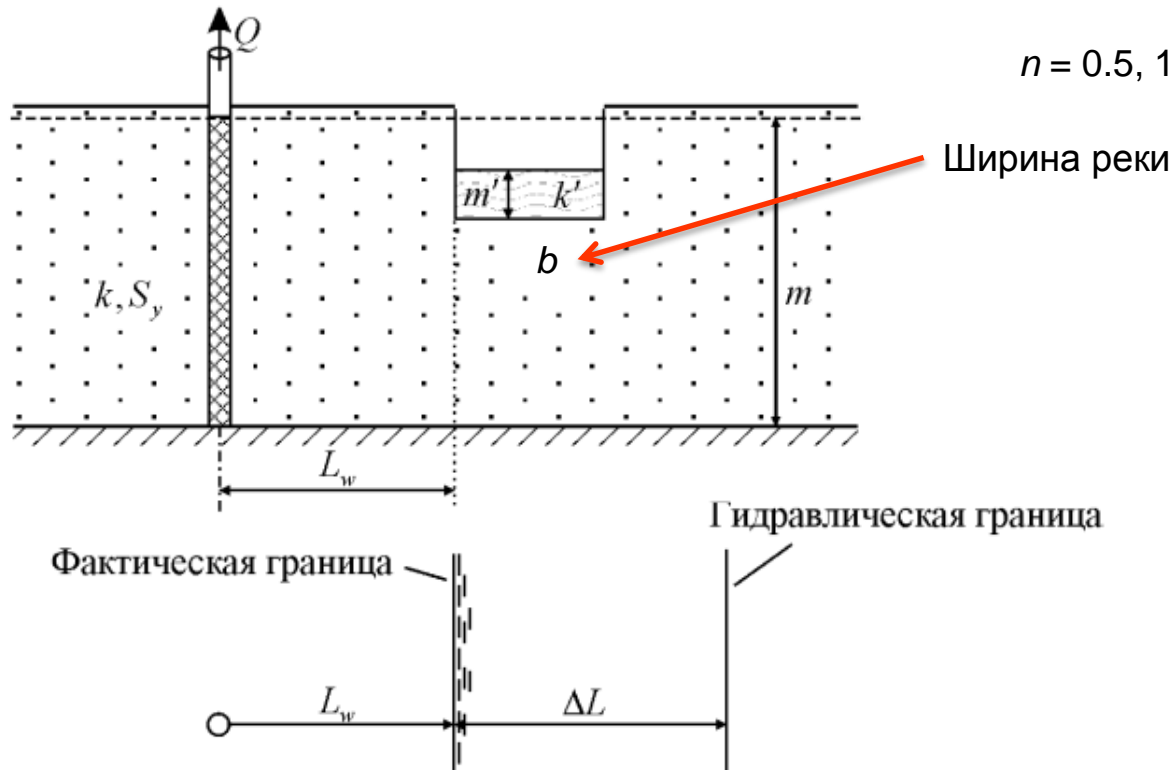
— B —————> Изолированный пласт

Сопротивление русла реки

Шестаков

$$\Delta L = \sqrt{Tm' / k'} \operatorname{coth} \left(\frac{nb}{\sqrt{Tm' / k'}} \right)$$

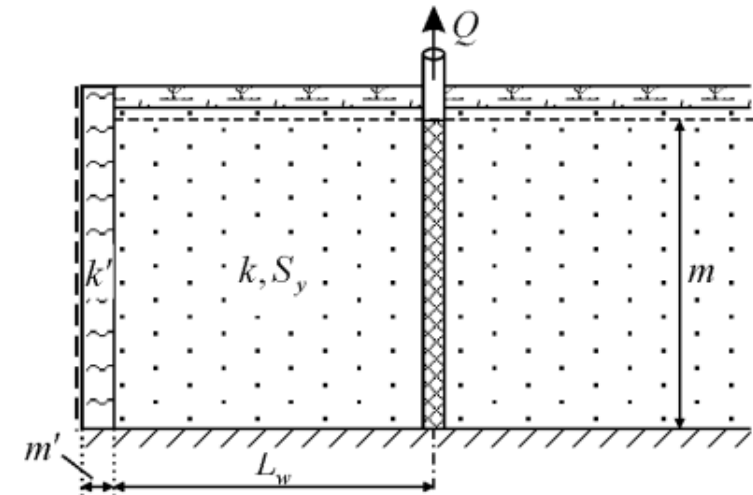
$n = 0.5, 1$



I род $\longleftrightarrow \Delta L \longleftrightarrow$ Нет границы

Хантуш

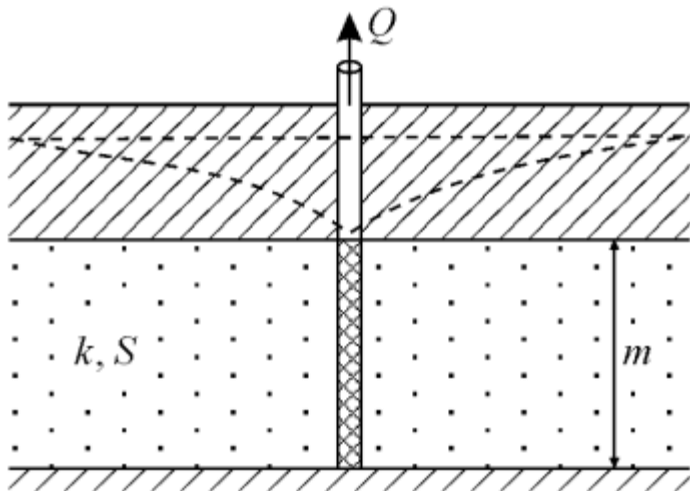
$$\Delta L = \frac{k}{k'} m'$$



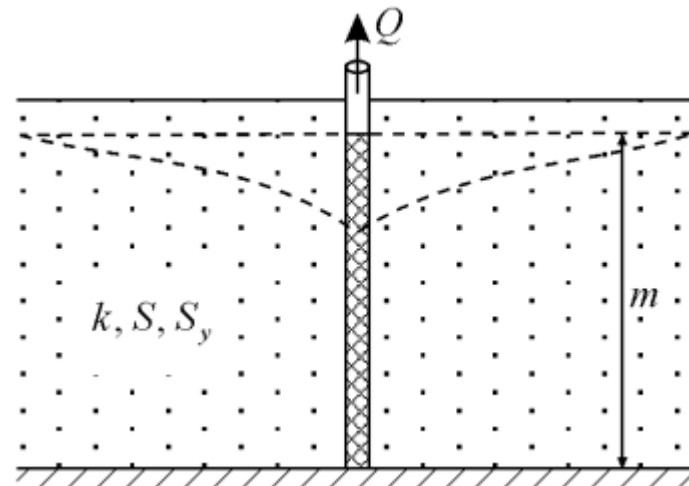
I род $\longleftrightarrow \Delta L \longleftrightarrow$ II род

Схематизация гидрогеологических условий

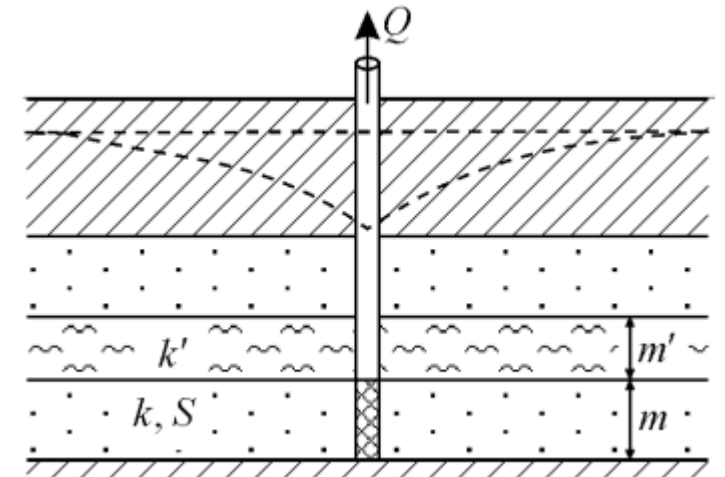
Напорный изолированный пласт



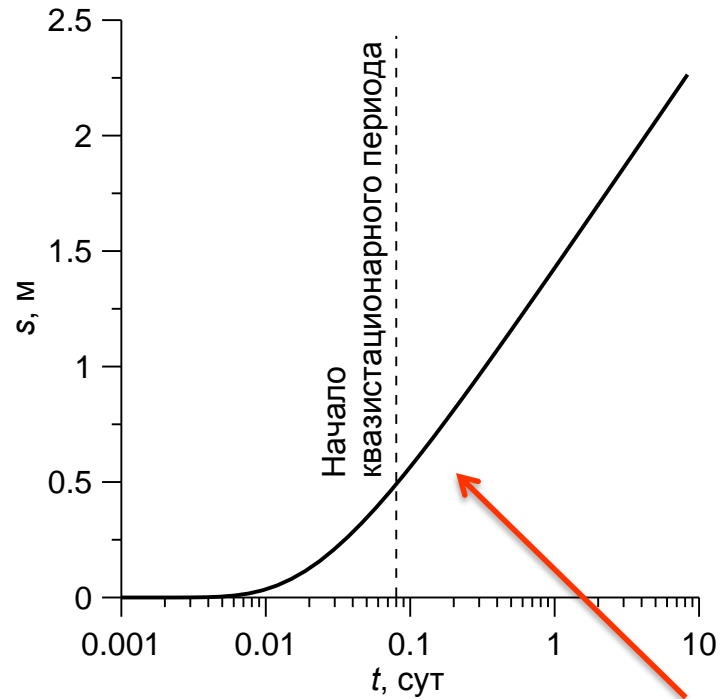
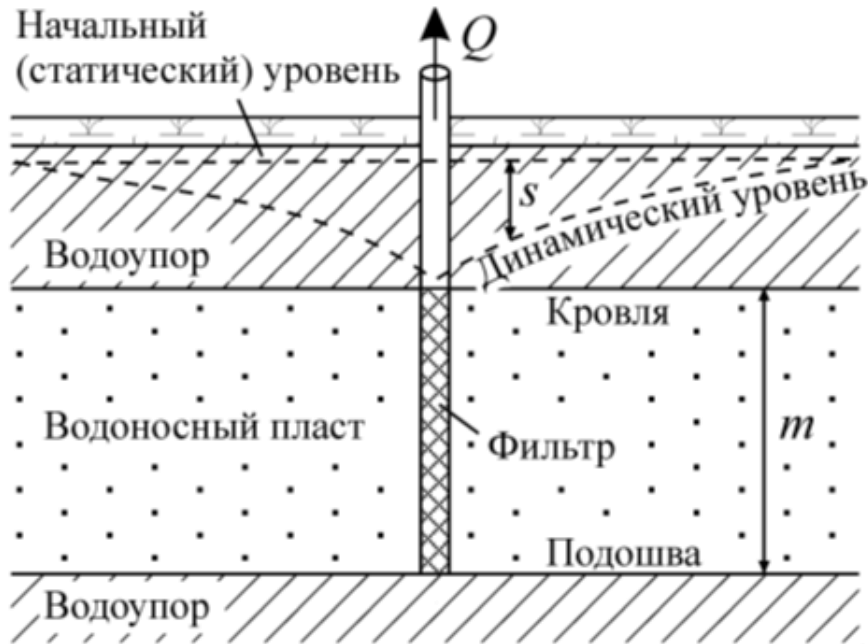
Безнапорный пласт



Пласт с перетеканием



Напорный водоносный пласт

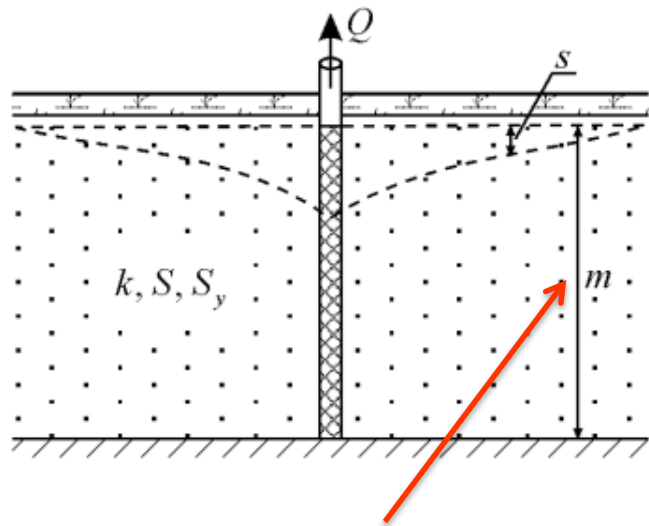


Решение Тейса – основное уравнение для описания понижения в водоносном пласте

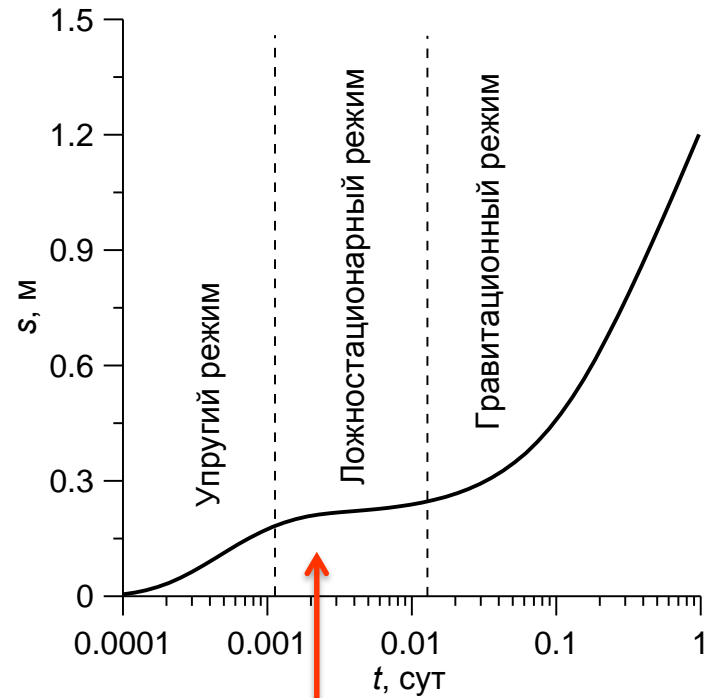
$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right)$$

Выделяется два участка индикаторной кривой

Безнапорный водоносный пласт



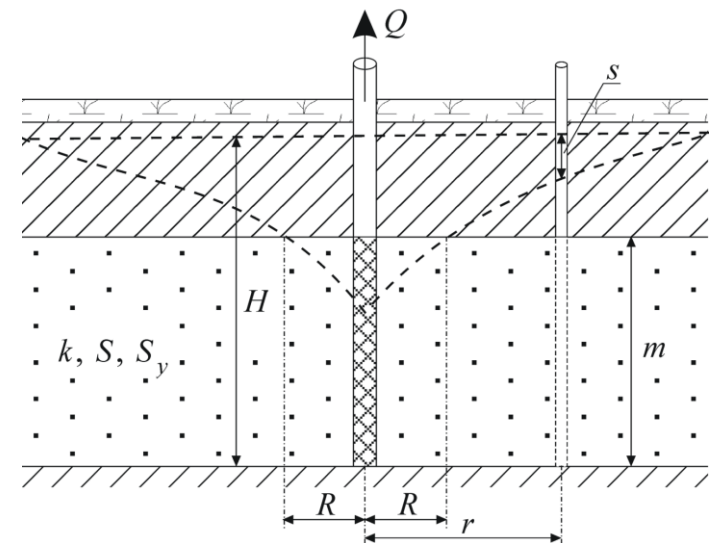
Начальная обводненная мощность пласта



Три участка
индикаторной кривой

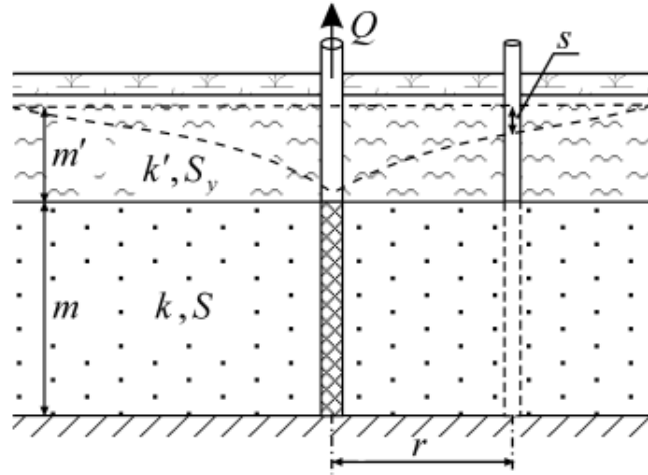
Решения: Болтон, Ньюман, Менч

Напорно-безнапорный пласт

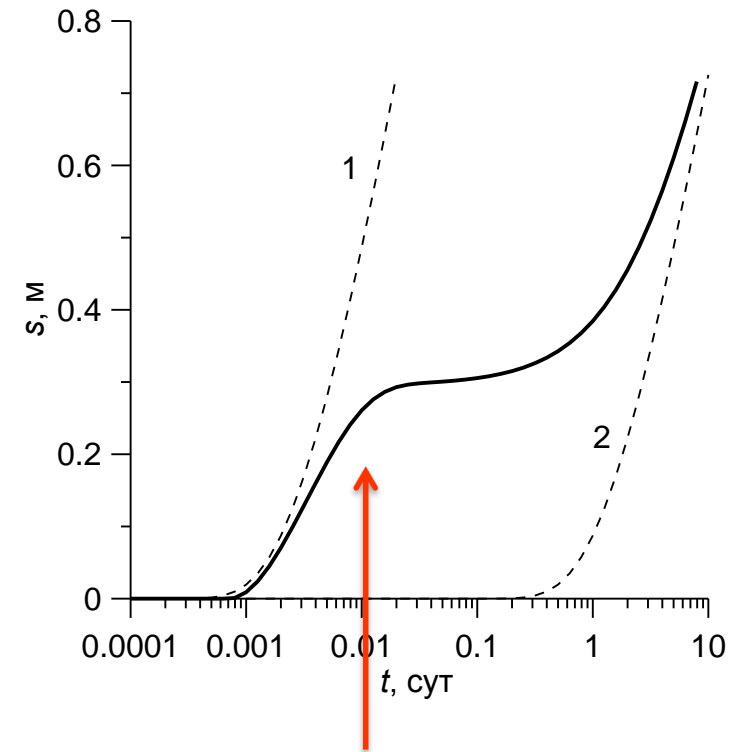
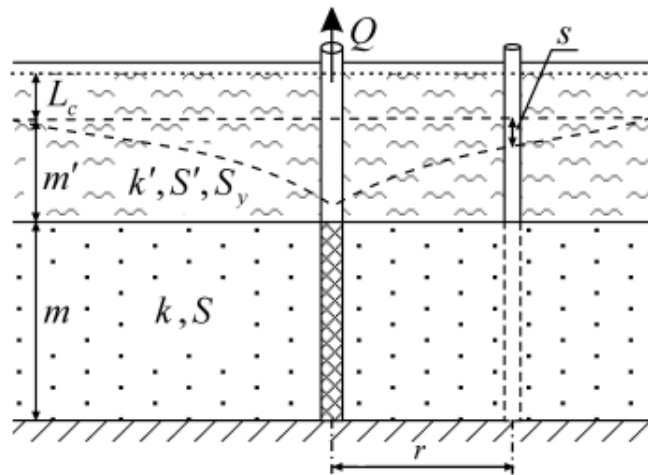


Безнапорный двухслойный комплекс

Решение Мироненко



Решение Кулей и Кэйс

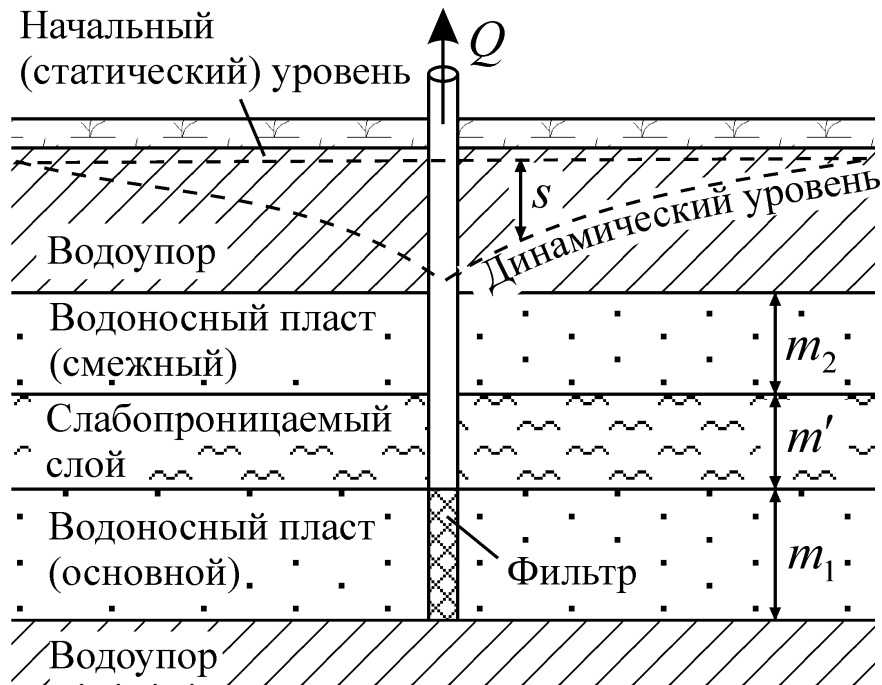


Три участка
индикаторной кривой

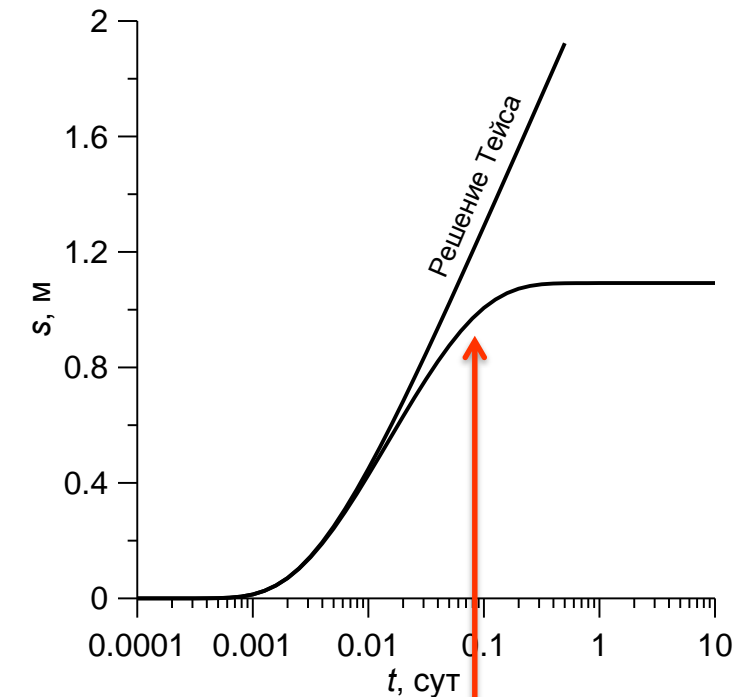
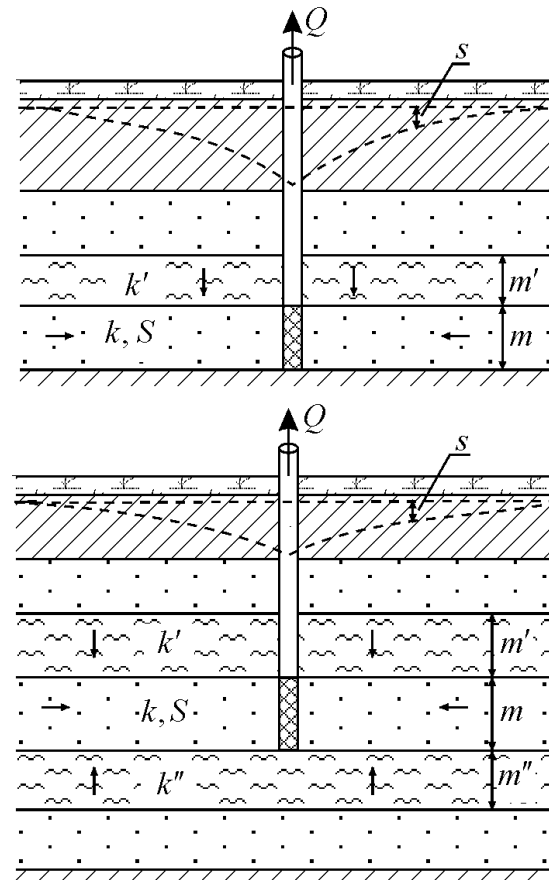
Водоносный пласт с перетеканием

Решение Хантуша – основное уравнение для описания понижения в пласте с перетеканием

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right)$$

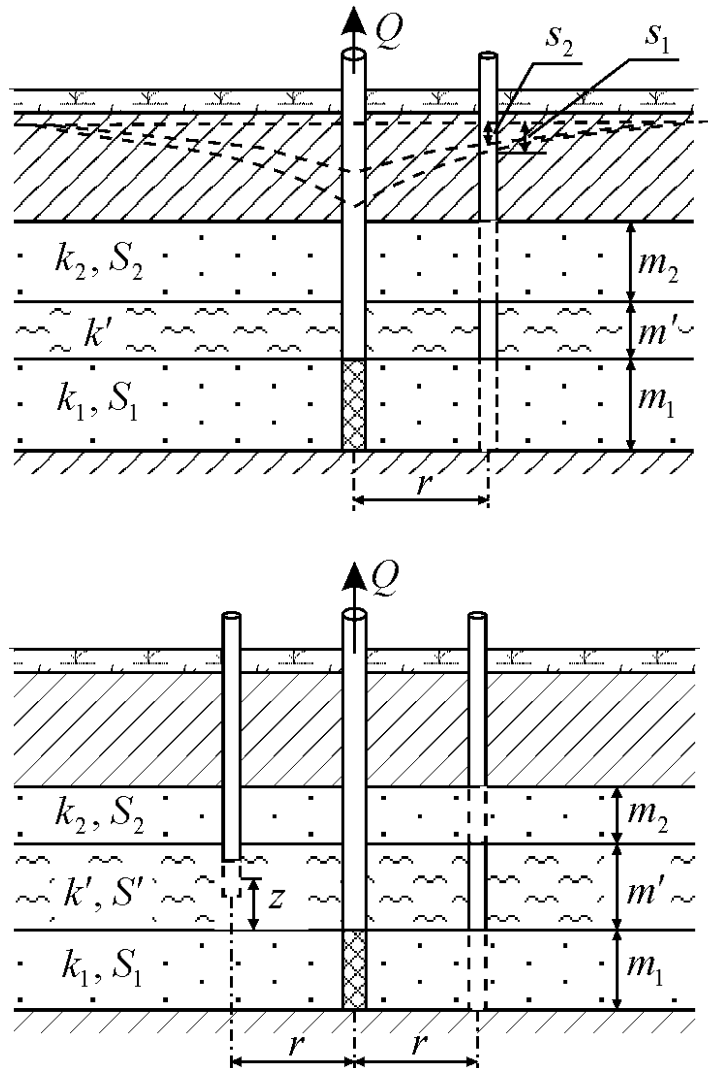


- Уровень в смежном пласте постоянный
- Влиянием емкости слабопроницаемого слоя пренебрегаем

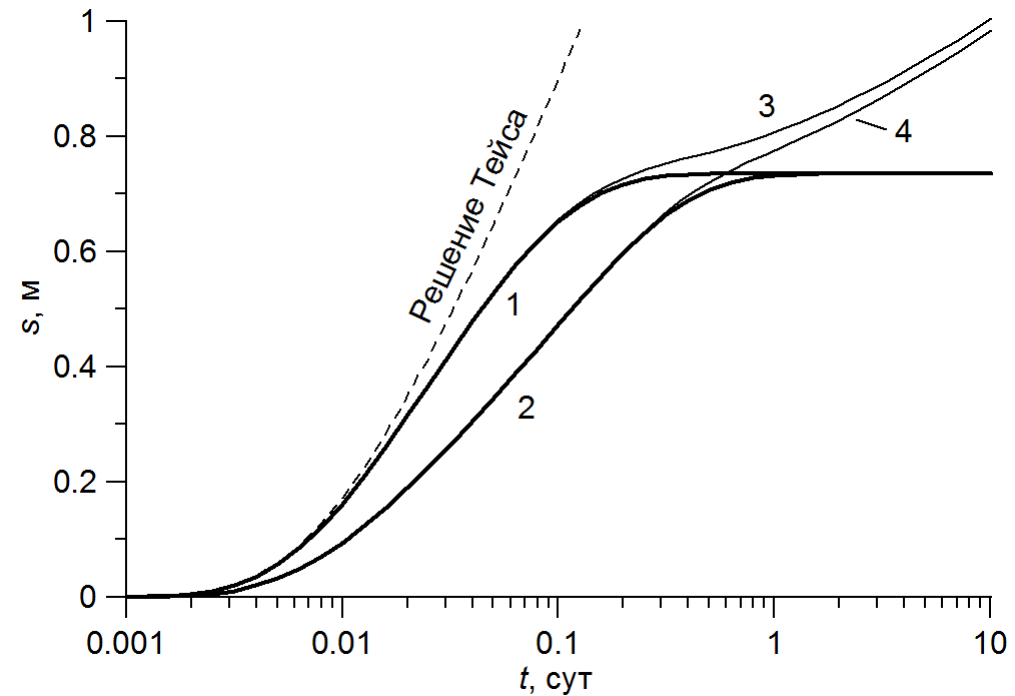


Два участка индикаторной кривой

Водоносные комплексы с перетеканием



- Изменение уровня в смежном пласте
- Влияние емкости слабопроницаемого слоя



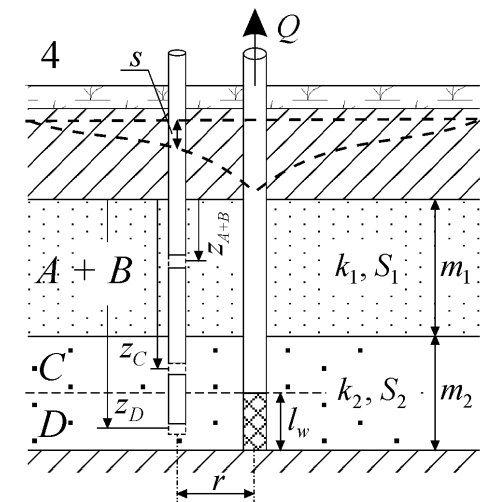
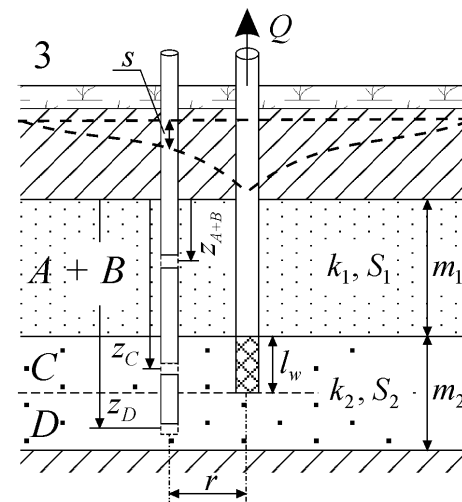
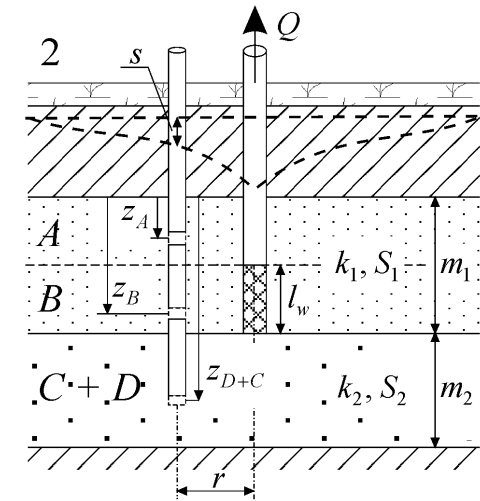
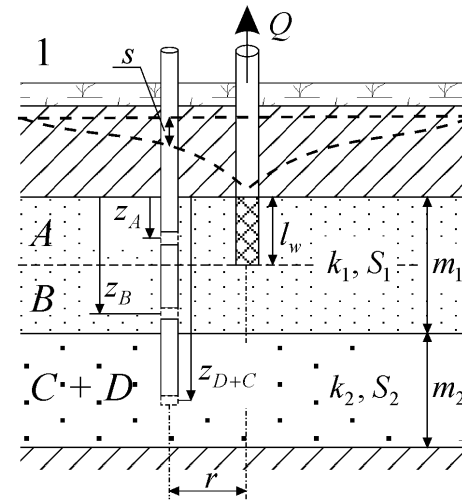
Форма кривой и количество участков зависит от изменения уровня в смежном пласте и емкости разделяющего слоя

Двухслойный комплекс

Два водоносных пласта с близкими
фильтрационными свойствами

Решение Джавандела и Визерспуна

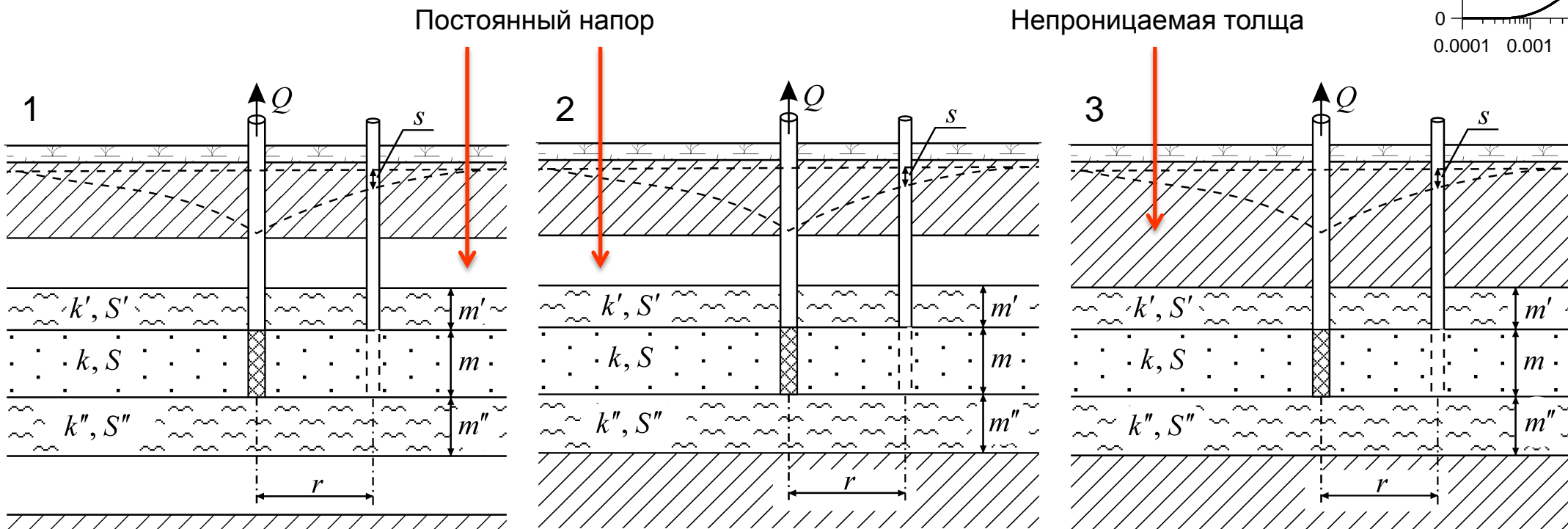
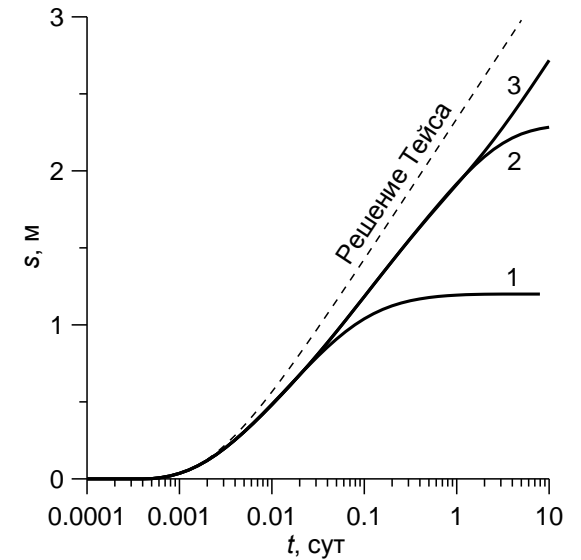
Аналитическое решение описывает изменение
уровня в двух примыкающих водоносных
пластах с близкими свойствами



Слоистые системы

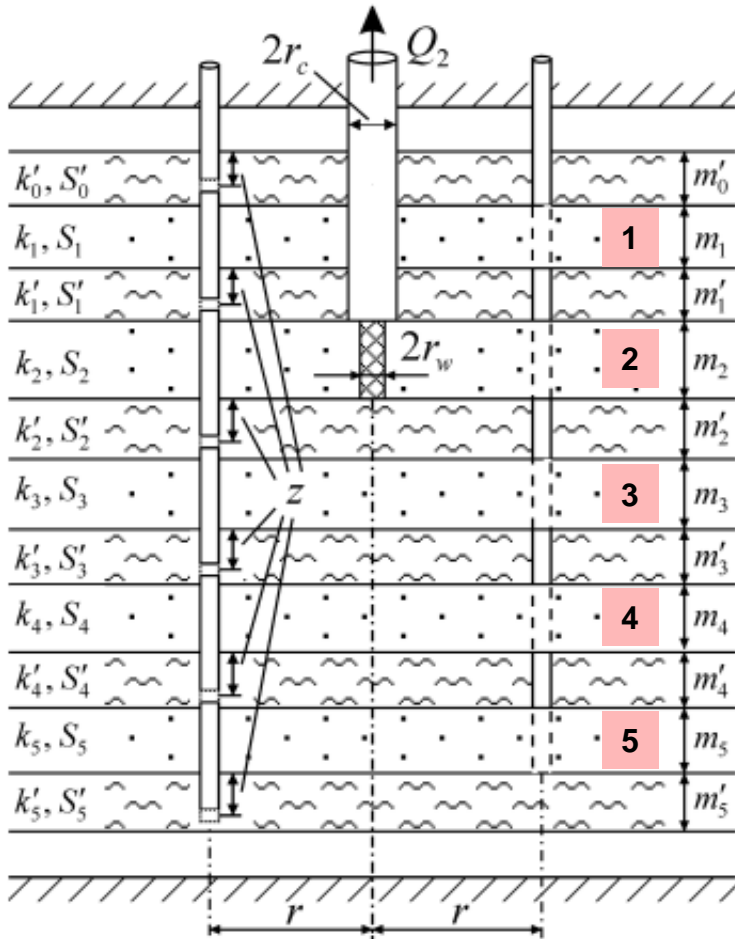
Решения: Хантуш, Менч

График зависит от граничных условий на кровле и подошве системы



Многопластовые системы

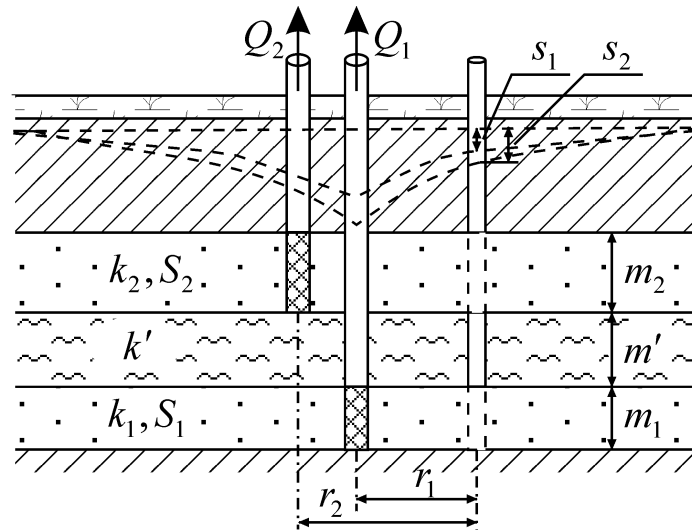
До пяти опробуемых водоносных пластов
+ граничные условия на кровле и подошве



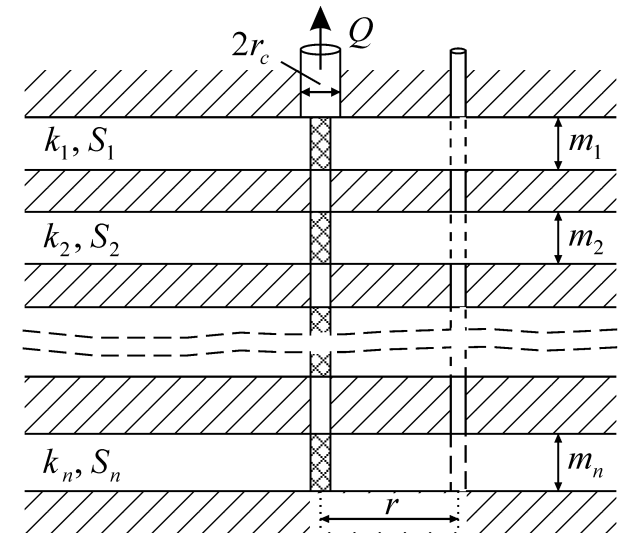
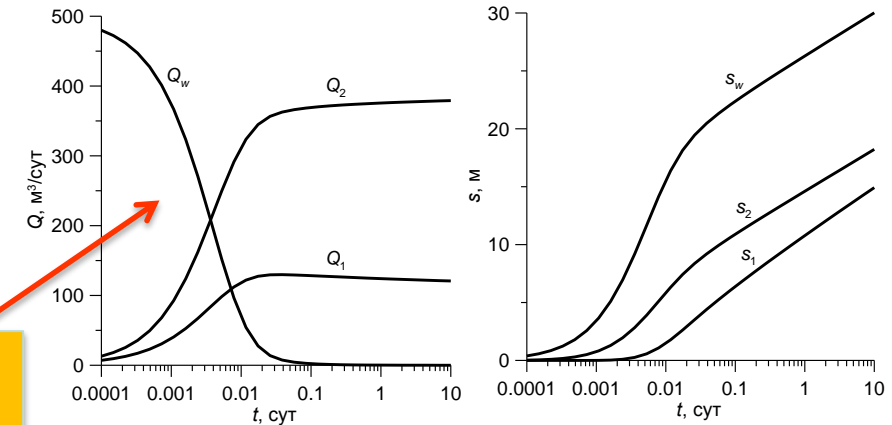
$$Q_i \approx Q T_i / \sum_{j=1}^n T_j$$

Возможность размещать
опытные скважины в разных
водоносных пластах

Чем больше проводимость,
тем больше расход



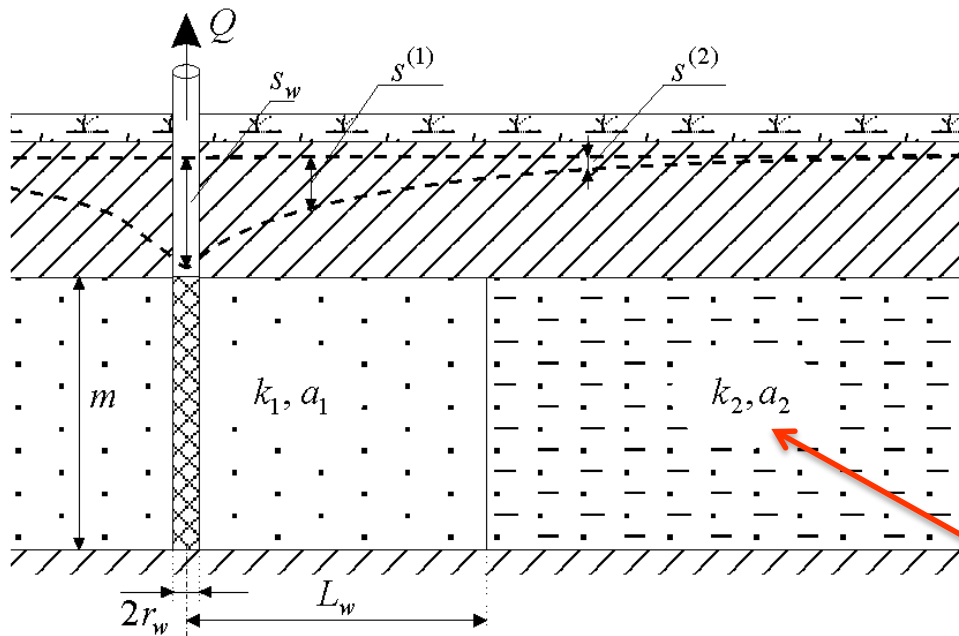
Зависимость расхода и понижения от времени



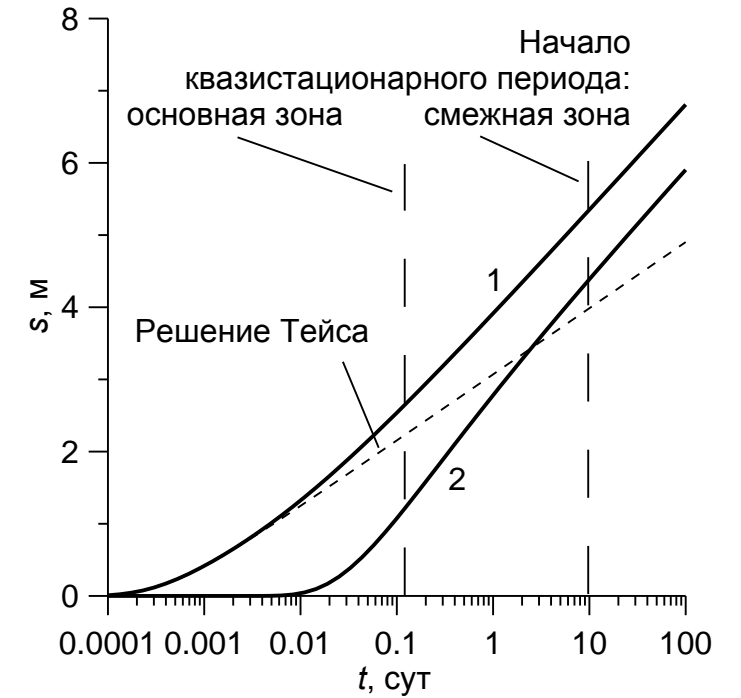
Планово-неоднородные пласты

Линейная граница раздела

Решения: Максимов, Фенске

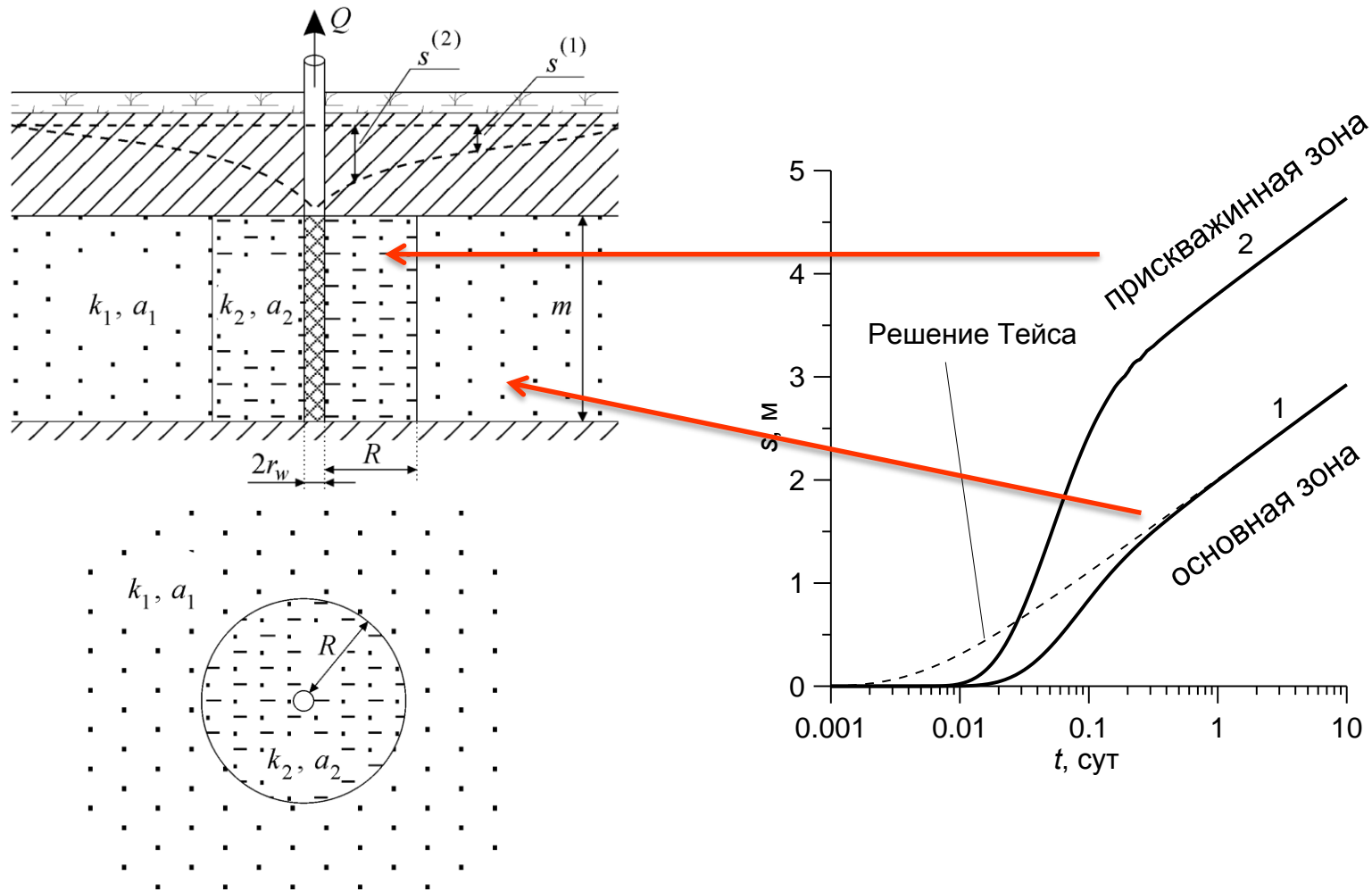


II род $\longleftrightarrow k_2 \longleftrightarrow$ I род

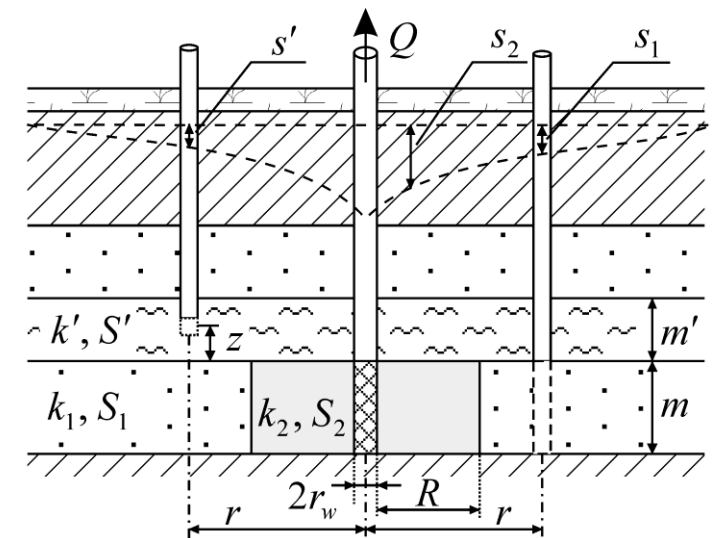


Планово-неоднородные пласты

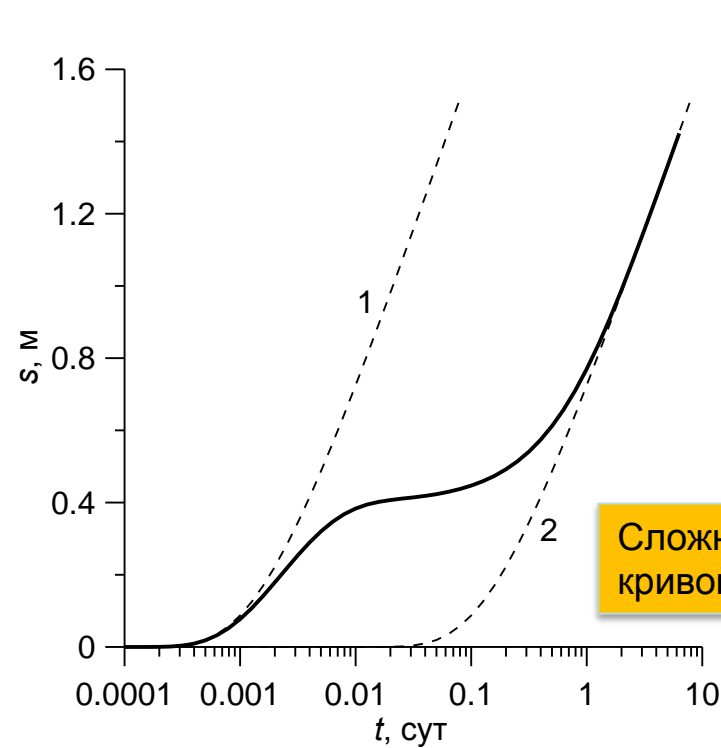
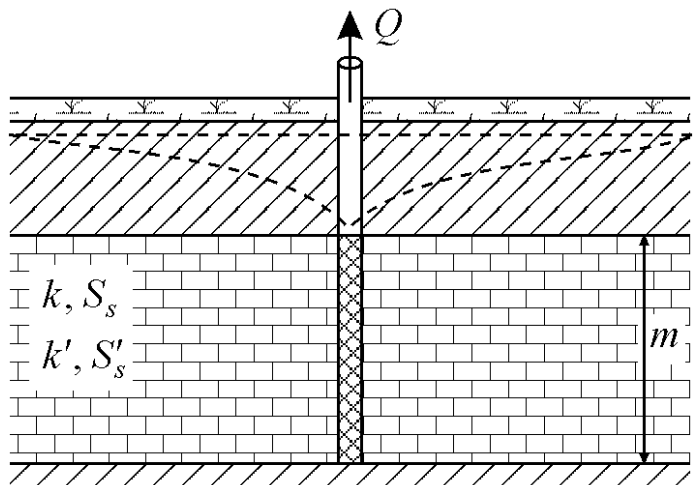
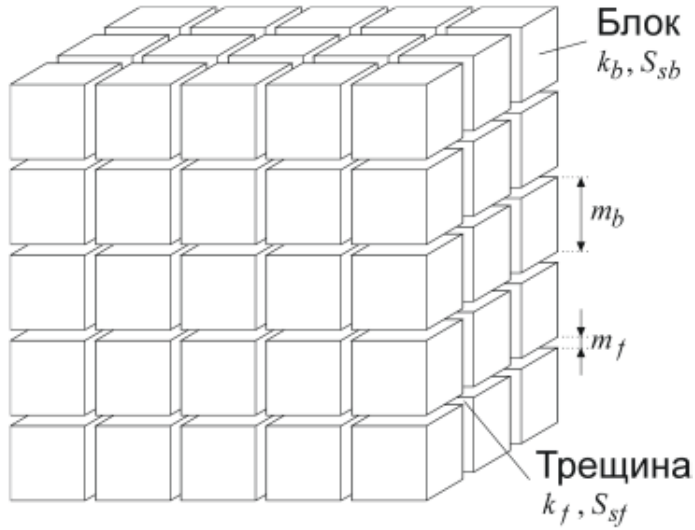
Радиально-неоднородные пласт



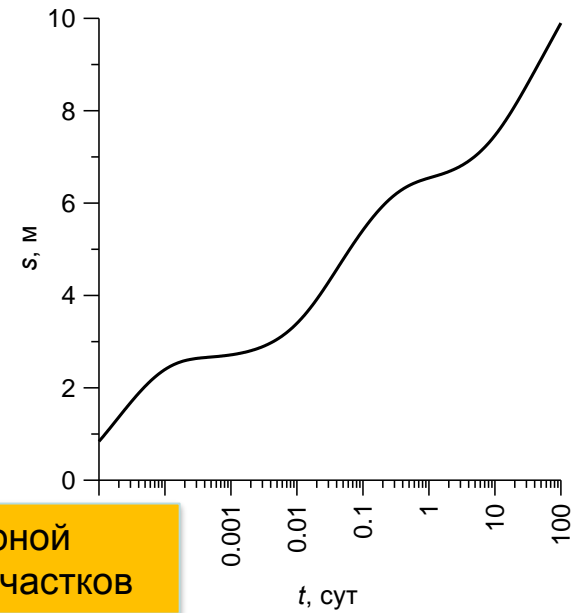
Радиально-неоднородный пласт с перетеканием



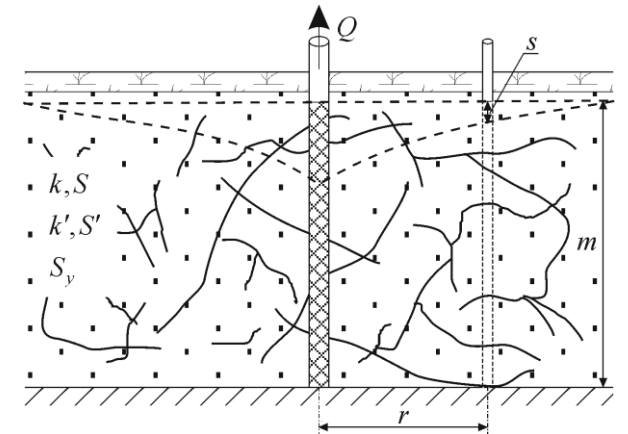
Трещиновато-пористая среда



Сложная форма индикаторной кривой: от 3 до 5 и более участков

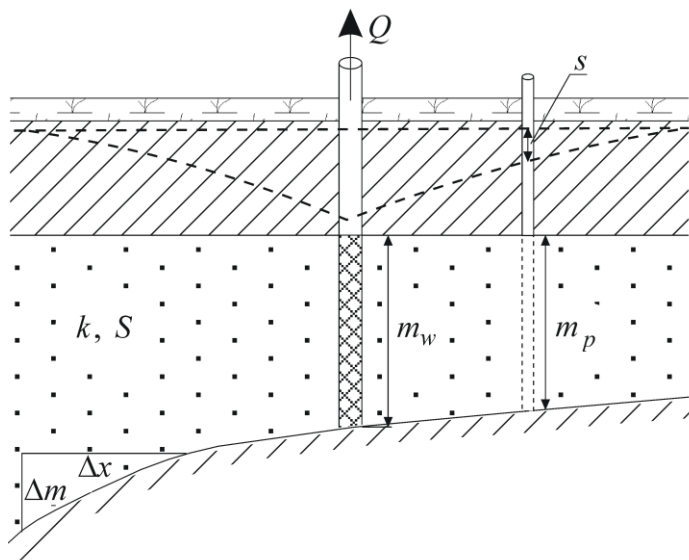


Решения: Уоррен и Рут; Менч;
Стрельцова; Догерти и Бабу



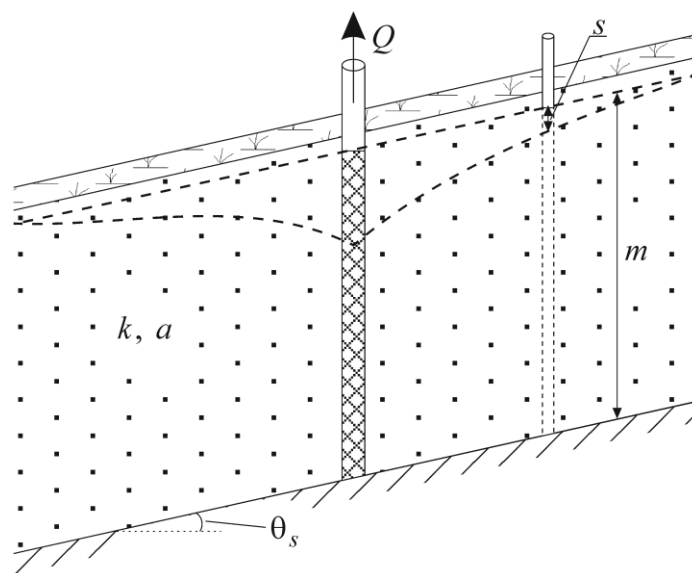
Наклонные пласты и пласты переменной мощности

Напорный пласт
переменной мощности



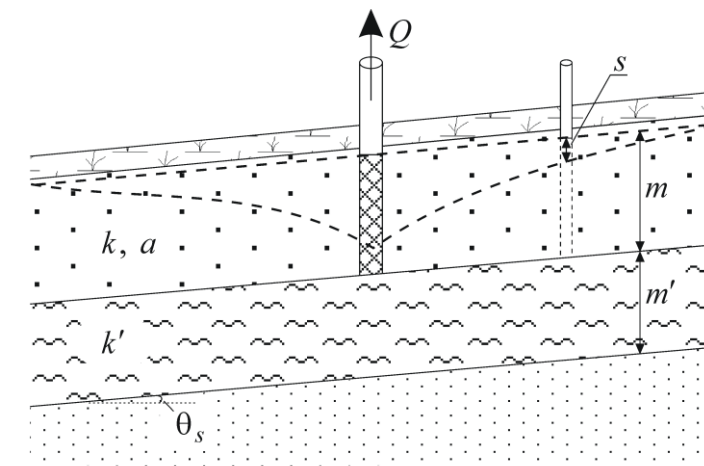
$$\Delta m / \Delta x < 0.2$$

Безнапорный наклонный пласт



$$\tan \theta_s < 0.2$$

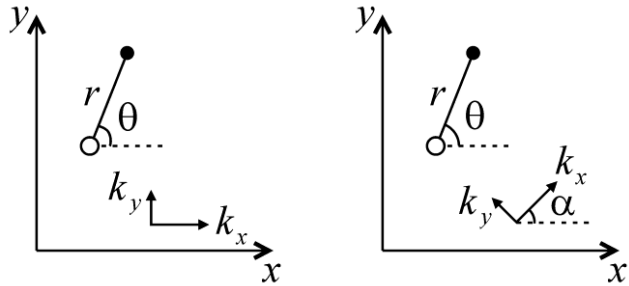
Безнапорный наклонный пласт
с перетеканием



Наклонные пласты актуальны для
безнапорных пластов

Анизотропия водоносных пластов

Плановая анизотропия



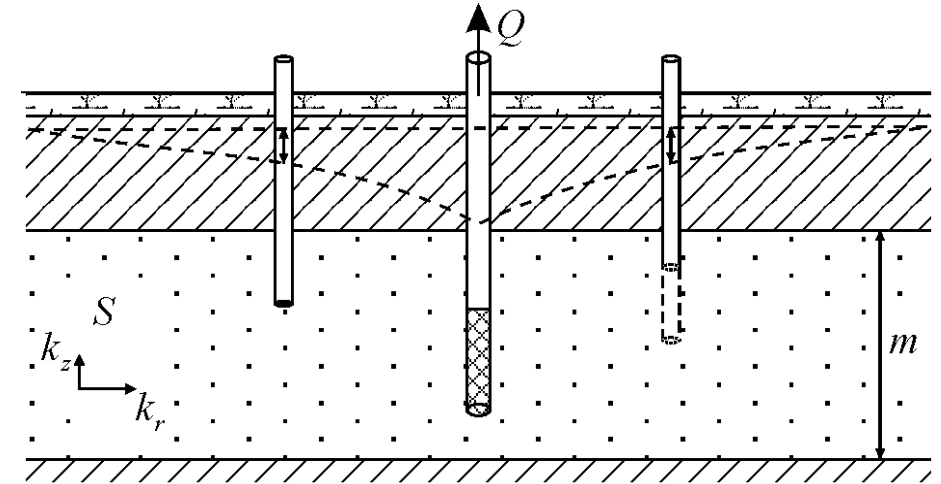
Проводимость по осям анизотропии, м²/сут

$$T_x = k_x m \quad T_y = k_y m$$

Модифицированное решение Тейса

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_x T_y}} W \left[\frac{r^2 (T_y \cos^2 \theta + T_x \sin^2 \theta) S}{4T_x T_y t} \right]$$

Профильная анизотропия



Коэффициент анизотропии, –

$$\chi = \sqrt{\frac{k_z}{k_r}}$$

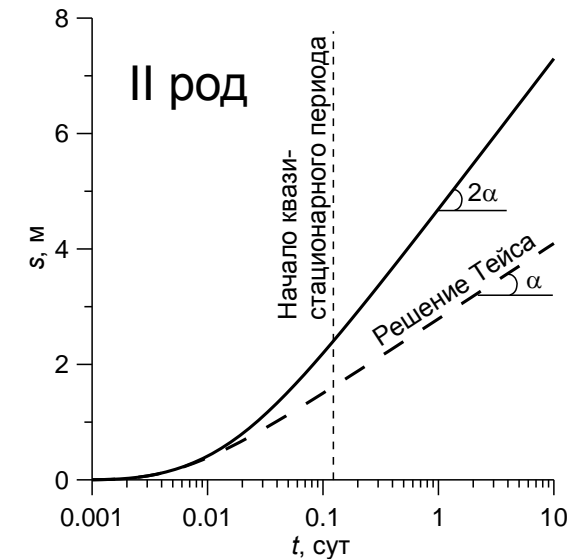
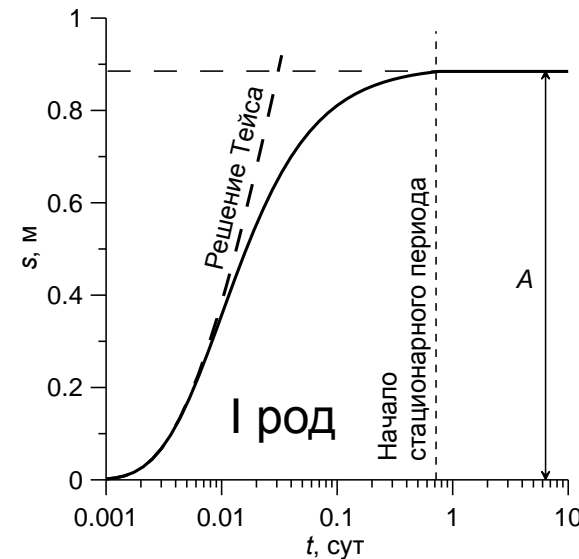
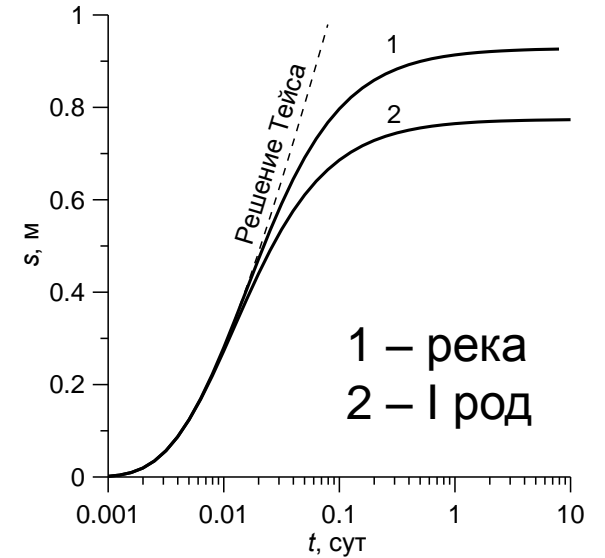
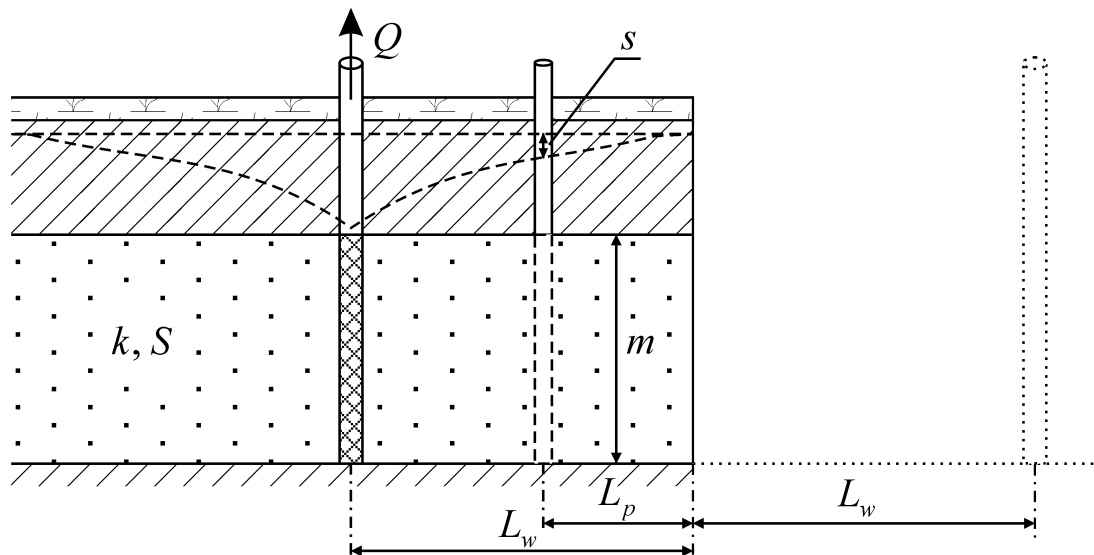
Пьезопроводность по горизонтали и вертикали, м²/сут

$$a_r = \frac{k_r}{S} \quad a_z = \frac{k_z}{S}$$

Границы фильтрационного потока

Граничные условия:

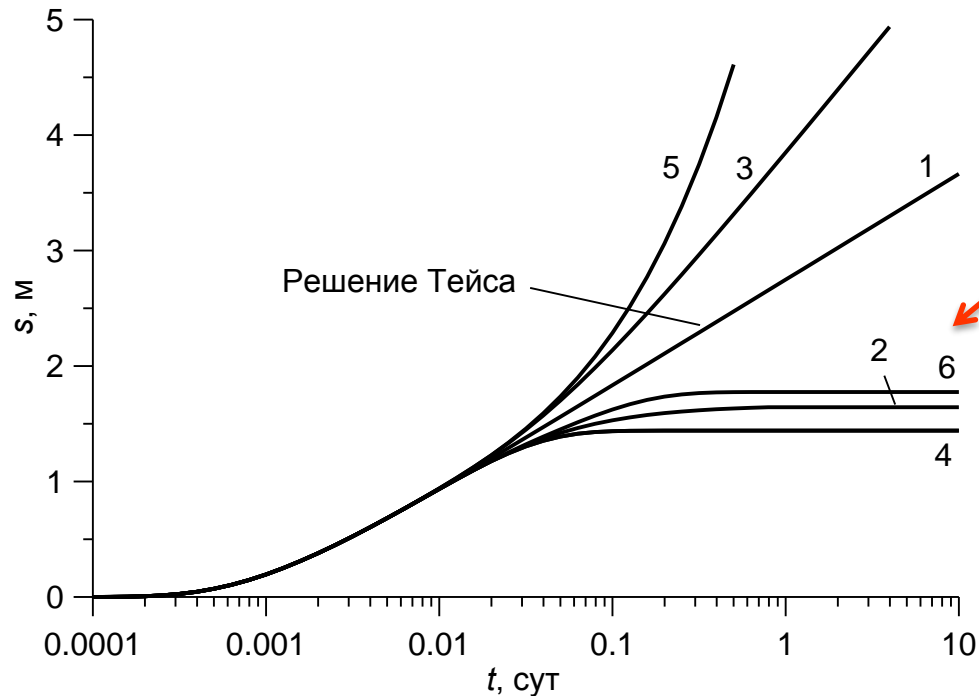
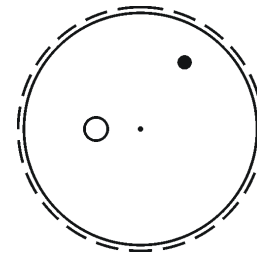
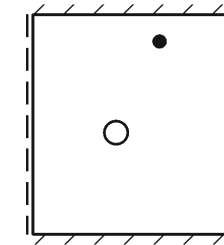
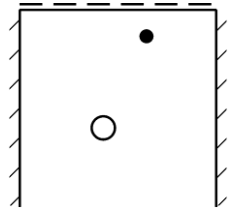
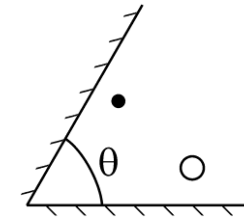
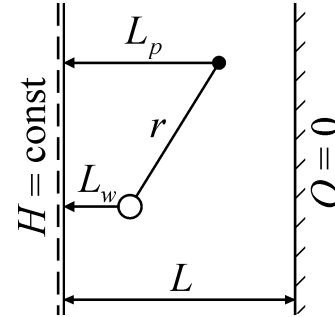
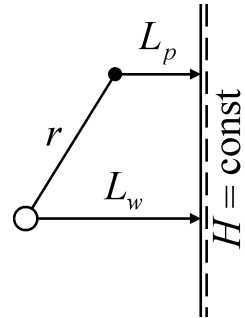
- I род (постоянный напор на границе: $H = \text{const}$)
- II род (постоянный расход на границе: $Q = \text{const}$, при $Q = 0$ – непроницаемая граница)
- III род (наличие связи между напором и расходом)
- IV род (плановая неоднородность)



Плановые границы фильтрационного потока

Водоносные пласты:

- Полуограниченные
- Пласт-полоса
- Угловые пласты
- U-образные пласты
- Прямоугольные пласты
- Круговые пласты

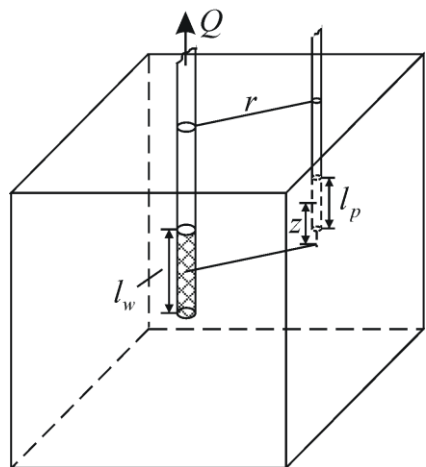


При наличии границы I рода
наступает стационарный поток

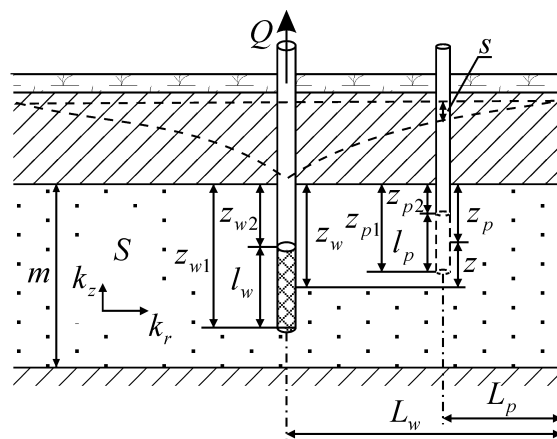
- 1 – неограниченный пласт
- 2 – полуограниченный пласт с границей I рода
- 3 – полуограниченный пласт с границей II рода
- 4 – пласт-полоса с границами I рода
- 5 – пласт-полоса с границами II рода
- 6 – пласт-полоса с границами I и II рода

Плановые и профильные границы фильтрационного потока

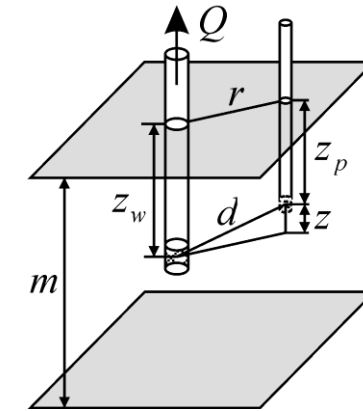
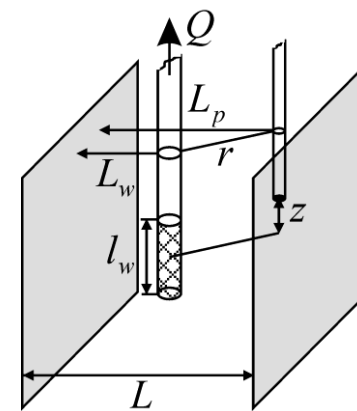
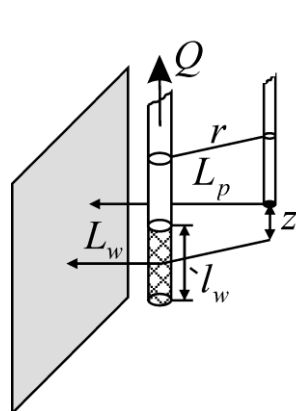
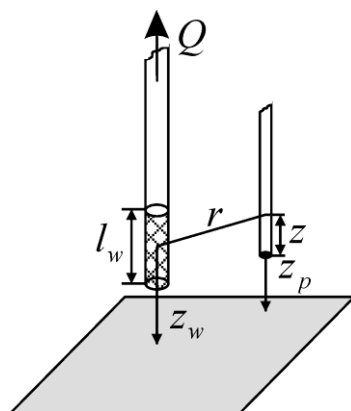
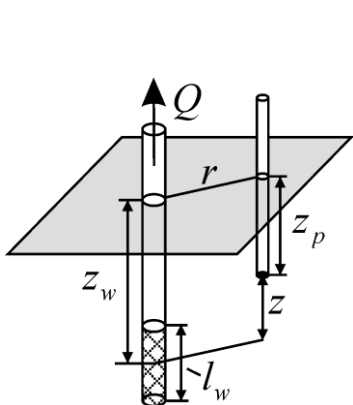
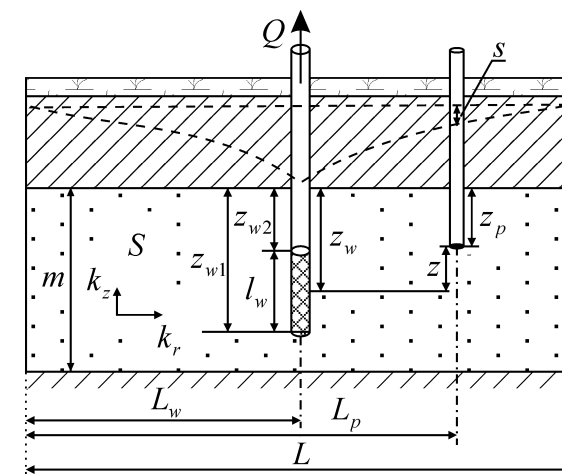
Пласт, неограниченный в плане и разрезе



Несовершенная скважина, полуограниченный пласт



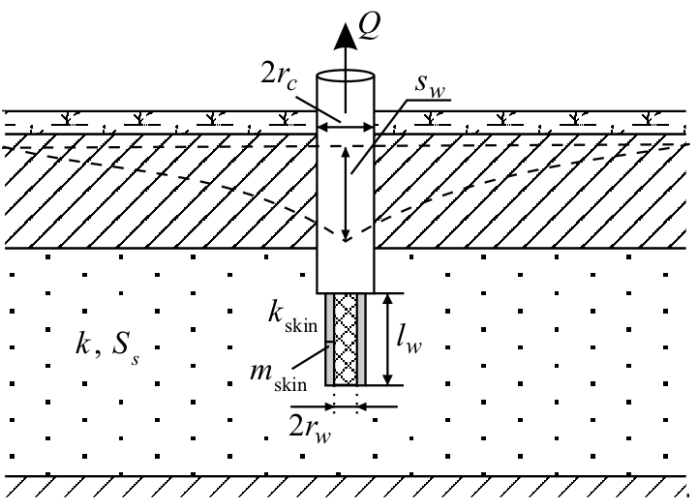
Несовершенная скважина, пласт-полоса



Несовершенство скважин

- По степени вскрытия
- По характеру вскрытия (скин-эффект)

Емкость скважин, скин-эффект



Безразмерная емкость:

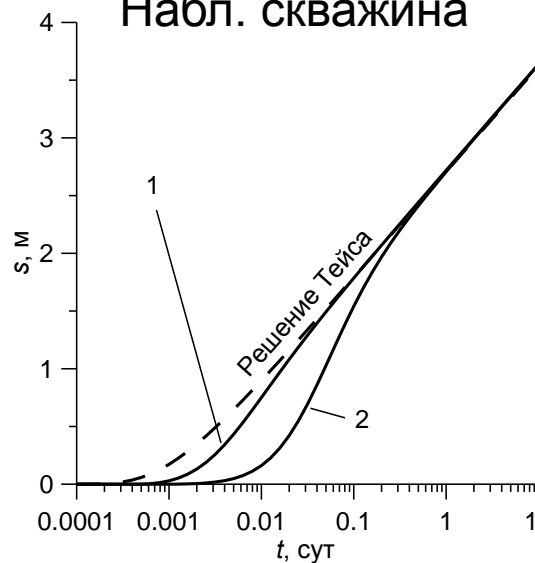
$$W_D = \frac{r_c^2}{2r_w^2 S_s l_w}$$

$$W_D = \frac{r_c^2}{2r_w^2 S}$$

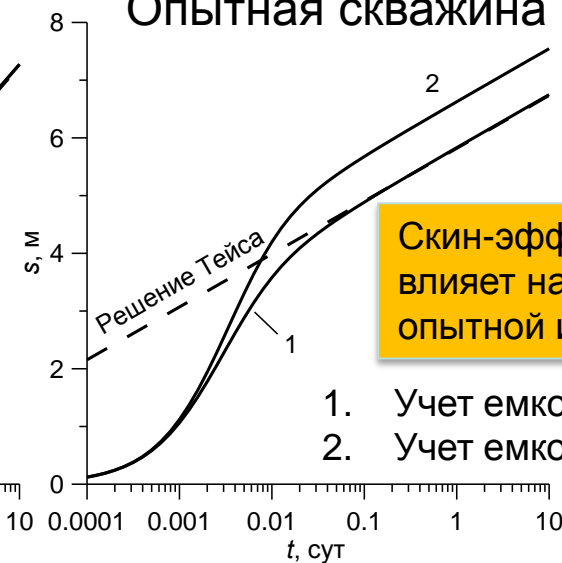
Безразмерный скин:

$$W_{skin} = \frac{km_{skin}}{r_w k_{skin}}$$

Набл. скважина

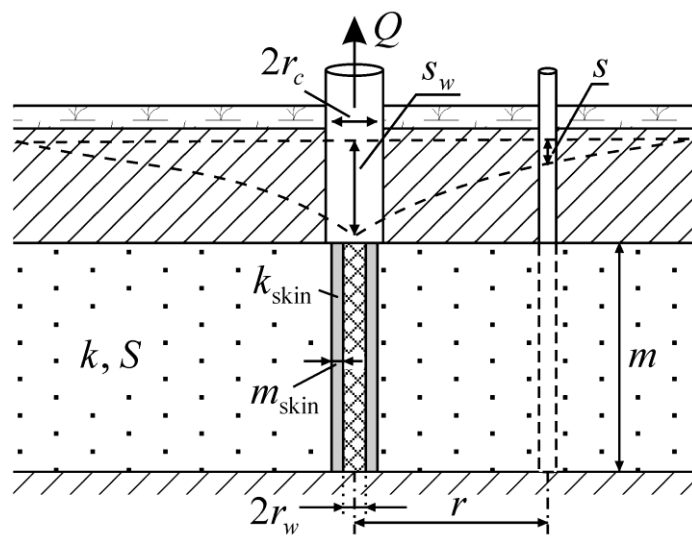
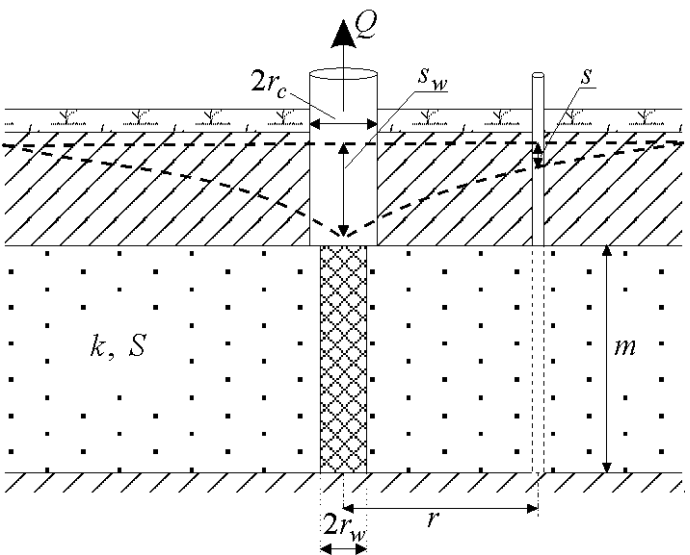


Опытная скважина



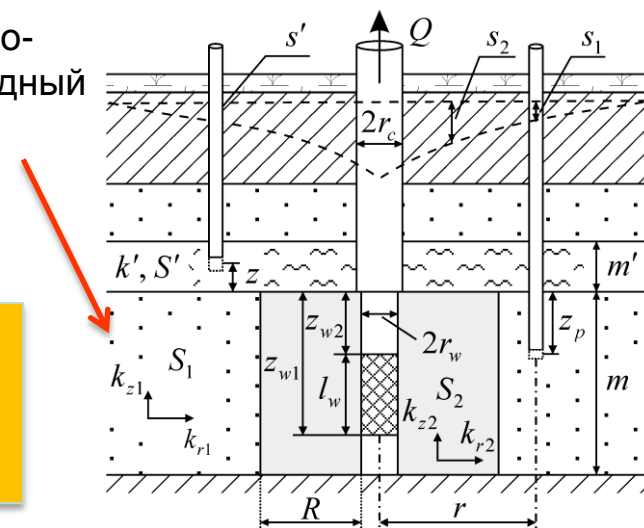
Скин-эффект по разному влияет на понижение в опытной и в наб. скв.

1. Учет емкости
2. Учет емкости и скина



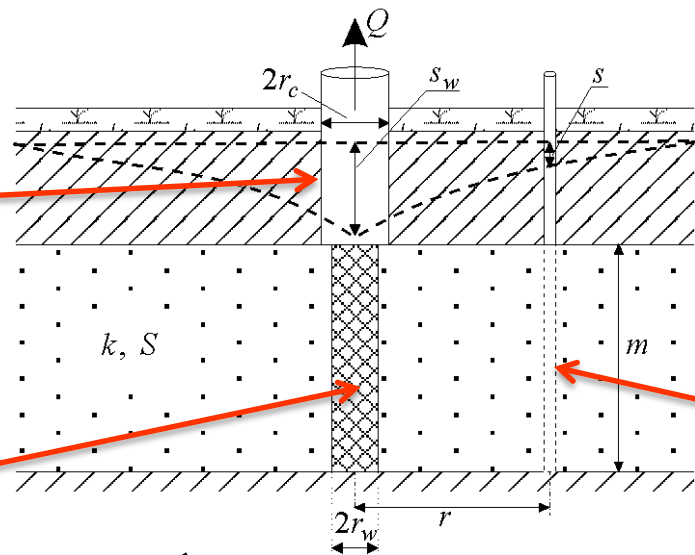
Радиально-неоднородный пласт:

Кратковременные откачки приводят к ошибкам при обработке откачки



Емкость опытной скважины

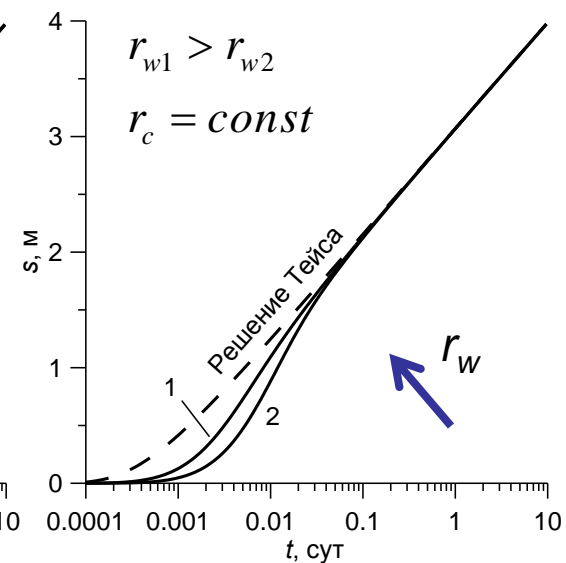
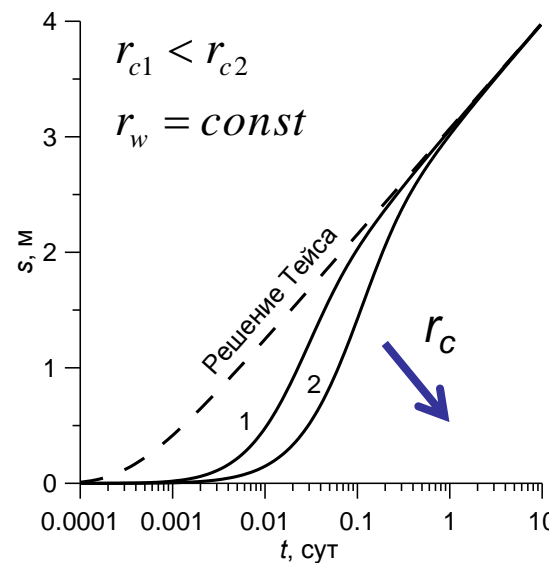
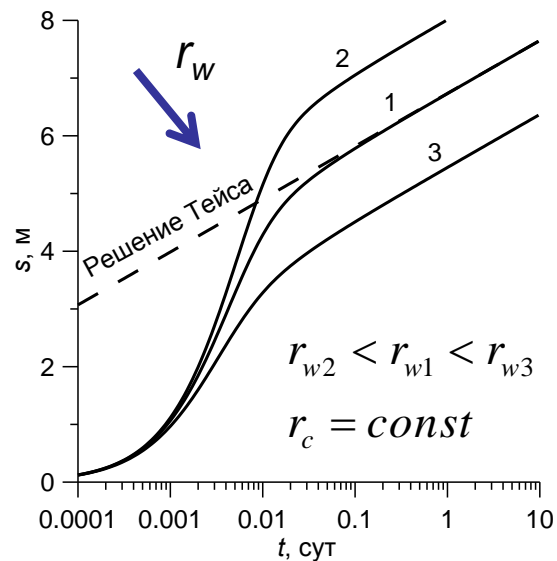
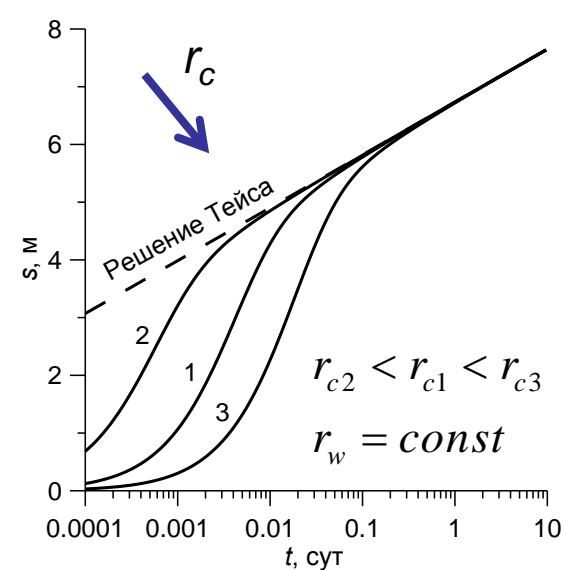
Размер обсадной трубы оказывает существенное влияние на изменение уровня в начале откачки



Чем дальше наблюдательная скважина от опытной, тем меньше влияние на нее оказывают скважинные эффекты

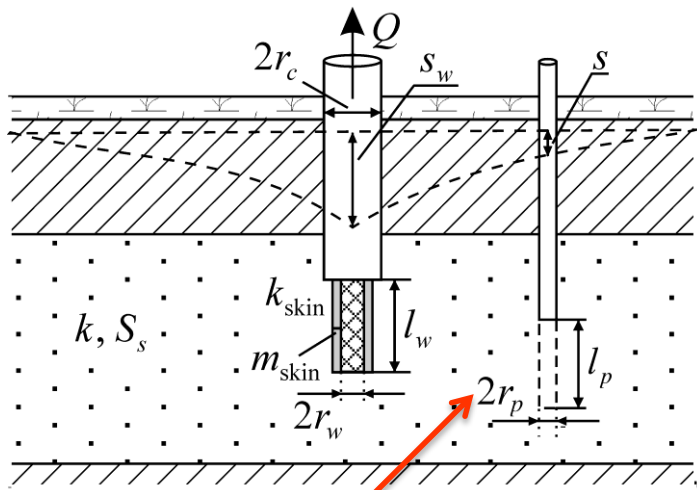
Понижение в опытной скважине

Понижение в наблюдательной скважине



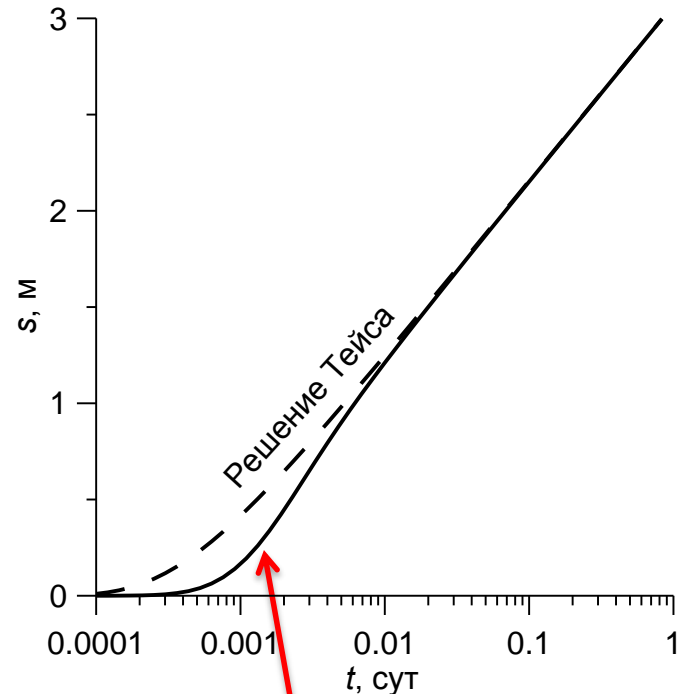
Емкость наблюдательной скважины

Емкость наблюдательной скважины, как правило, оказывает незначительное влияние на изменение уровня



Радиус наблюдательной скважины

Коэффициент формы

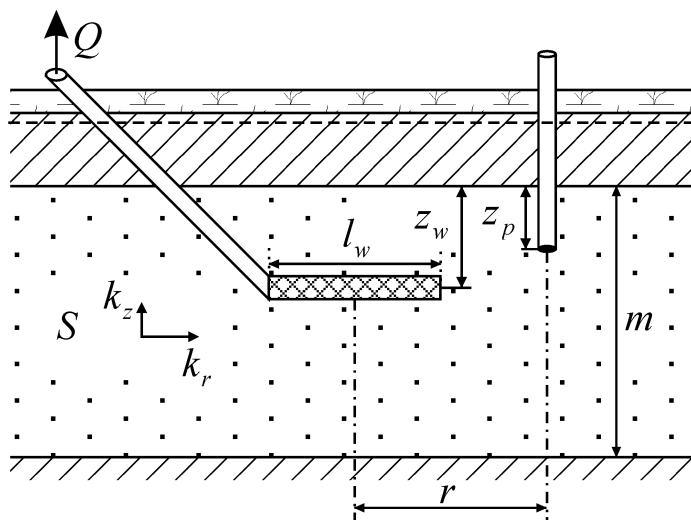


Решение с учетом емкости наблюдательной скважины

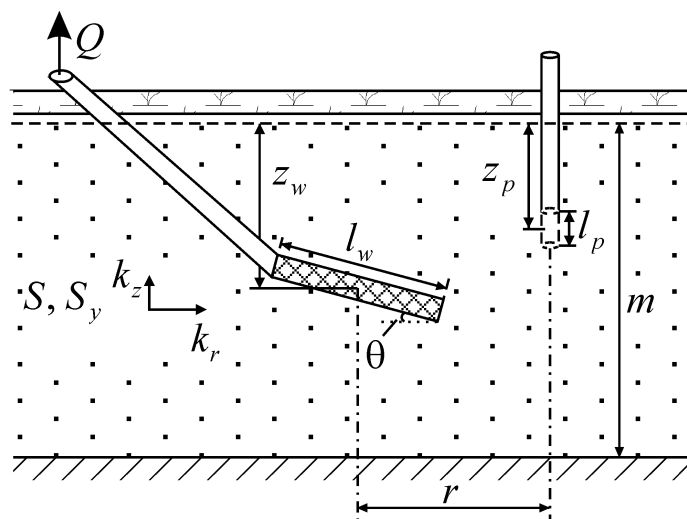
No	Схема	Коэффициент формы, м
1		$F = \frac{2\pi l_p}{\ln\left(l_p / \chi r_p + \sqrt{1 + (l_p / \chi r_p)^2}\right)}$
2		$F = 4r_p$
3		$F = 2\pi r_p$
4		$F = \frac{2\pi m}{\ln\left(2m / \chi r_p + \sqrt{1 + (2m / \chi r_p)^2}\right)}$
5		$F = \frac{2\pi l_p}{\ln\left(l_p / 2\chi r_p + \sqrt{1 + (l_p / 2\chi r_p)^2}\right)}$
6		$F = 5.5r_p$
7		$F = 4\pi r_p$
8		$F = \frac{\pi(l_p + m)}{\ln\left(m / \chi r_p + \sqrt{1 + (m / \chi r_p)^2}\right)}$

Горизонтальные и наклонные скважины

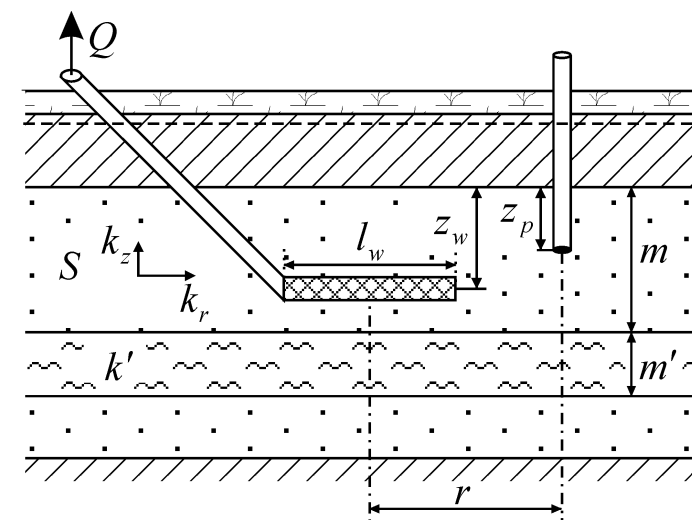
Напорный пласт



Безнапорный пласт

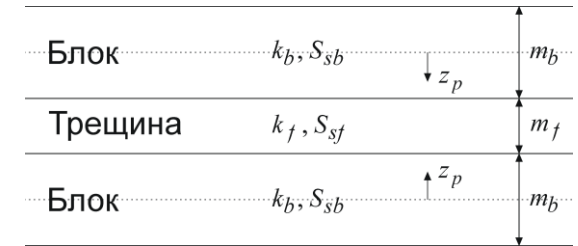
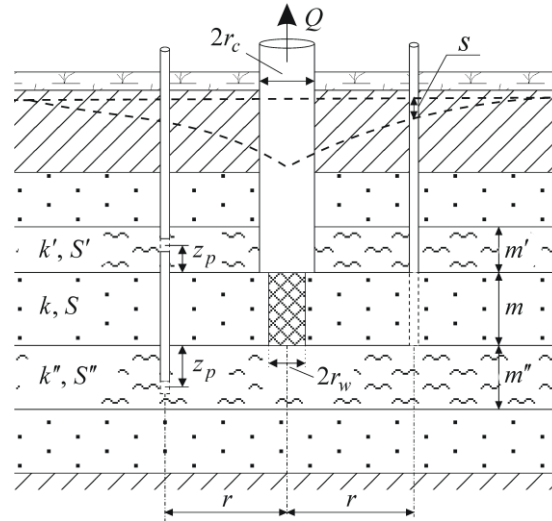


Водоносный пласт с перетеканием

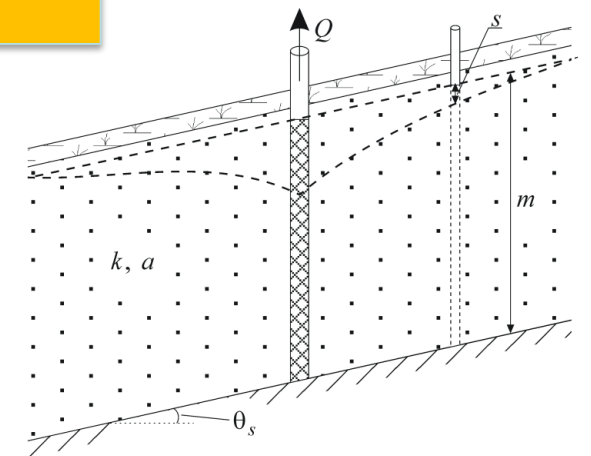
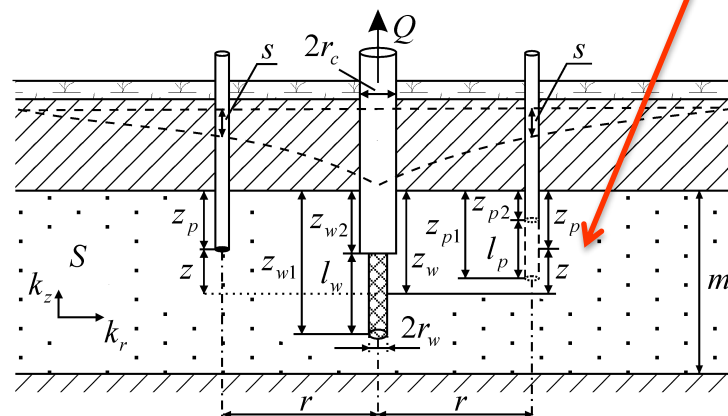
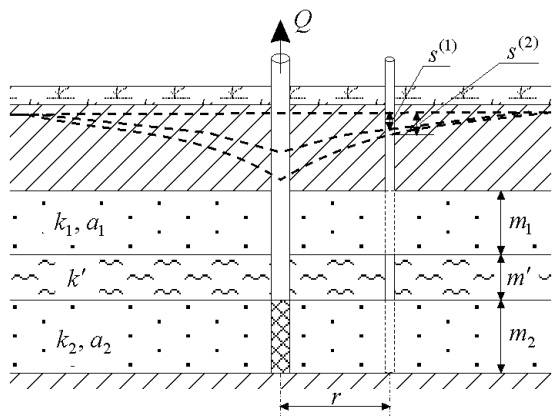


Точки наблюдения

- В ОСНОВНОМ ПЛАСТЕ
- В СМЕЖНОМ ПЛАСТЕ
- в разделяющем слое
- в трещине
- в блоке
- НИЖЕ или ВЫШЕ скважины



Понижение в несовершенных скважинах зависит от длины фильтра и его положения в разрезе

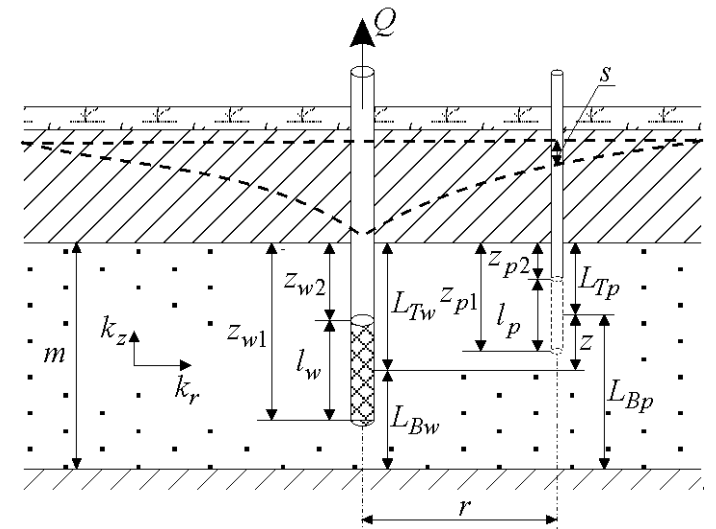
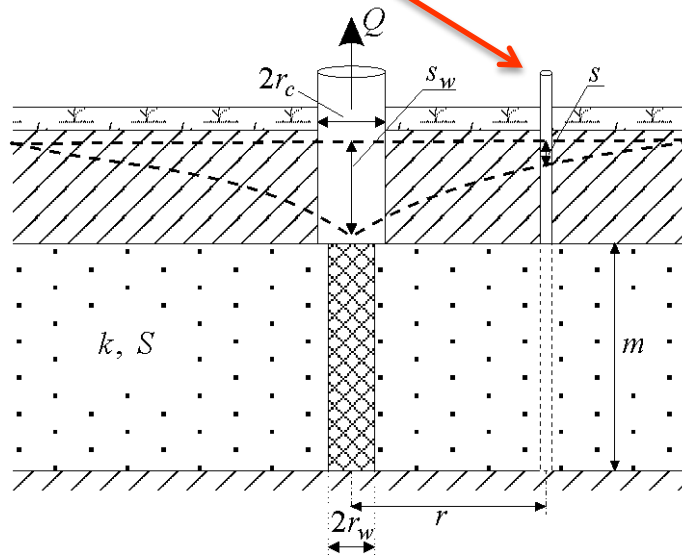
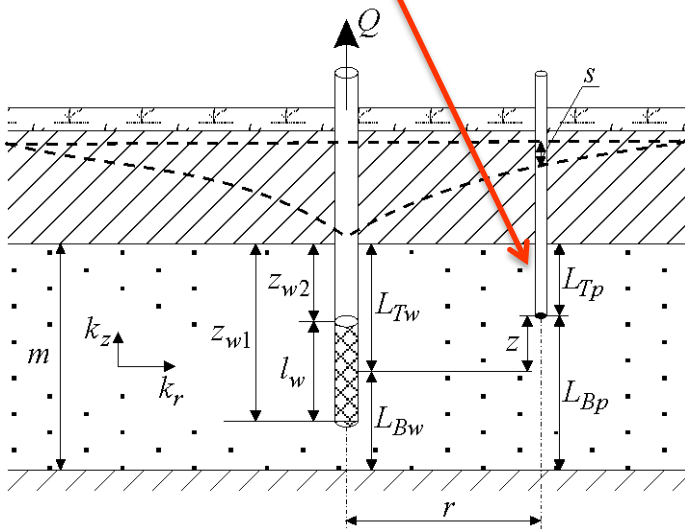


Наблюдения за изменением уровня

- Опытная скважина
- Наблюдательная скважина
- Пьезометр

Пьезометр показывает понижение в точке, наблюдательная скважина – осредненное понижение по стволу скважины

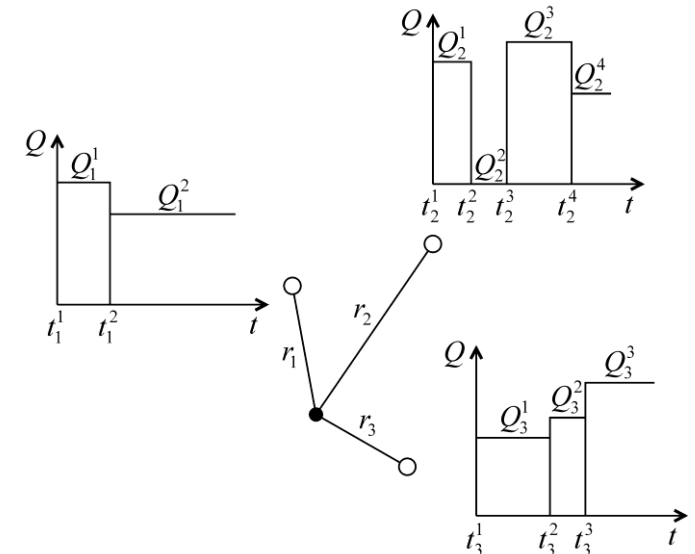
При откачке из совершенной скважины понижение не меняется по глубине



Виды ОФО

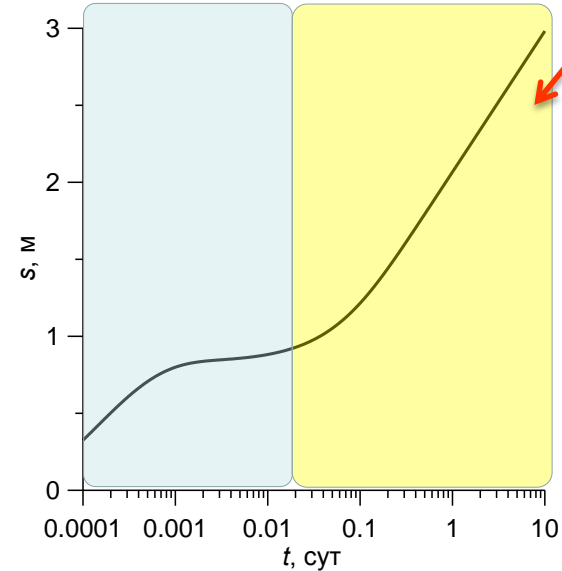
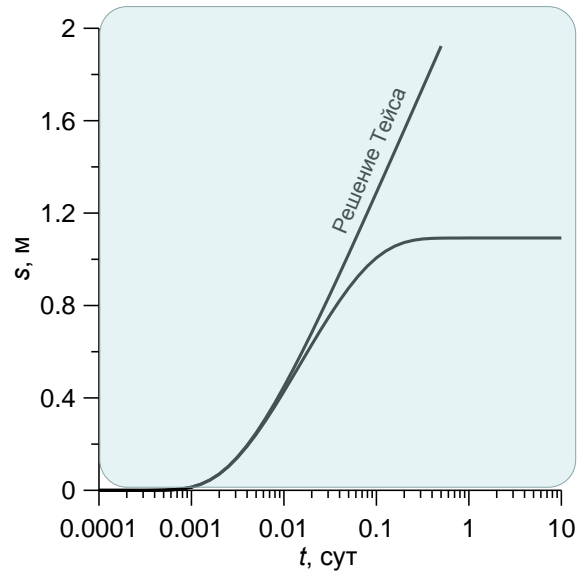
- Откачки (нагнетания) с постоянным расходом
- Откачки с переменным расходом
- Групповые откачки с постоянным или переменным расходом
- Откачки с постоянным понижением
- Экспресс-опробования

✓ Одиночные откачки, кустовые откачки

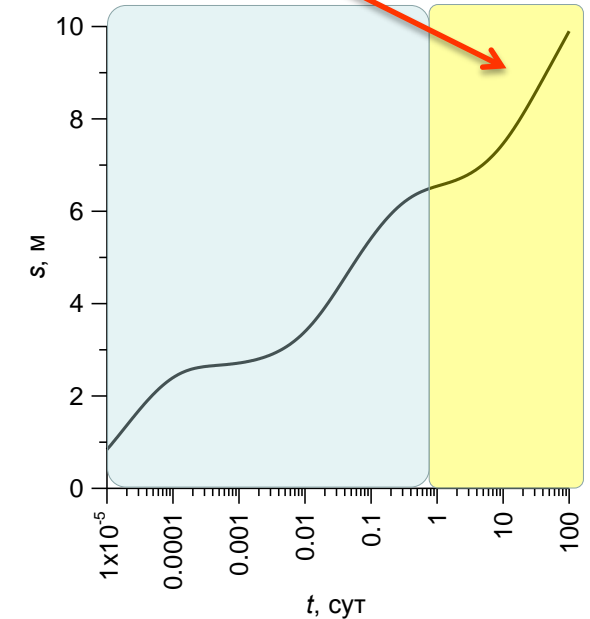


Режимы фильтрации подземных вод

- Напорный (упругий) режим фильтрации
- Безнапорный (гравитационный) режим фильтрации

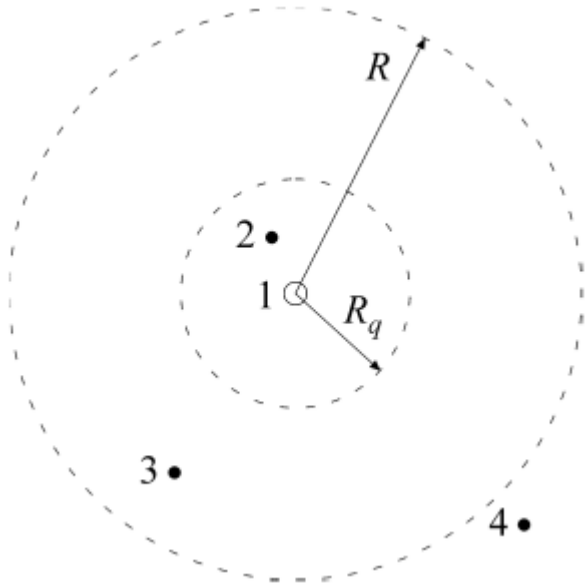


Гравитационный режим



Режимы снижения уровня

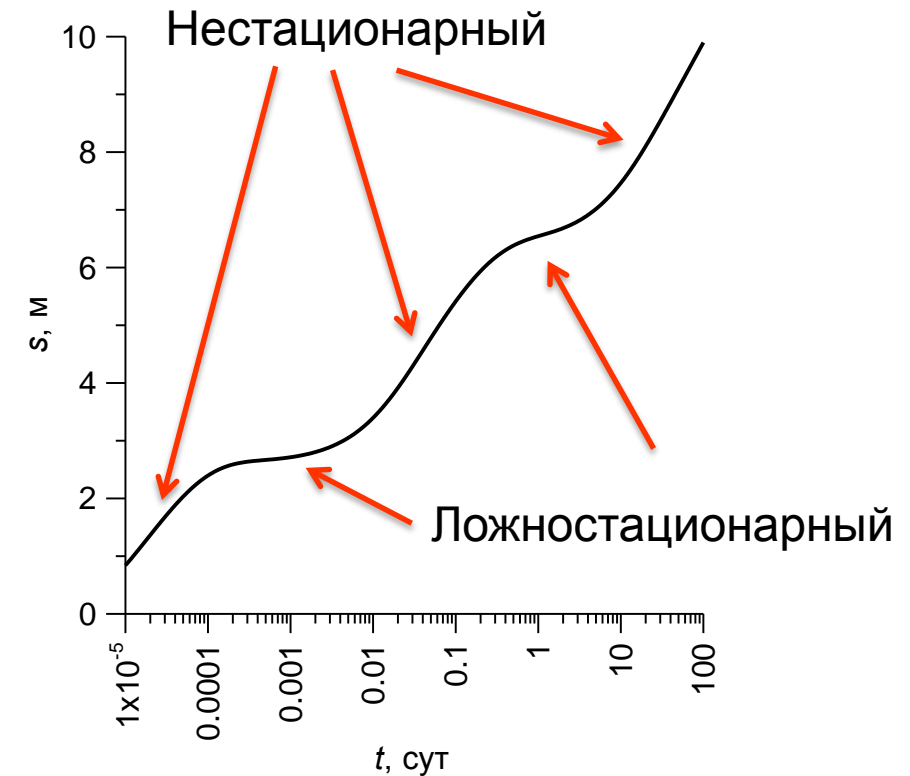
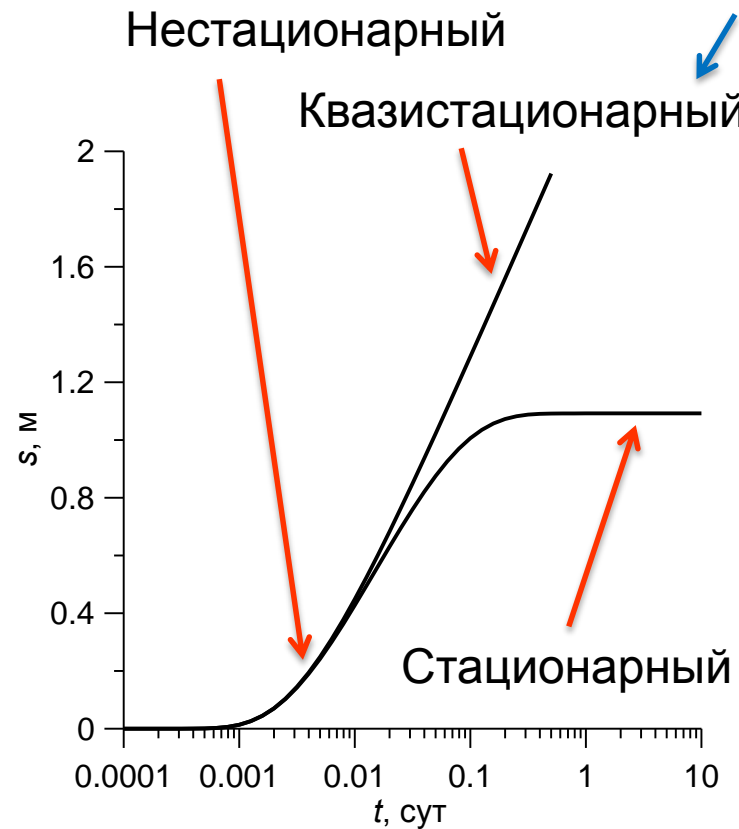
- Нестационарный
- Квазистационарный
- Ложностационарный
- Стационарный



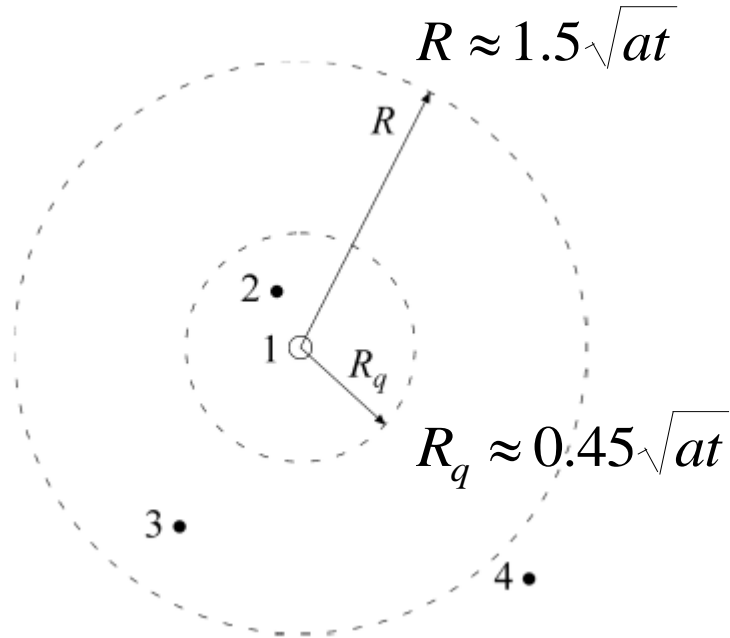
Время наступления
квазистационарного режима:

$$t \approx 5r^2 / a$$

Замеры уровня, отвечающие квазистационарному периоду, обрабатываются графоаналитическими способами

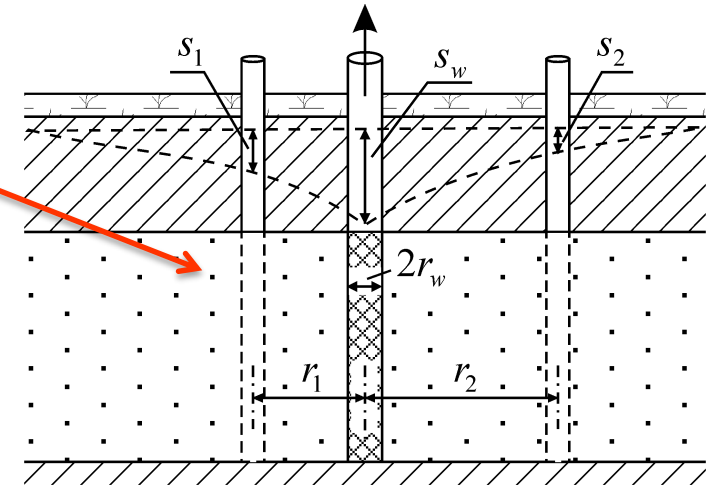


Радиус влияния откачки



Надежность определения радиуса влияния возрастает при наличии понижений в двух скважинах

Оценка радиуса влияния по двум скважинам



Напорный пласт:

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2}$$

Безнапорный пласт:

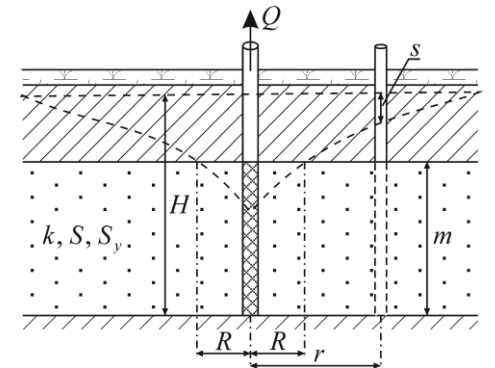
$$\lg R = \frac{s_1(2m - s_1) \lg r_2 - s_2(2m - s_2) \lg r_1}{s_1(2m - s_1) - s_2(2m - s_2)}$$

Напорно-безнапорный пласт:

$$\lg R = \frac{[(2H - m)m - (H - s_1)^2] \lg r_2 - [(2H - m)m - (H - s_2)^2] \lg r_1}{(H - s_2)^2 - (H - s_1)^2}$$

$$s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2}$$

$$s \approx \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{R}{r}$$



Базовые аналитические решения

- **Напорный пласт, совершенная скважина**
 - решения Тейса, Менча, Карслоу и Егера, Пападопулоса, Купера, Джейкоба
- **Напорный пласт, несовершенная скважина**
 - решения Хантуша, Менча
- **Безнапорный пласт**
 - решения Болтона, Ньюмана, Менча, Боултона и Стрельцова, Менча и Прикета
- **Пласт с перетеканием**
 - решения Хантуша и Джейкоба, Ньюмана и Визерспуна, Ля и Чен-Ву
- **Слоистые системы**
 - решения Хантуша, Менча
- **Двухслойный пласт**
 - решения Мироненко и Сердюкова, Кулей и Кэйса, Джавандел и Визерспун
- **Планово-неоднородный пласт**
 - решения Максимова, Фенске, Йех и Йанг
- **Откачка вблизи реки (граница III рода)**
 - решения Зеегофера и Шестакова, Хантуша
- **Наклонный пласт и пласт переменной мощности**
 - решения Хантуша

Базовые аналитические решения (продолжение)

- **Трещиновато-пористая среда**
 - решения Менча, Уоррена и Рута, Догерти и Бабу, Грингартена, Дженкинса и Прентиса
- **Многопластовые системы**
 - Морохунфола, Ченг
- **Полуограниченные и ограниченные в плане или в разрезе пласты**
 - принцип суперпозиции, функции Грина
- **Групповая откачка и/или переменный расход, откачка из смежных пластов**
 - принцип суперпозиции
- **Экспресс-опробования**
 - решения Купера, Пикинга, Бауэра и Райса, Хворслева, Йеха и Йанга
- **Откачка с постоянным понижением**
 - решения Егера, Хантуша, Стернберга, Йеха и Йанга
- **Откачка из горизонтальной скважины**
 - решения Чана, Злотника

Принцип суперпозиции

Две опытные скважины с постоянным расходом Q_1 и Q_2

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) + \frac{Q_2}{4\pi T} W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)$$

Решение Тейса: $s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right)$

Одна опытная скважина с переменным расходом

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4a(t-t_1)}\right) + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4a(t-t_2)}\right)$$

Несколько опытных скважин с переменным расходом

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1}) W\left(\frac{r_i^2}{4a(t-t_i^j)}\right)$$

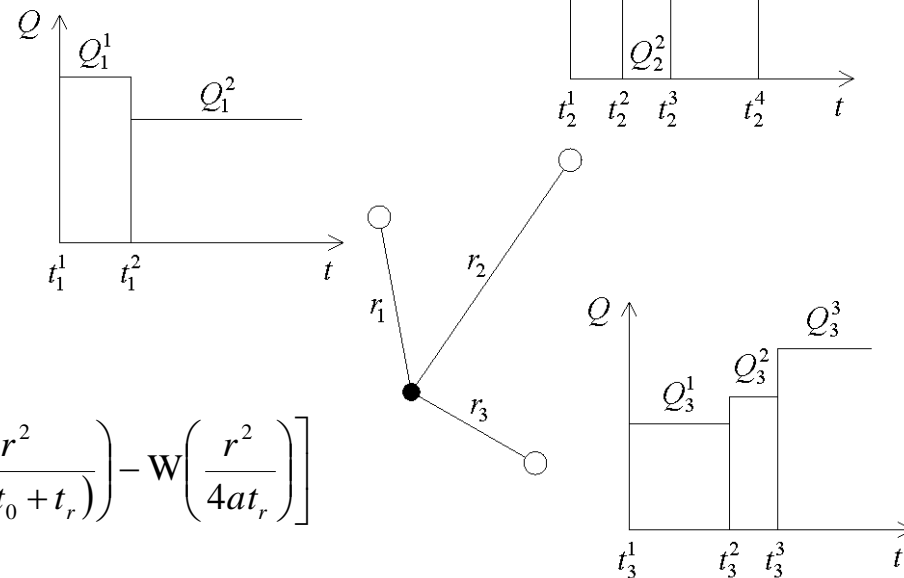
Восстановление уровня

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) - \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]$$

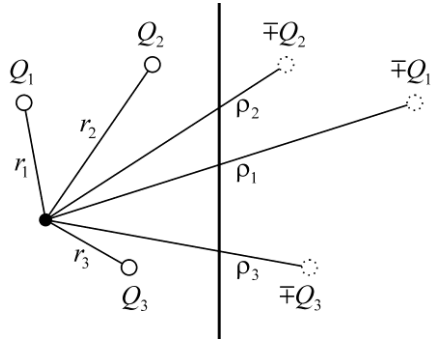
Длительность откачки

Время от начала восстановления

Принцип сложения течений – основной метод решения задач фильтрации при наличии нескольких возмущений или при расположении скважин вблизи границ фильтрационного потока

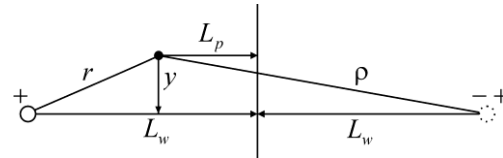


Метод отражений: фиктивные скважины

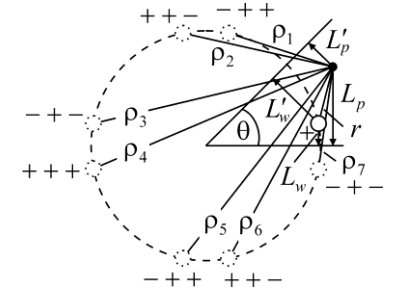


Фиктивные скважины используются для обработки откачек вблизи границ фильтрационного потока

Полугограниченный пласт



Угловой пласт



Фиктивная скважина получается зеркальным отражением опытной скважины от границы

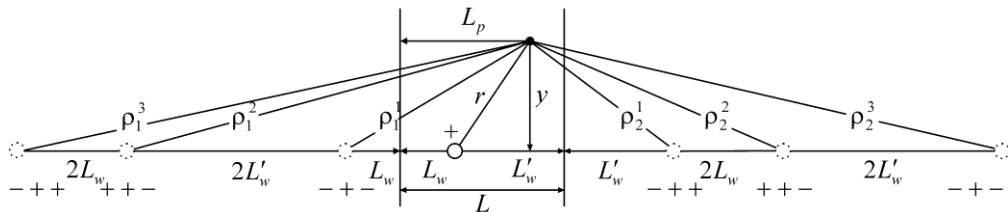
Фиктивная скважина, полученная при отражении от границы I рода, имеет отрицательный расход

Опытные скважины Фиктивные скважины

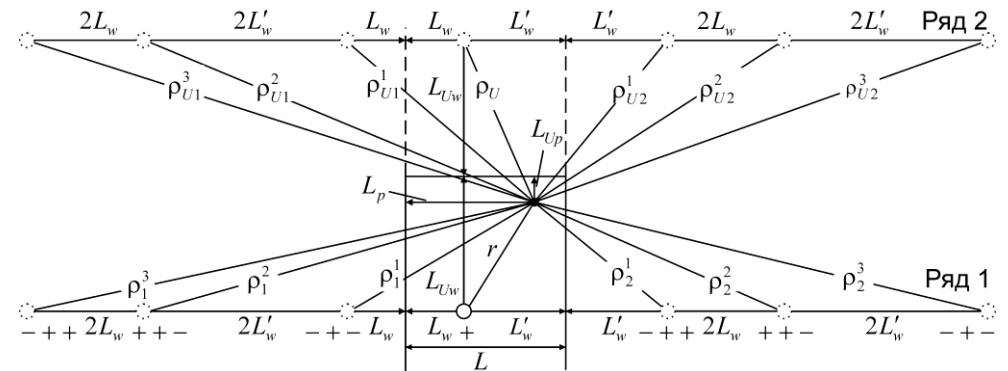
$$s = P \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{n_i^j} \{ (Q_i^j - Q_i^{j-1}) f[r_i, (t - t_i^j)] \}$$

↑
Функция понижения

Пласт-полоса



U-образный пласт



Обработка данных

- **Откачка (нагнетание)** $\longrightarrow s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right) \longrightarrow$

- **Восстановление**

- уровень отсчитывается от начала откачки $\longrightarrow s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right] \longrightarrow$

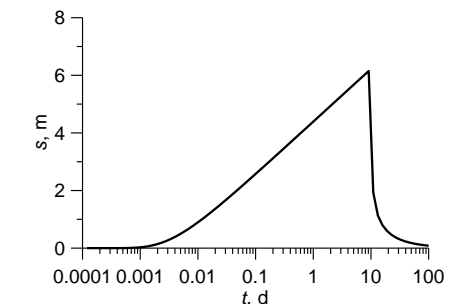
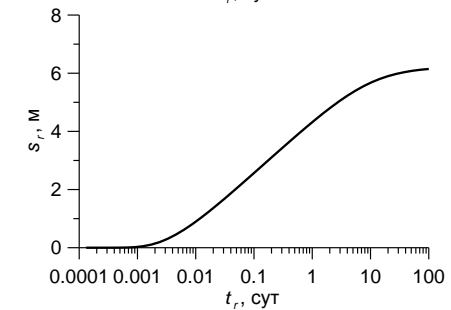
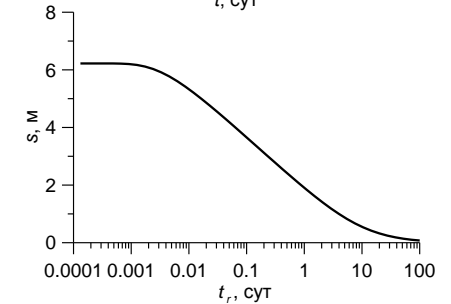
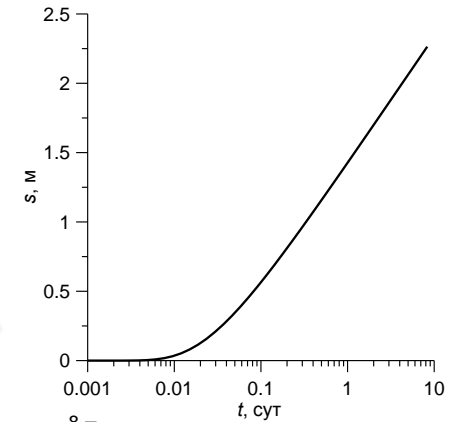
$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r}$$

- уровень отсчитывается от начала восстановления $\longrightarrow s_r = \frac{Q}{4\pi T} (s_0 - s) \longrightarrow$

- пренебрегаем периодом откачки $t_r < 0.1t_0$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2}$$

- **Совместная обработка откачки и восстановления** \longrightarrow



t_0 – длительность откачки; t_r – время от начала восстановления

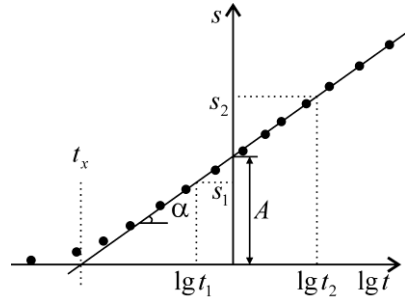
Способы обработки

- **Графоаналитические способы** (прямая линия, эталонная кривая)
- **Аналитические способы** (решение прямой и обратной задачи)
- **Решение задачи в изображениях** (решение прямой и обратной задачи)
- **Деривативный анализ**
- **Аналитическое моделирование** (AMWELLS)
- **Численное моделирование** (RADFLOW, MODFE)

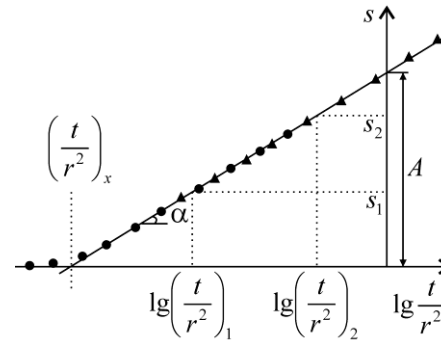
Основные графики индикаторных кривых

$s - \lg t$
 $s - \lg \frac{t}{r^2}$
 $s - \lg r$

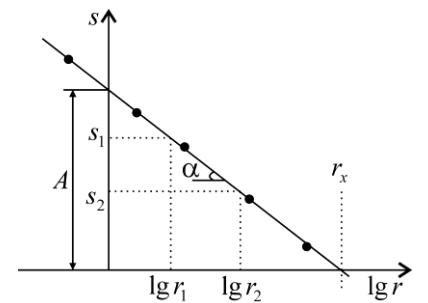
Способ прямой линии на графиках в полулогарифмическом масштабе



временное прослеживание



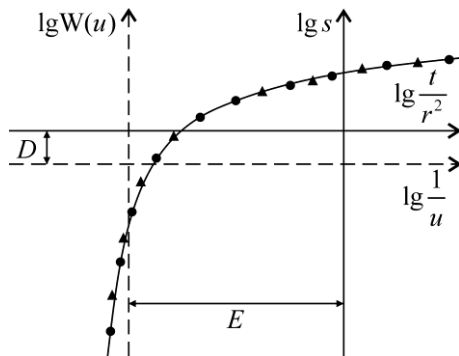
комбинированное прослеживание



площадное прослеживание

$s \rightarrow s^* = s(2m - s)$ для безнапорного пласта

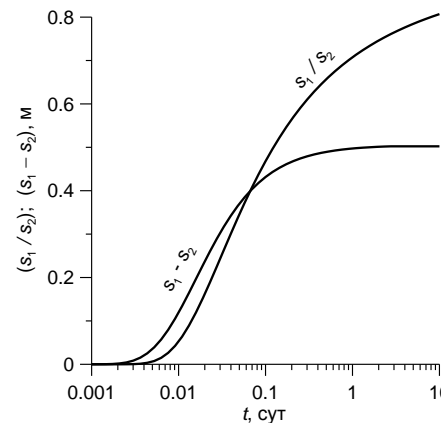
$\lg s - \lg t$
 $\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$
 $\lg s - \lg r$



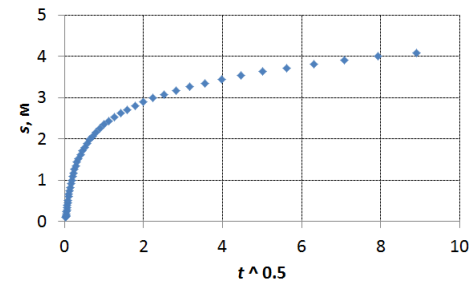
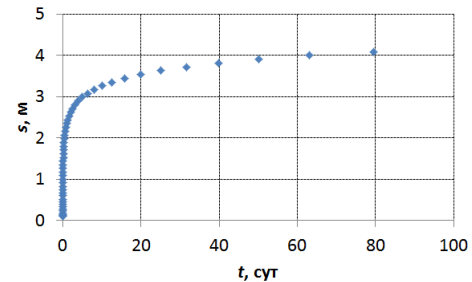
Способ эталонной кривой на графиках в билигарифмическом масштабе

Графики отношения понижений и разности понижений – дополнительные способы определения параметров

$\frac{s_1}{s_2} - \lg t$
 $(s_1 - s_2) - \lg t$



Экспертные оценки на графиках $s - t^n$



Графики в приведенных координатах, нестандартные графики

Обработка данных

восстановления уровня, групповой откачки, переменного расхода

$$s - \lg t'; \quad s - \lg r'; \quad s - \lg \frac{t'}{r'^2}; \quad s - \lg \frac{t}{r'^2}; \quad s - \lg \frac{t'}{r^2}$$

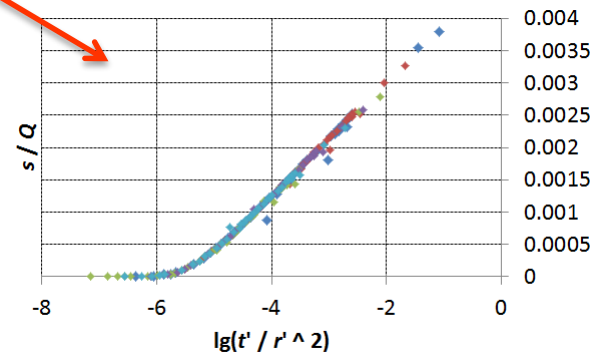
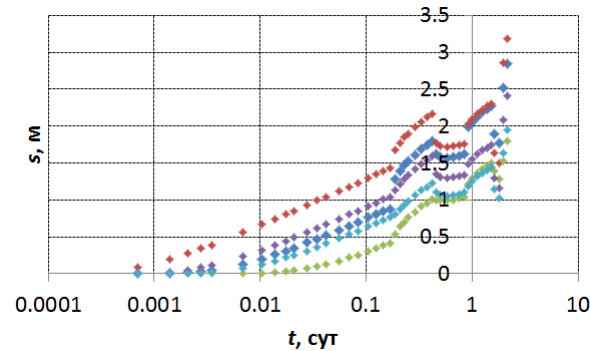
$$\frac{s}{Q} - \lg \frac{t'}{r'^2}; \quad \frac{s}{Q} - \lg \frac{t}{r'^2}; \quad \frac{s}{Q} - \lg \frac{t'}{r^2}$$

Графоаналитические
способы на графиках в
приведенных координатах

Обработка данных

откачки с постоянным понижением

$$\frac{s_w}{Q} - \lg t; \quad Q - \lg t$$



Обработка данных
экспресс-опробования

$$\frac{s}{s^0} - \lg t; \quad \lg \frac{s^0}{s} - t$$

Обработка данных откачки
из точечного источника

$$s - \frac{1}{\sqrt{t}}; \quad ds - \frac{d}{\sqrt{t}}; \quad s - \frac{1}{d}$$

Графоаналитические способы определения фильтрационных параметров

- Способ прямой линии
- Способ горизонтальной прямой линии
- Способ эталонной кривой
- Способ биссектрисы

Способ прямой линии

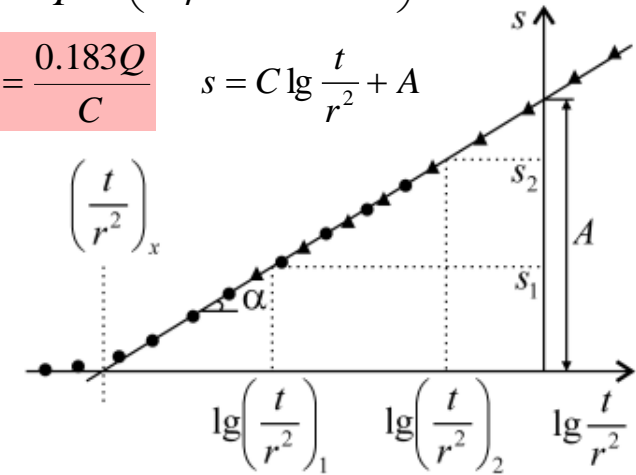
Модификации способа прямой линии на примере схемы Тейса

$$\left\{ \begin{array}{l} s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{r^2}{4at} < 0.05 \\ W(u) \approx -\ln u - 0.577 = \ln \frac{0.562}{u} = \ln \frac{2.25at}{r^2} \end{array} \right.$$

$$\longrightarrow s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2}$$

$$s = \frac{0.183Q}{T} \left(\lg \frac{t}{r^2} + \lg(2.25a) \right)$$

$$T = \frac{0.183Q}{C} \quad s = C \lg \frac{t}{r^2} + A$$



комбинированного прослеживания

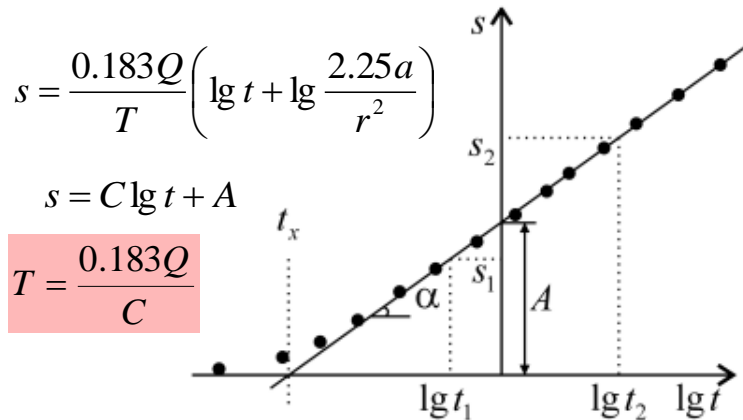
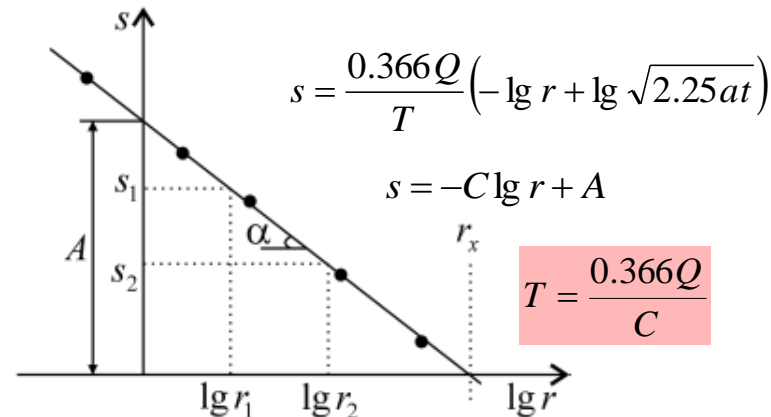


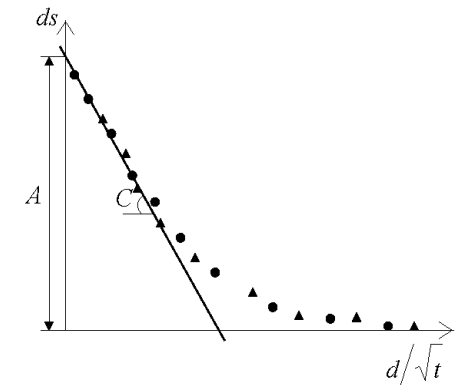
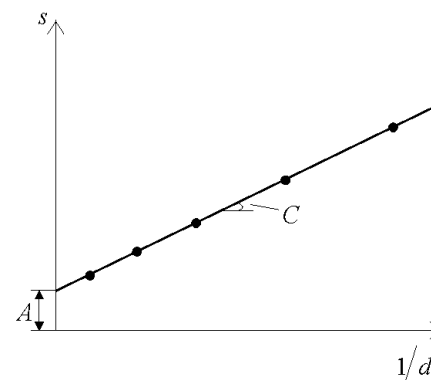
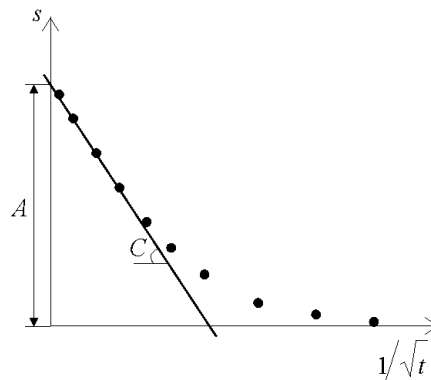
График временного прослеживания



площадного прослеживания

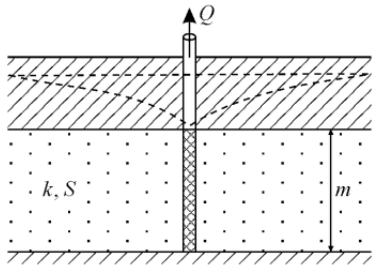
Пример способа прямой линии для откачки из точечного источника

$$s = \frac{Q}{4\pi k d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} \approx \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right)$$



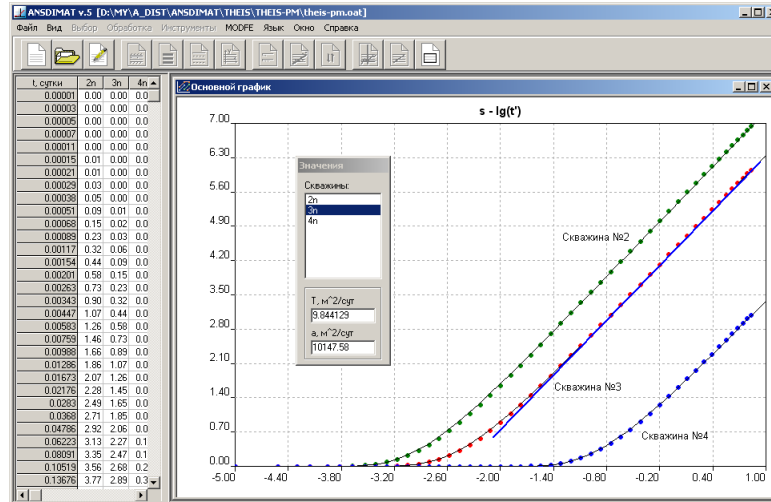
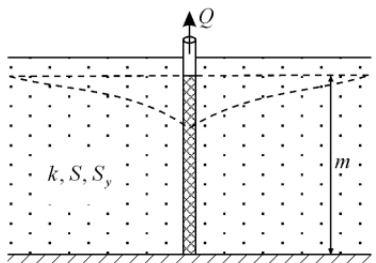
Способ прямой линии: примеры

Напорный пласт

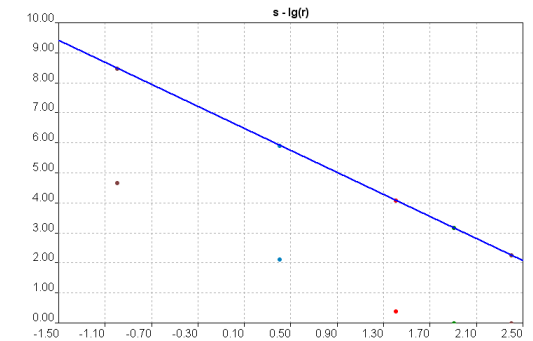
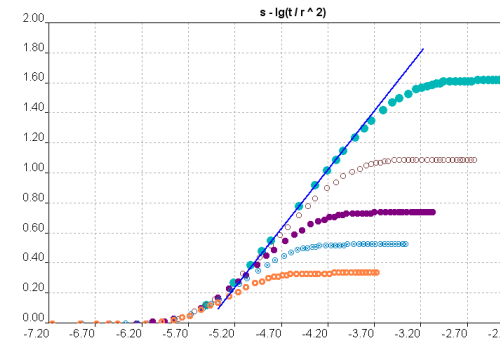


Обработка квазистационарного режима снижения уровня

Безнапорный пласт

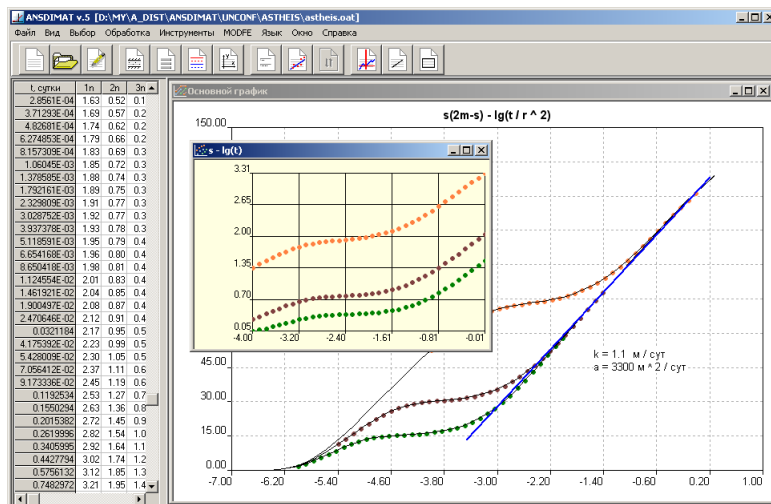
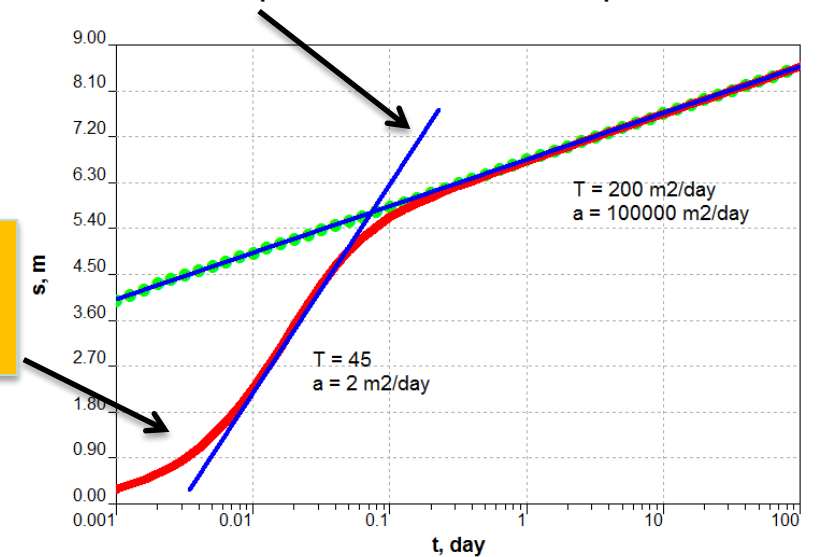


Комбинированное и площадное прослеживание



Возможные ошибки при использовании прямой линии

Влияние емкости скважины и скин-эффекта



Способ прямой линии: обработка данных восстановления уровня

Восстановление отсчитывается от окончания откачки

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]$$

Время от начала восстановления

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2}$$

$$t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r}$$

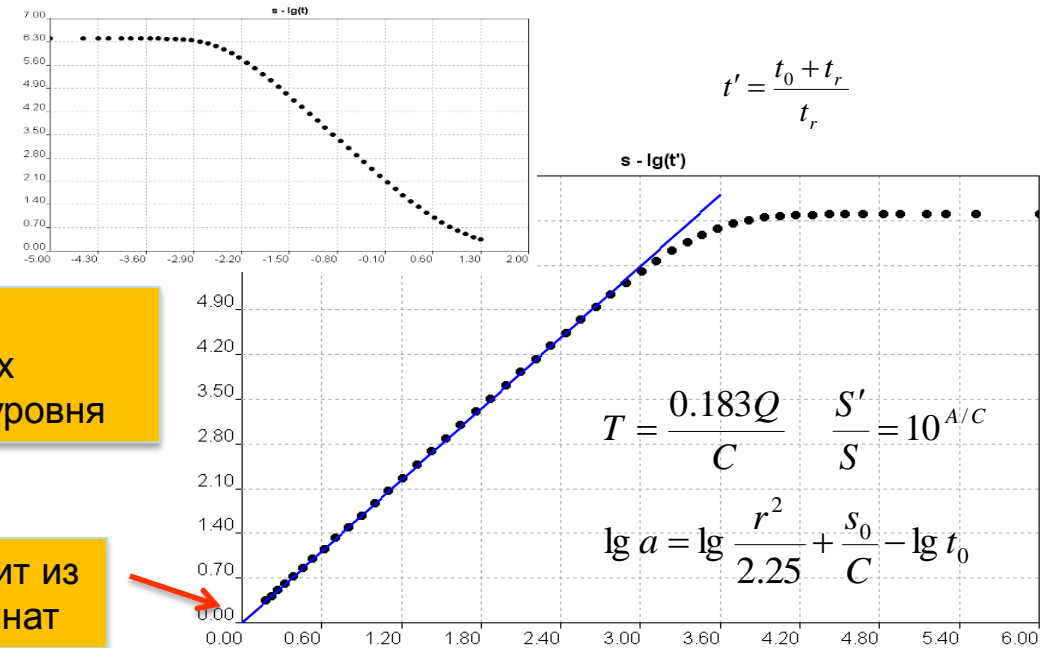
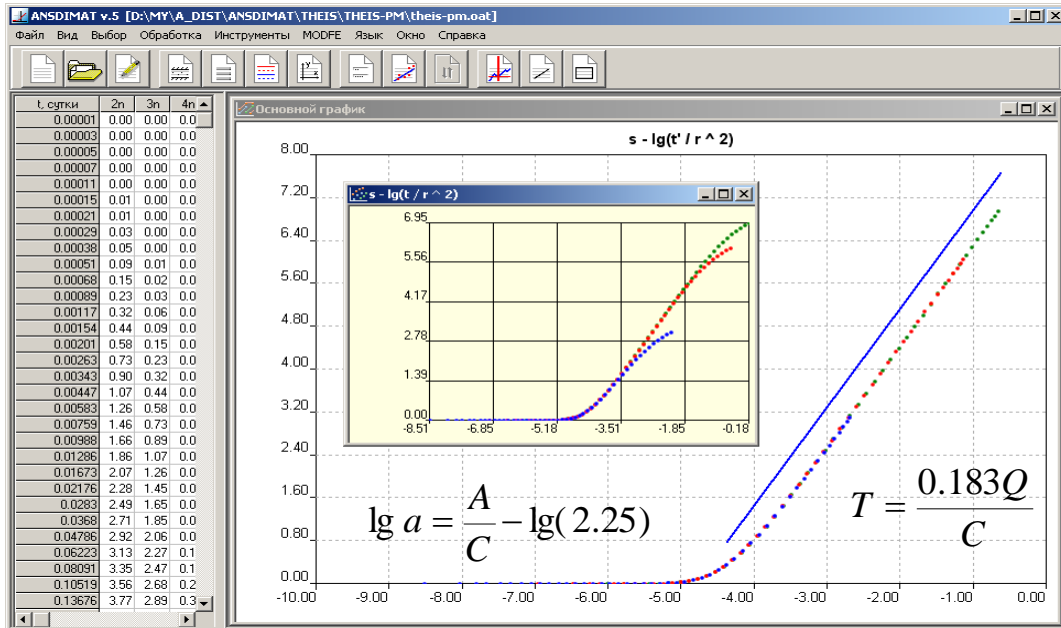
Длительность откачки

Восстановление отсчитывается от начала откачки

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0+t_r}{t_r}$$

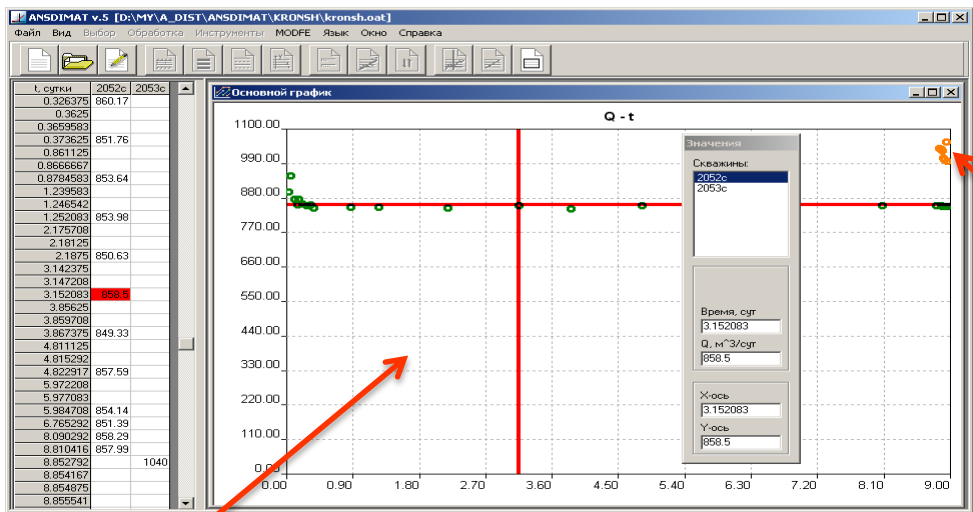
$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0+t_r}{t_r} - \ln \frac{S}{S'}$$



Два подхода для обработки данных восстановления уровня

График выходит из начала координат

Способ прямой линии: групповая откачка (асинхронное начало работы скважин)



$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N_t} \left[Q_i W \left(\frac{r_i^2}{4a(t-t_i)} \right) \right]$$

Откачка из двух опытных скважин: расход постоянный, время начало работы разное

Включение второй скважины

Начало работы i-й скважины

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2}$$

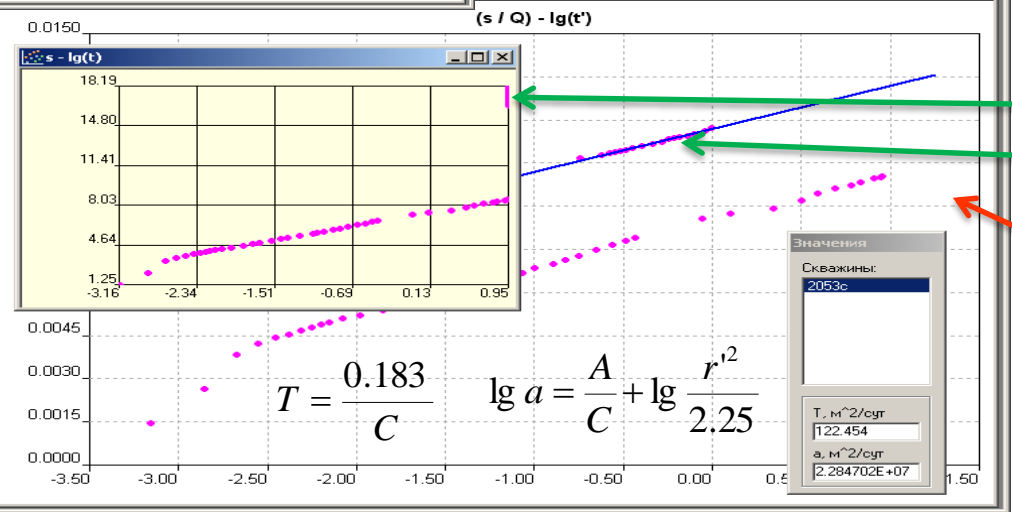
$$\ln t' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N_t} Q_i \ln(t-t_i)$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N_t} (Q_i \ln r_i)$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_t} Q_i$$

График: $Q - t$

0.3625	6.73
0.3659583	6.73
0.373625	7.31
0.861125	7.31
0.8666667	7.31
0.8784583	7.46
1.239583	7.46
1.246542	7.61
1.252083	7.61
2.175708	7.61
2.18125	7.84
2.1875	7.84
3.142375	7.84
3.147208	8.04
3.152083	8.04
3.85625	8.04
3.859708	8.20
3.867375	8.20
4.811125	8.20
4.815292	8.29
4.822917	8.29
5.972208	8.29
5.977083	8.37
5.984708	8.48
6.765292	8.48
8.090292	8.53
8.810416	8.53
8.852792	8.54
8.854167	8.54
8.854875	16.59
8.855541	16.59



Линеаризация функций позволяет обработать всю индикаторную кривую

График: $\frac{s}{Q_t} - \lg t'$

$$T = \frac{0.183}{C}$$

$$\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r_i^2}{2.25}$$

Скважины:	2053с
Т, м²/сут	122.454
а, м²/сут	2.284702E+07

Способ прямой линии: групповая откачка с переменным расходом

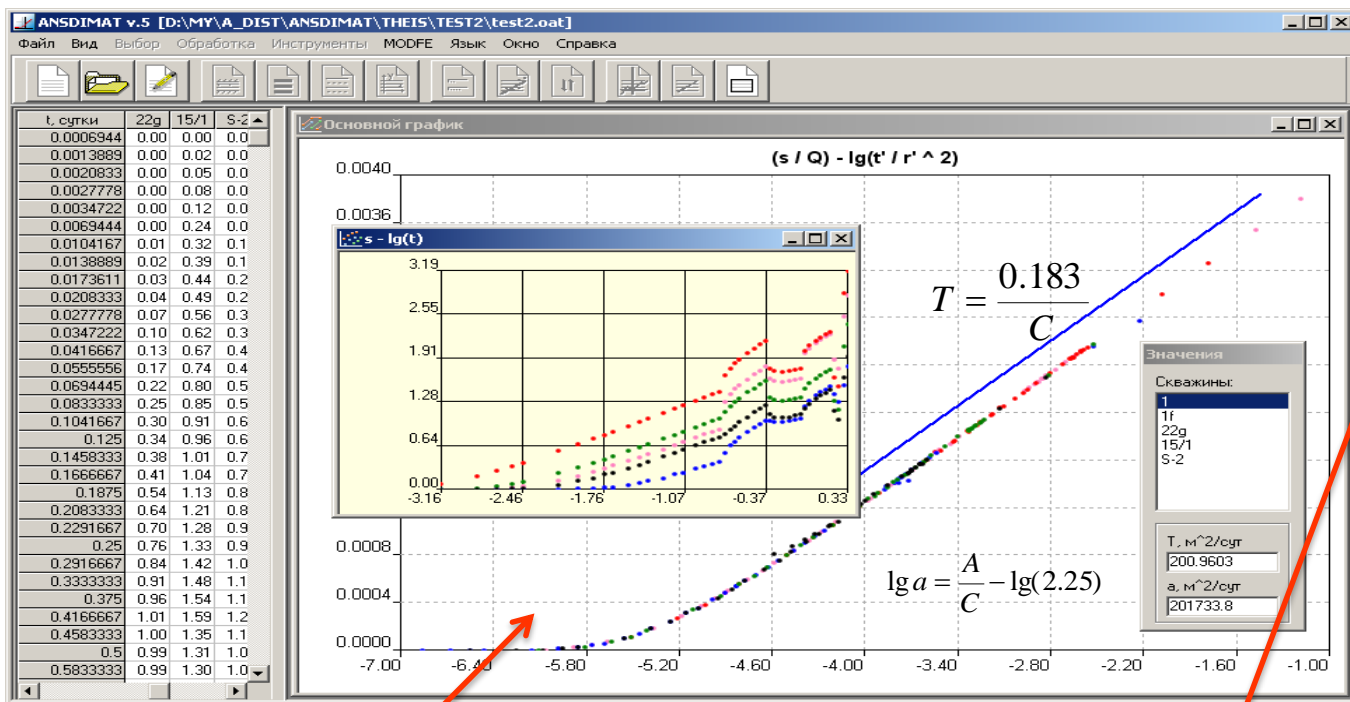
$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} \left[(Q_i^j - Q_i^{j-1}) W \left(\frac{r_i^2}{4a(t-t_i^j)} \right) \right]$$

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2}$$

$$\ln t' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} [(Q_i^j - Q_i^{j-1}) \ln(t - t_i^j)]$$

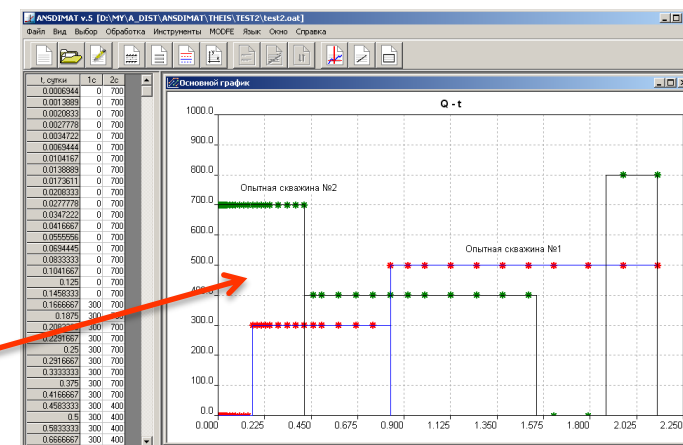
$$\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^N \left[\ln r_i \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1}) \right]$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1})$$



Откачка из двух опытных скважин с переменным расходом

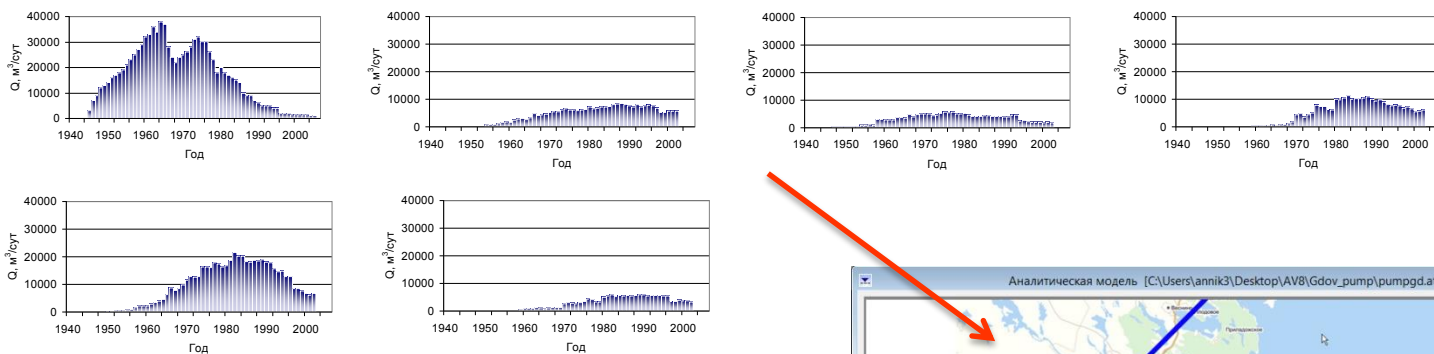
График:
 $Q - t$



Линеаризация функции позволяет обработать индикаторную кривую с помощью прямой линии

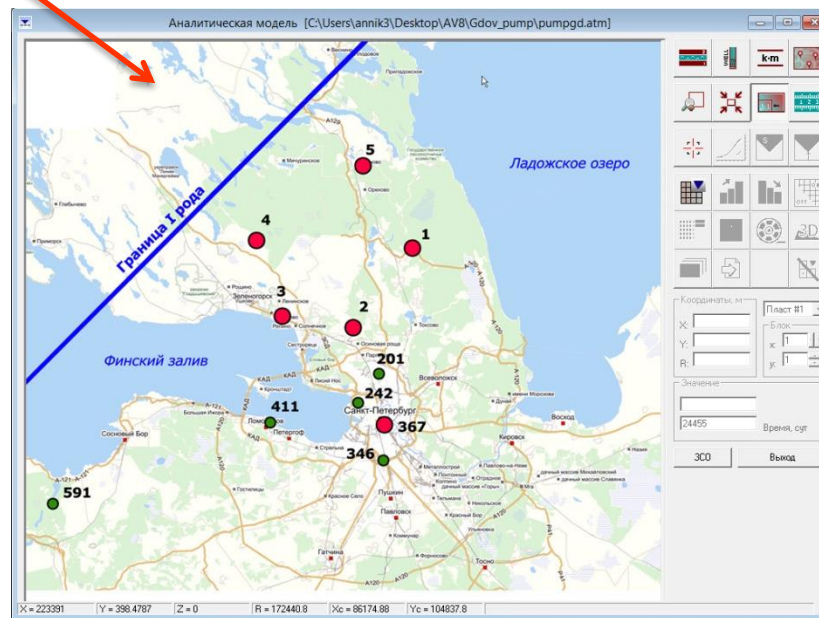
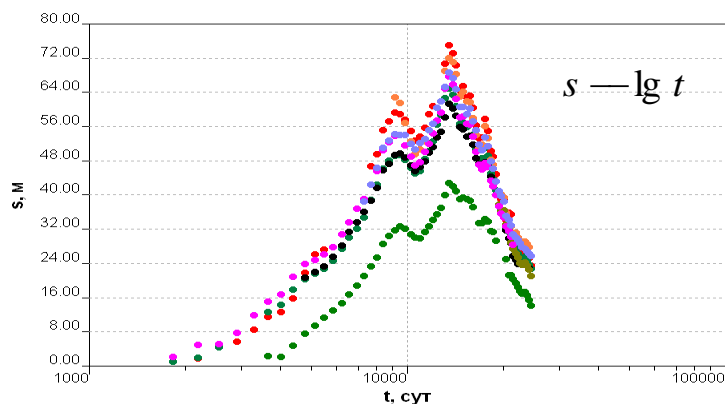
Способ прямой линии: длительный водоотбор, Ленинград – Санкт-Петербург

Разбивка дебита эксплуатационных скважин на ступени

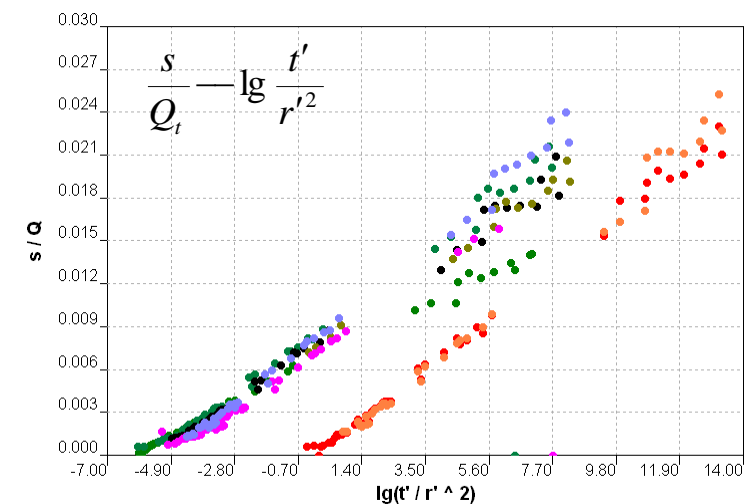


Проанализированы и обработаны данные водозабора за период 1946–2006 гг.

График временного прослеживания



Линеаризация функции понижения

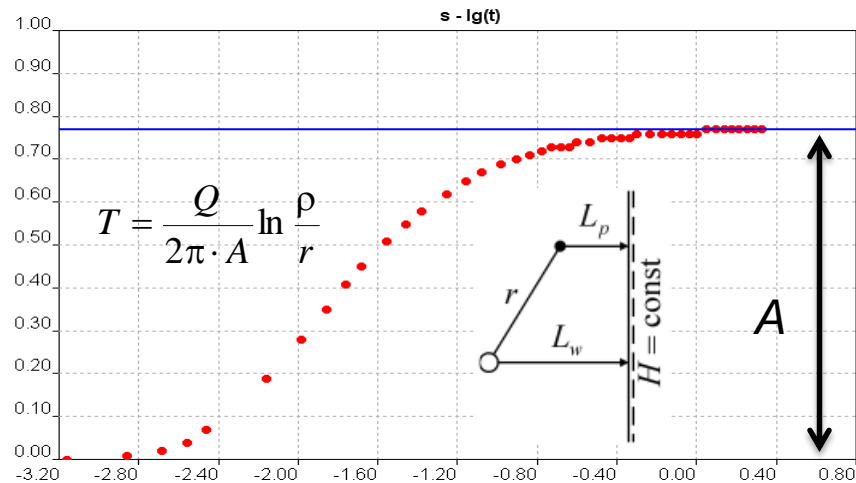


Способ горизонтальной прямой (стационар)

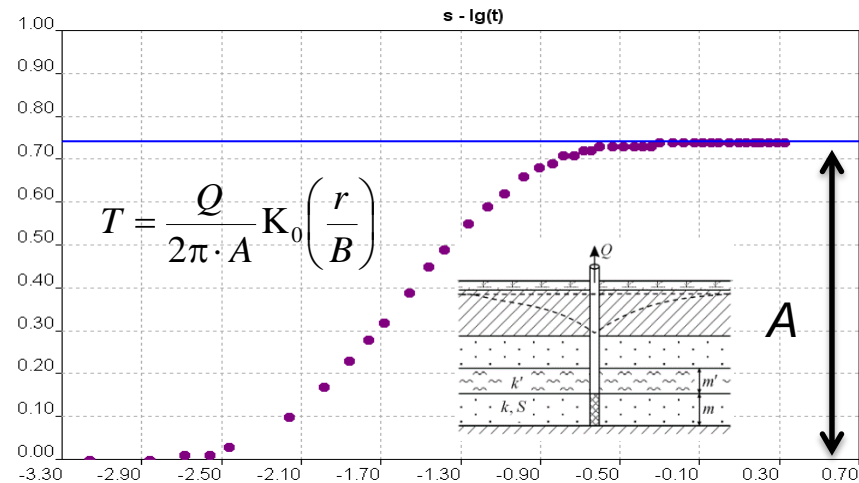
Удобный и быстрый способ оценки проводимости водоносного пласта по понижению на период стационара

Правильность определения параметров зависит от схематизации

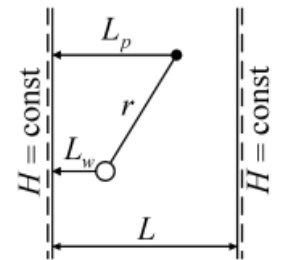
Полуограниченный пласт



Водоносный пласт с перетеканием



Пласт-полоса:
границы I рода



$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln r'$$

$$r' = \frac{\rho_1^n}{r} \prod_{j=1,3,\dots}^{n-1} \left(\frac{\rho_1^j \rho_2^j}{\rho_1^{j+1} \rho_2^{j+1}} \right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho^2}{4at} \right) \right]$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r}$$

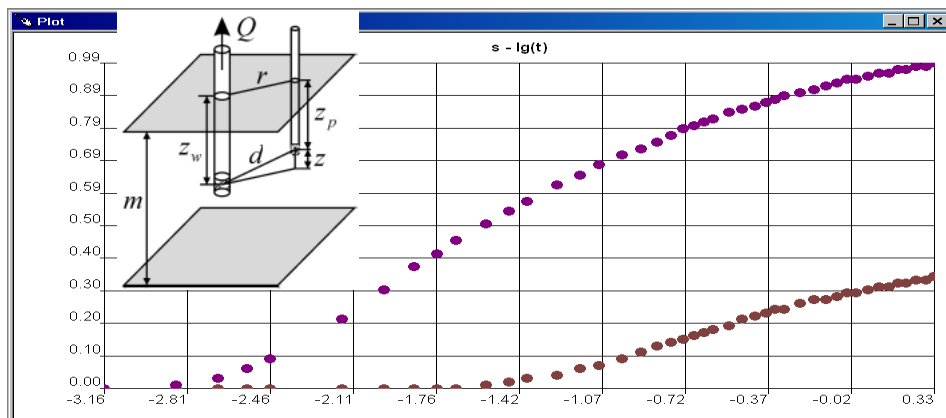
Понижение зависит только от проводимости

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B} \right)$$

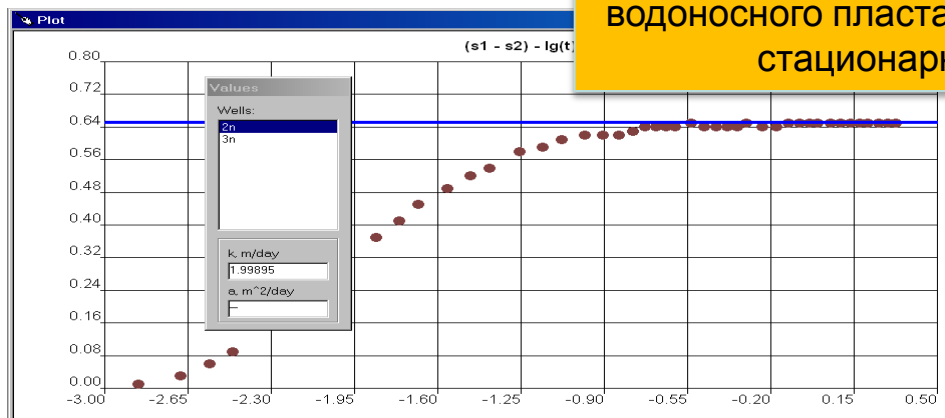
$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$$

Способ горизонтальной прямой линии (разность понижений)

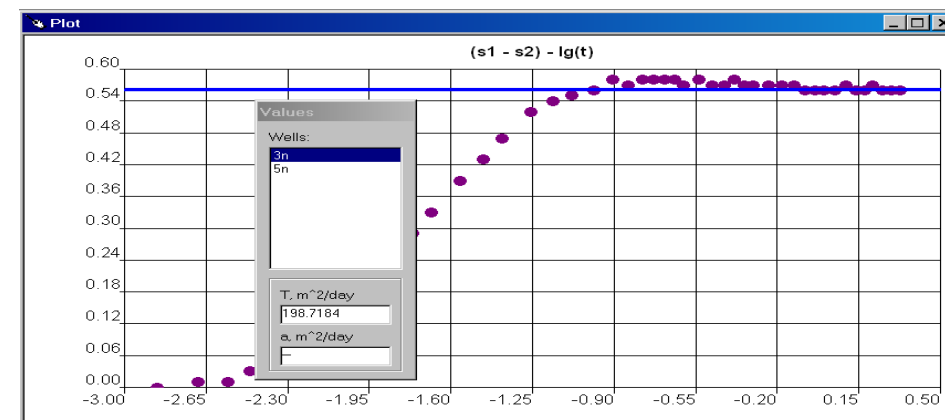
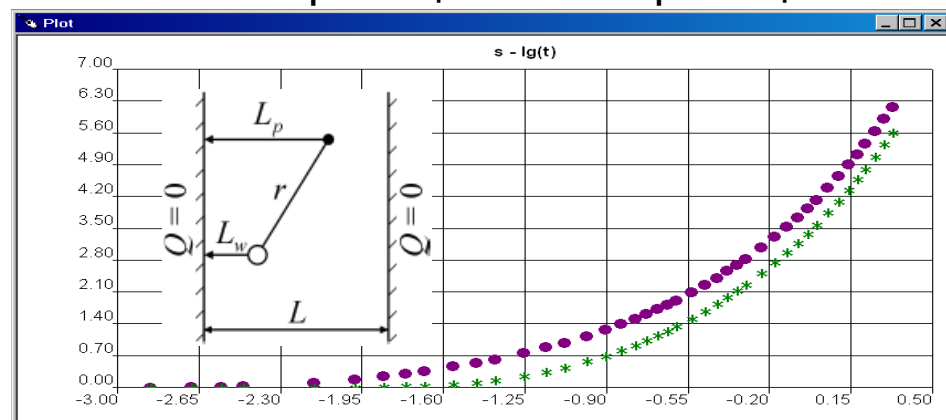
Несовершенные скважины в водоносном пласте большой мощности



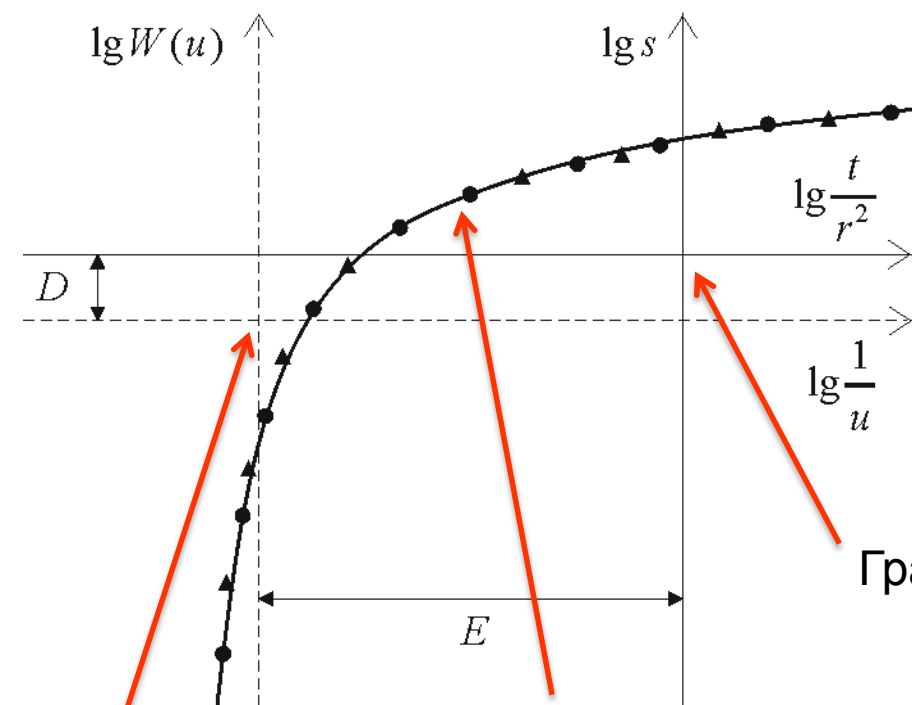
Определение проводимости водоносного пласта при отсутствии стационарной фильтрации



Пласт-полоса с непроницаемыми границами



Способ эталонной кривой



Графоаналитическая
обработка всей
индикаторной кривой

Возможные графики:

- временного
- комбинированного
- и площадного прослеживания

График фактических замеров

Совмещение графиков

График эталонной кривой

$$\begin{cases} s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \\ u = \frac{r^2}{4at} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s = \lg \frac{Q}{4\pi T} + \lg W(u) \\ \lg \frac{1}{u} = \lg \frac{t}{r^2} + \lg(4a) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} = D \\ \lg \frac{1}{u} - \lg \frac{t}{r^2} = \lg(4a) = E \end{cases}$$

Построение эталонных кривых для сложных функций

Эталонная кривая для
полуограниченного пласта и пласта-полосы:

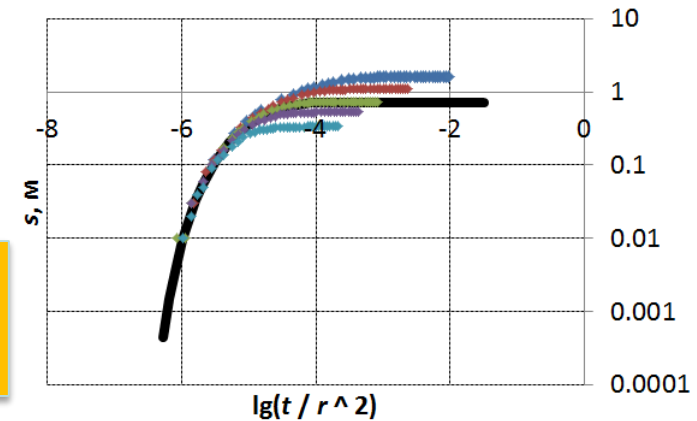
$$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u} \quad W'(u) = W(u) - W(ur'); \quad r' = (\rho / r)^2$$

$$W'(u) = W(u) + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 (-1)^{(j+2i-1)/2} W(ur_i'^j) + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 W(ur_i'^j); \quad r_i'^j = (\rho_i^j / r)^2$$

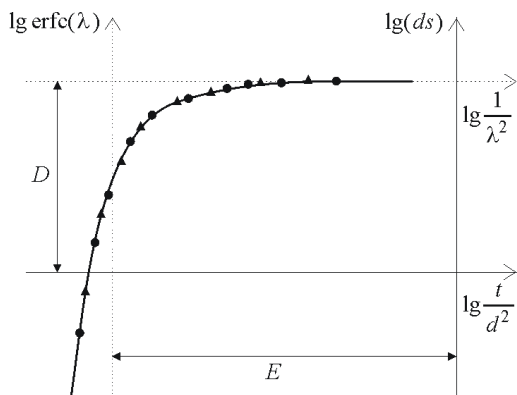
Эталонная кривая для пласта с перетеканием:

$$\lg W\left(u, \frac{r}{B}\right) - \lg \frac{1}{u}$$

Эталонная кривая
зависит от параметра
перетекания



Точечный источник



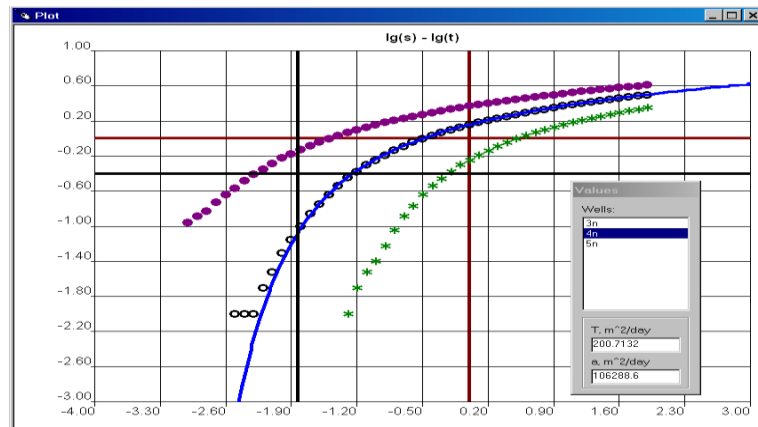
Эталонная кривая для точечного источника в полуограниченном и ограниченном пласте:

$$\lg \text{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2} \quad \text{erfc}'(\lambda) = \text{erfc} \lambda - \frac{1}{r'} \text{erfc}(\lambda r') \quad r' = \rho / d$$

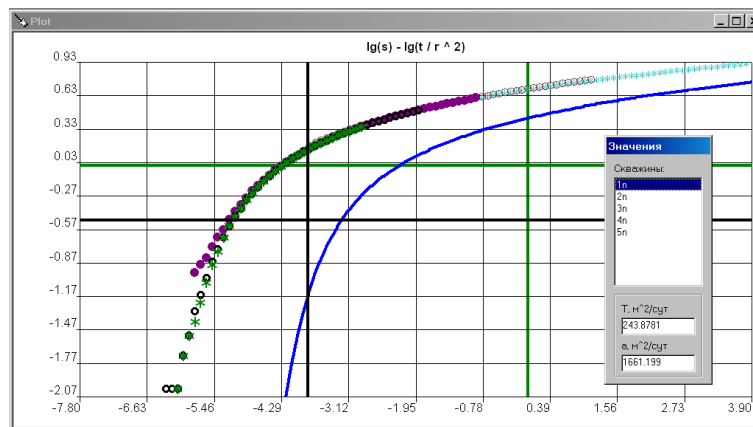
$$\text{erfc}'(\lambda) = \text{erfc} \lambda + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_i'^j} \text{erfc}(\lambda r_i'^j) + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{r_i'^j} \text{erfc}(\lambda r_i'^j) \quad r_i'^j = \frac{\rho_i^j}{d}$$

Способ эталонной кривой (примеры)

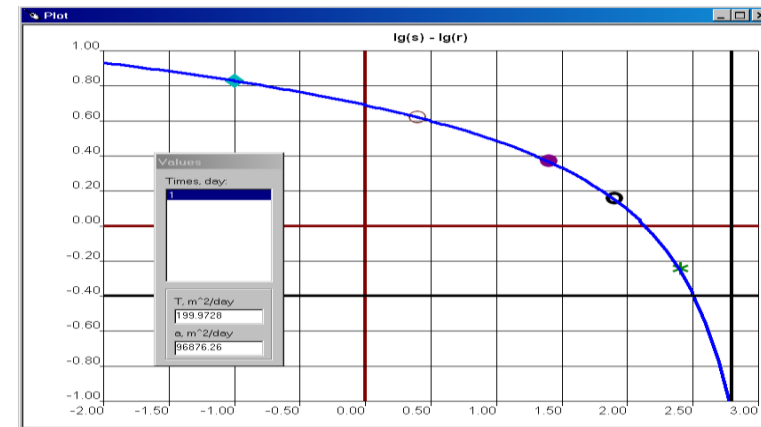
Временное прослеживание



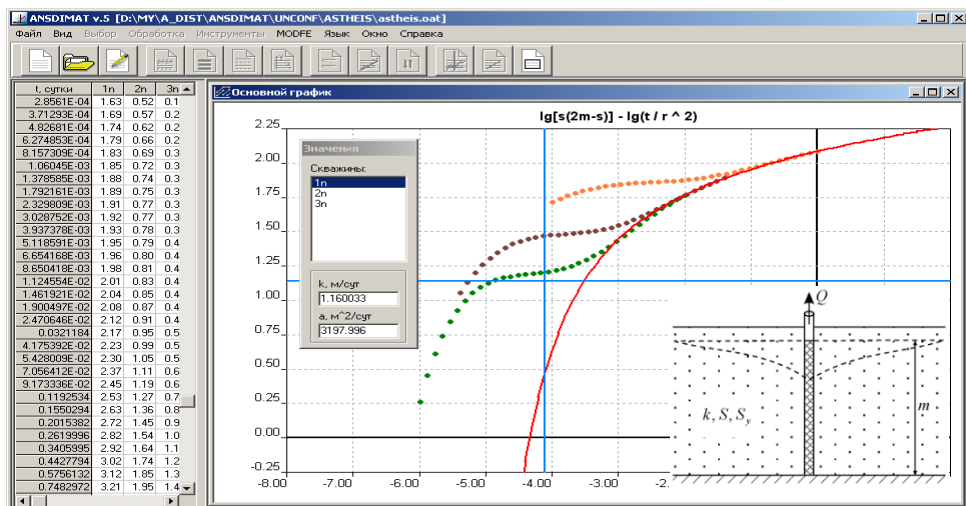
Комбинированное прослеживание



Площадное прослеживание

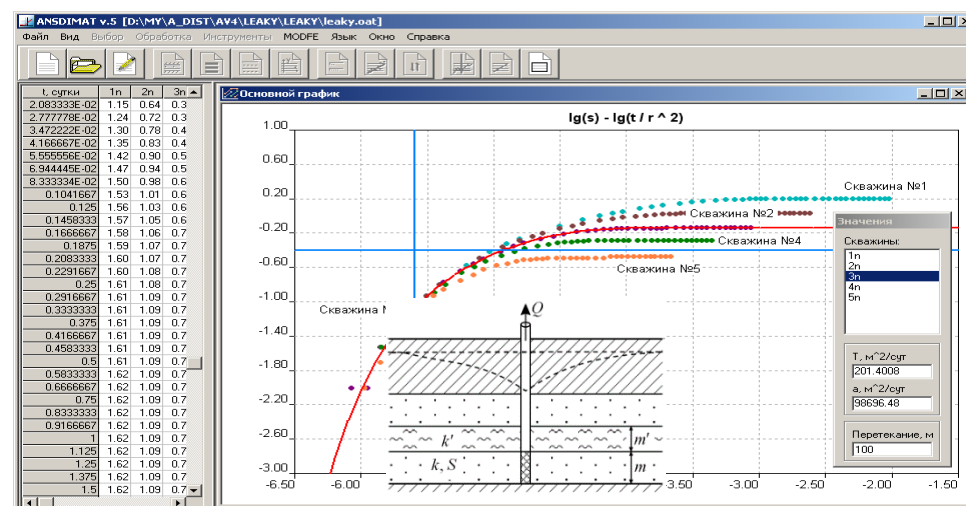


Безнапорный пласт



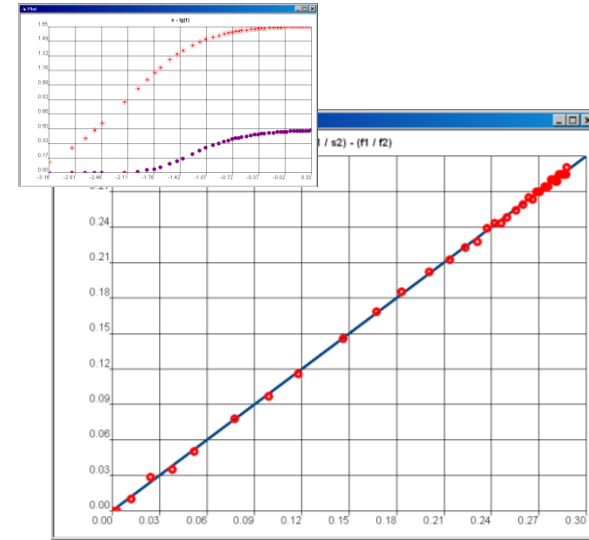
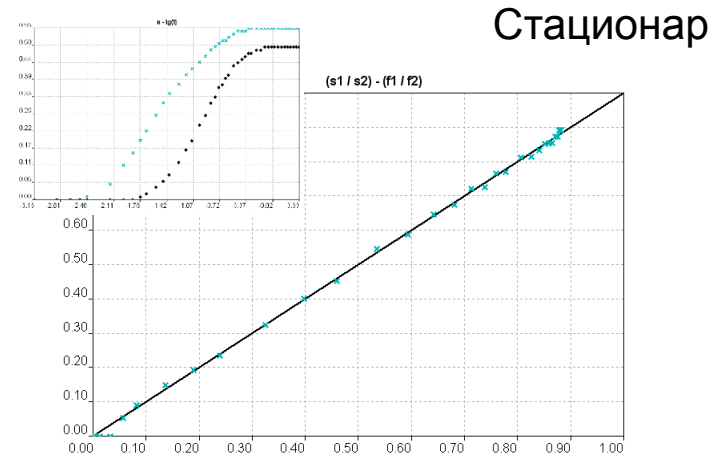
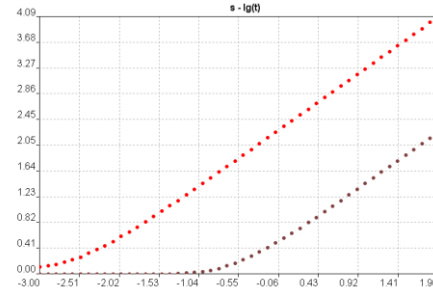
Для сложных функций эталонная кривая применяется к отдельным участкам индикаторной кривой

Пласт с перетеканием

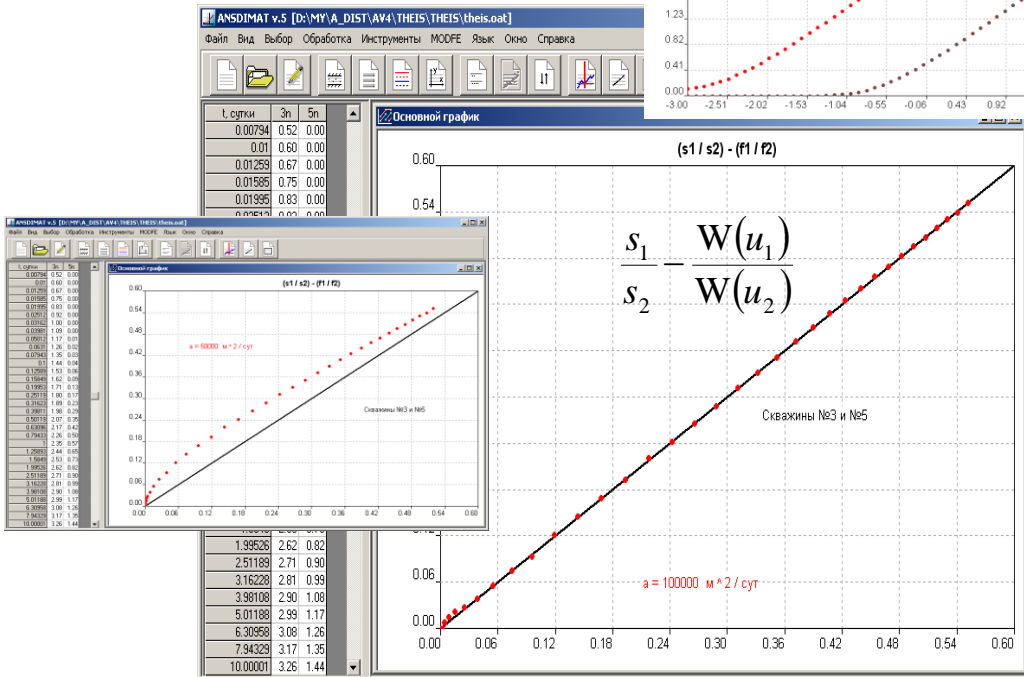


Способ биссектрисы

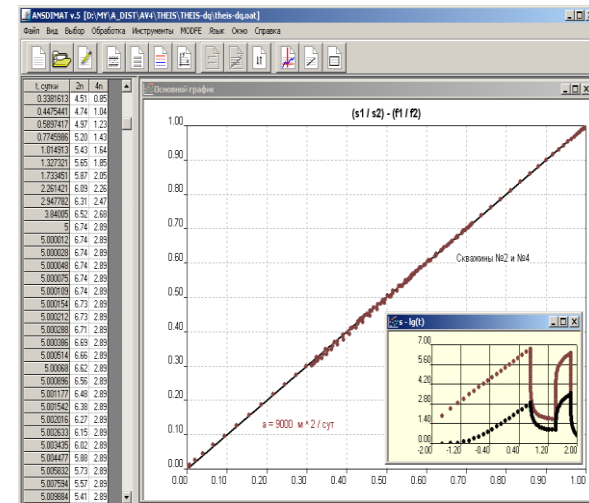
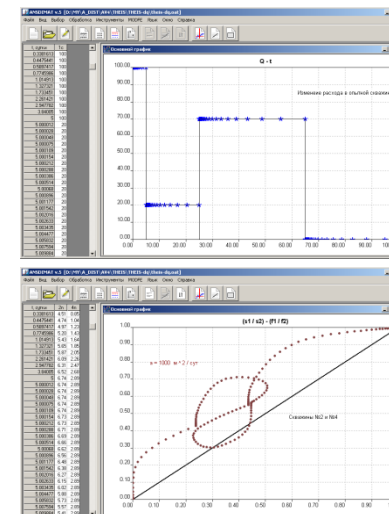
$$\begin{cases} s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) \\ s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \end{cases} \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)} \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W(u_1)}{W(u_2)}$$



Переменный расход



Быстрый способ определения пьезопроводности водоносного пласта по понижениям в двух скважинах



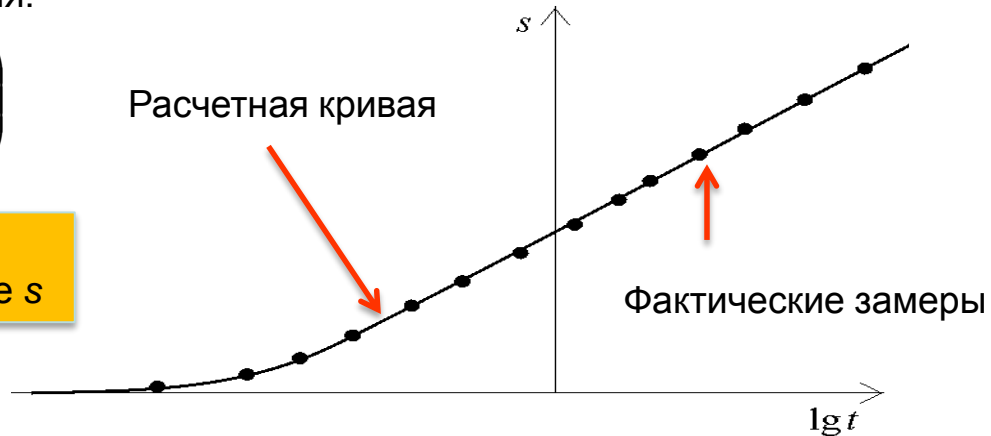
Подбор параметров: решение прямой задачи

Функция понижения:

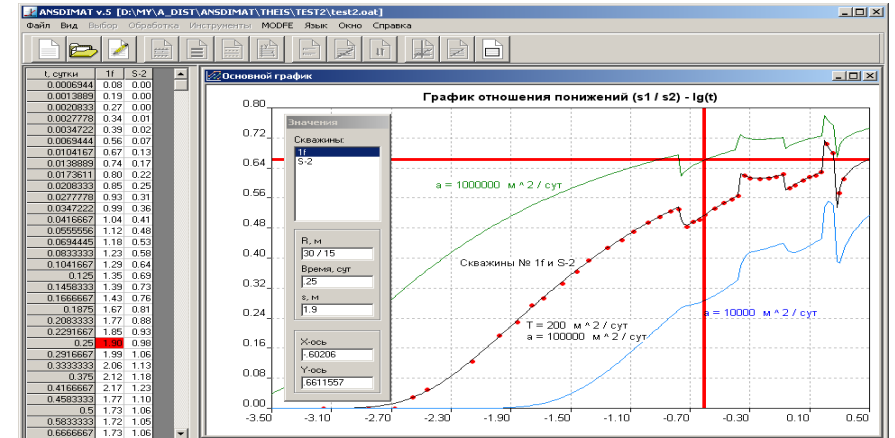
$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right)$$

Расчетная кривая

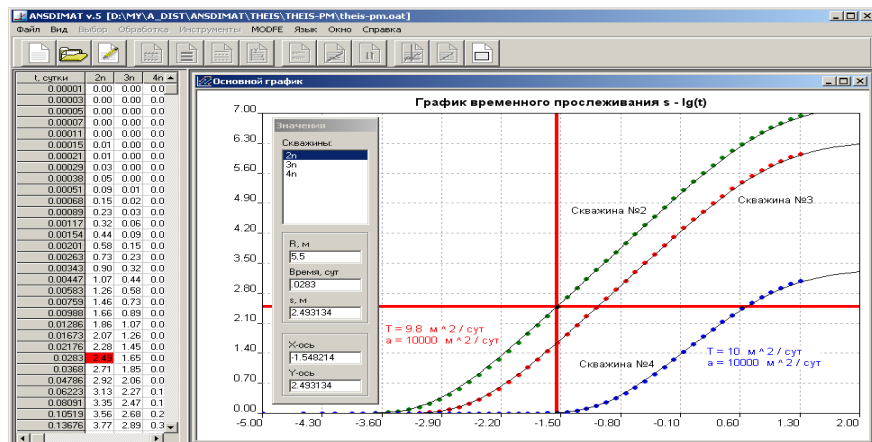
Задаем: T, a
Получаем: расчетные s



Переменный расход, оценка чувствительности

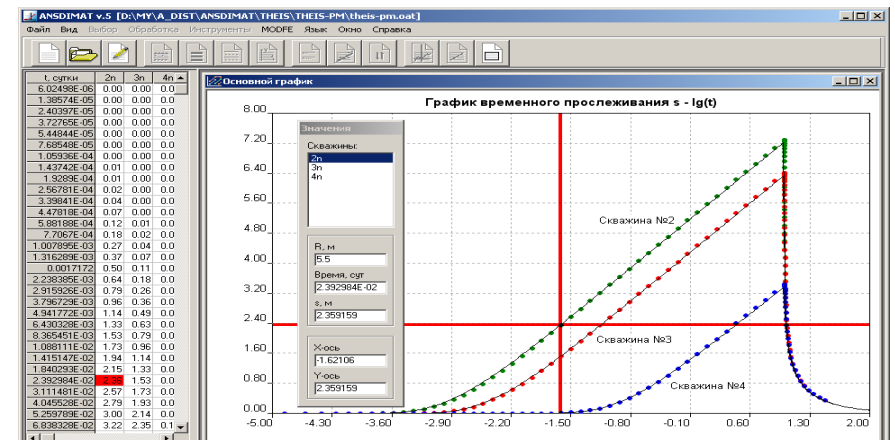


Восстановление уровня



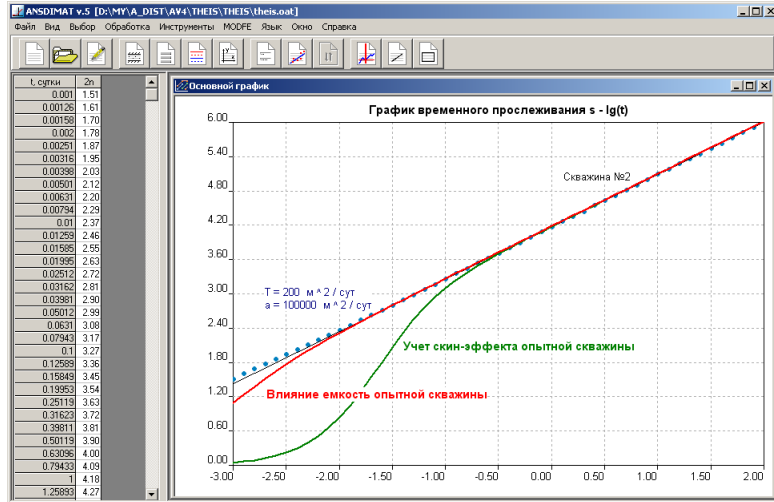
Определение
фильтрационных
параметров путем
визуального сравнения
расчетных и
фактических кривых

Откачка и восстановление



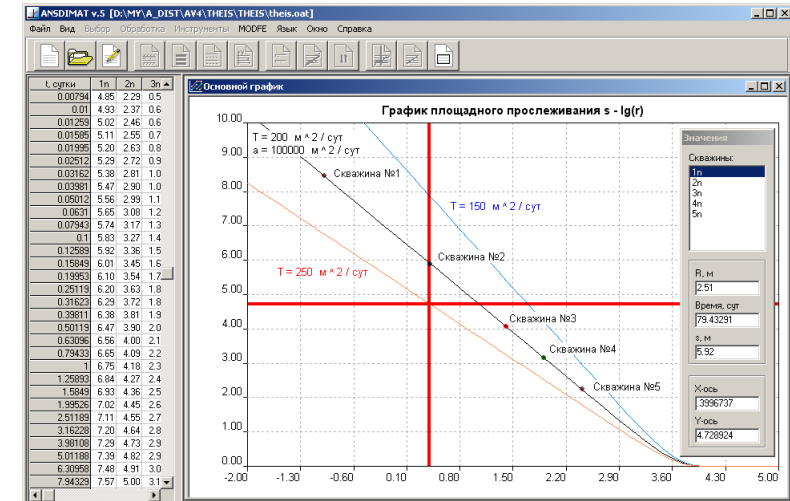
Подбор параметров: возможности

Учет различных факторов

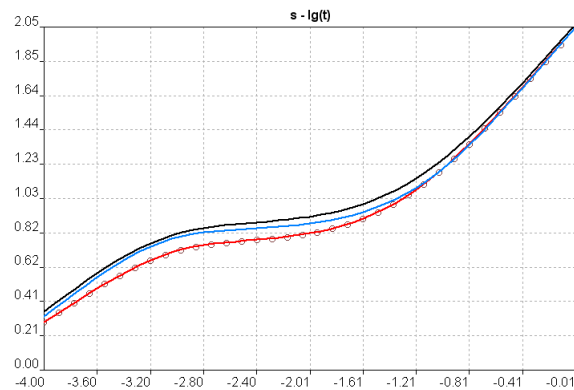


Относительно простой способ решения сложных гидрогеологических задач

Прогноз влияния откачки, оценка чувствительности

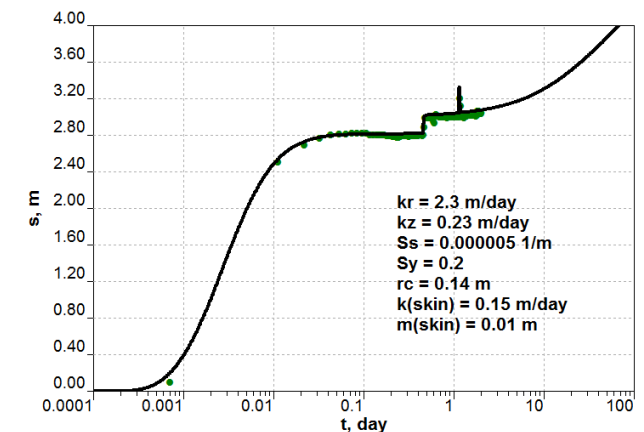
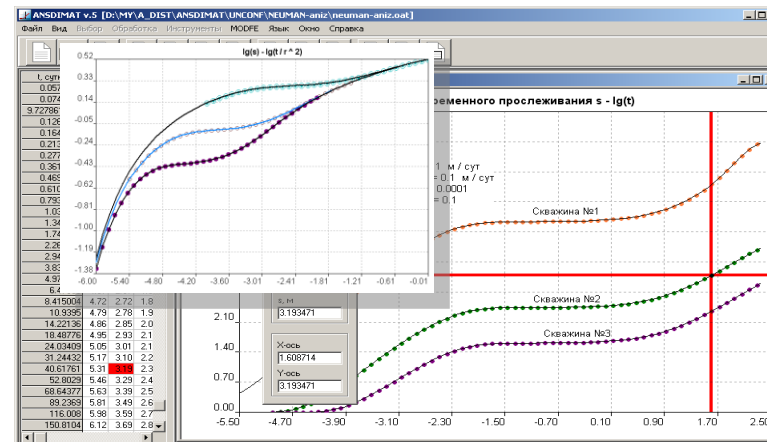


Исследовательская работа: сравнение решений



Безнапорный пласт: описание трех режимов

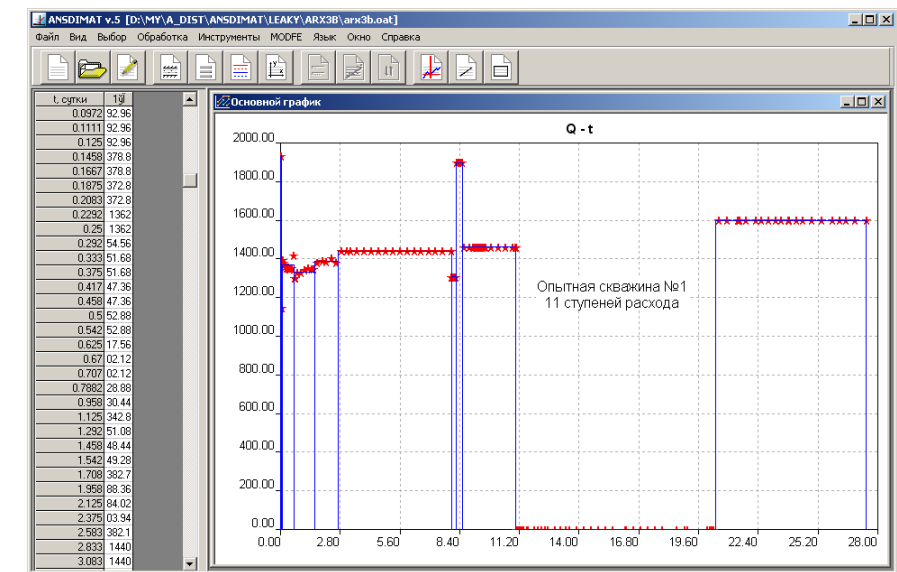
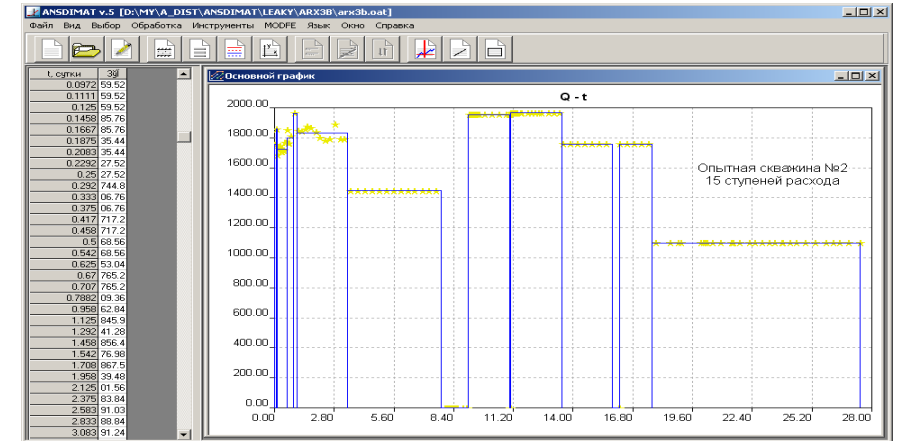
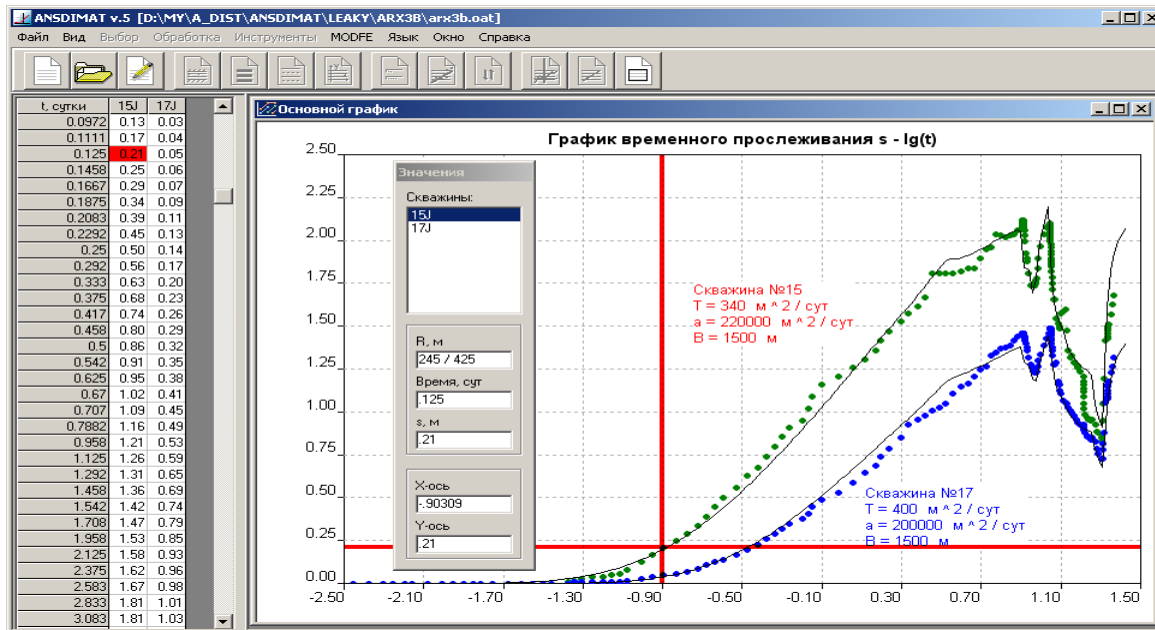
Емкость, скин, анизотропия, длина фильтра, переменный дебит



Подбор параметров: групповая откачка с переменным расходом

Длительность откачки – около 1 месяца
 Опытные скважины – 2
 Наблюдательные скважины – 30
 Дебит – переменный, остановки в работе насоса
 Схема – пласт с перетеканием

Учет ошибок
 проведения ОФО

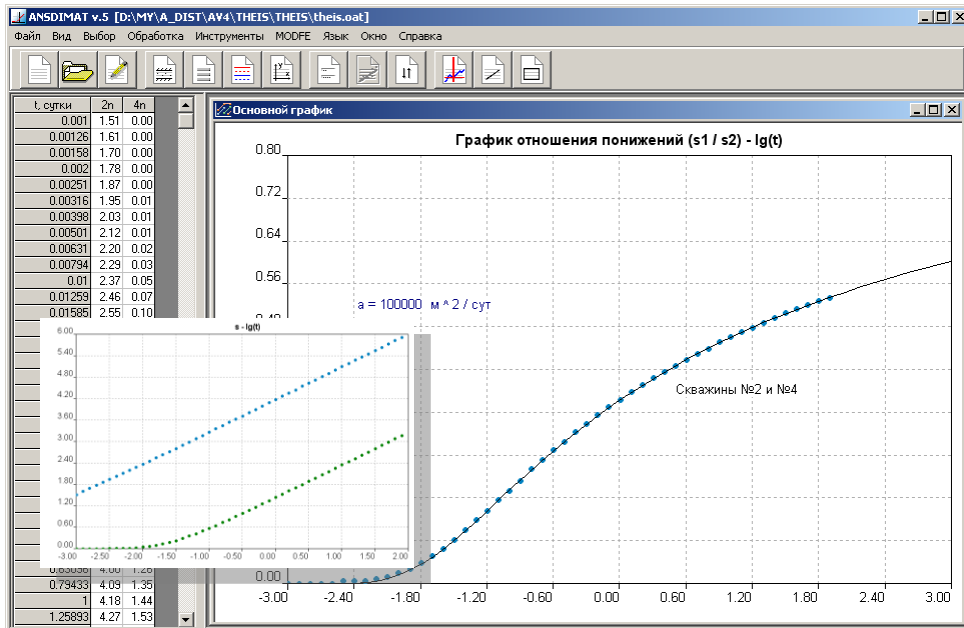


Способ отношения понижений и разности понижений

$$\begin{cases} s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) \\ s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \end{cases} \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)}$$

Определение пьезопроводности независимо от проводимости пласта

График отношения понижения: $\frac{s_1}{s_2} - \lg t$

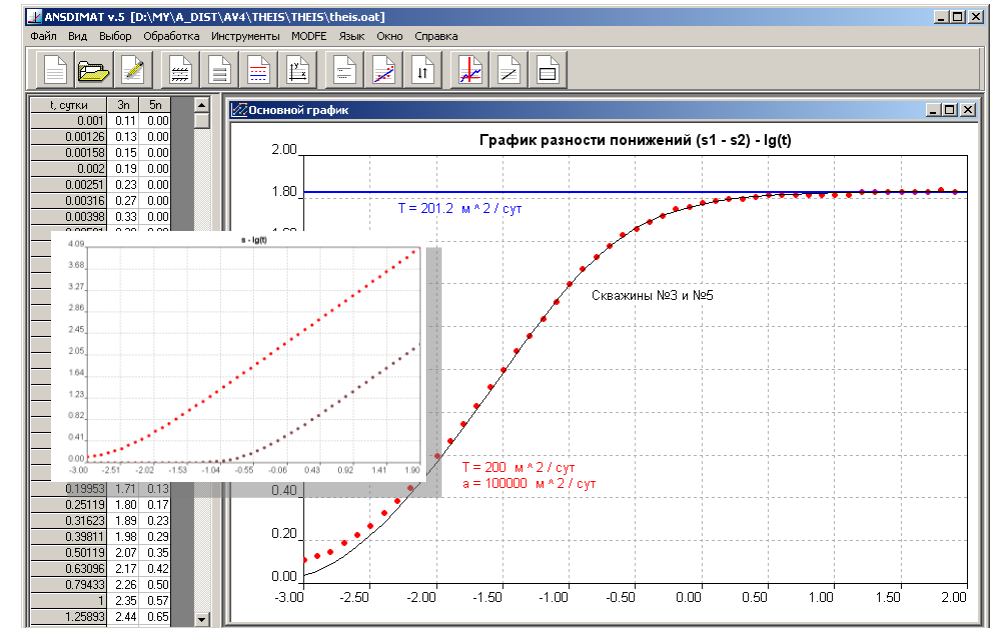


Кривая зависит только от пьезопроводности

$$\begin{cases} s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) \\ s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \end{cases} \Rightarrow s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \right] \approx \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Определение проводимости независимо от пьезопроводности пласта

График разности понижения: $(s_1 - s_2) - \lg t$



Прямолинейный участок зависит только от проводимости

Решение обратной задачи

Метод наименьших квадратов

$$s_i = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at_i}\right); \quad c = \frac{Q}{4\pi T}$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \left[s_i - cW\left(\frac{r^2}{4at_i}\right) \right]^2$$

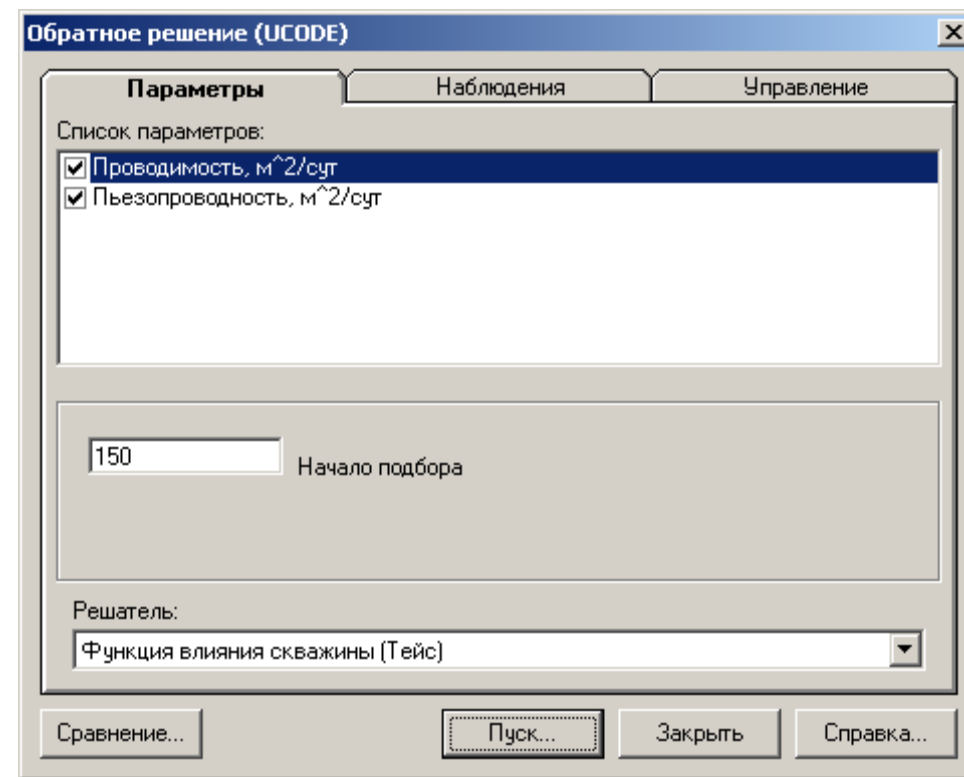
$$\left\{ \frac{\partial f}{\partial a} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[s_i - cW\left(\frac{r^2}{4at_i}\right) \right]^2 \right\}' = 0 \right.$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial c} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[s_i - cW\left(\frac{r^2}{4at_i}\right) \right]^2 \right\}' = 0 \right.$$

Задаем: фактические s
Получаем: T, a

Определение фильтрационных параметров по фактическим изменениям уровня

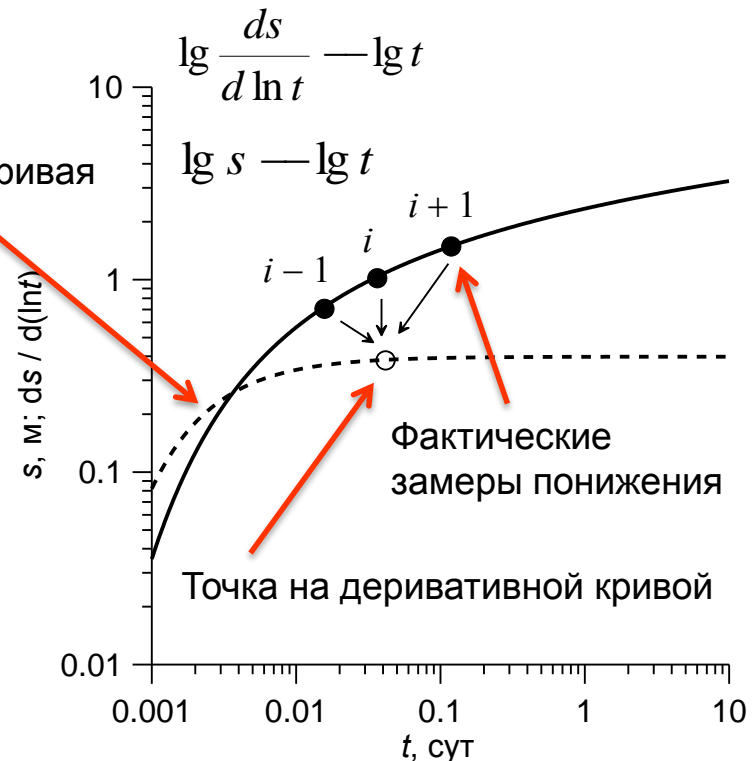
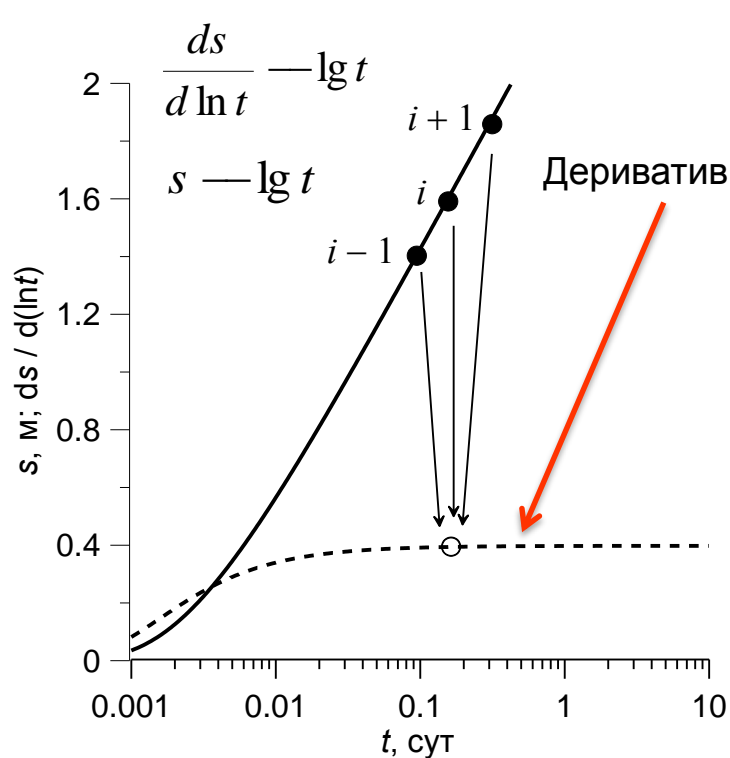
UCODE_2005



Деривативный анализ

Анализ данных скорости снижения уровня (метод Бурде)

$$\frac{ds}{d \ln t} = \frac{1}{\Delta \ln t_{i-1} + \Delta \ln t_{i+1}} \left(\frac{\Delta s_{i-1}}{\Delta \ln t_{i-1}} \Delta \ln t_{i+1} + \frac{\Delta s_{i+1}}{\Delta \ln t_{i+1}} \Delta \ln t_{i-1} \right)$$



Назначение деривативной кривой:

- анализ данных по индикаторным признакам
- графоаналитическая обработка
- подбор параметров

Недостатки:

- высокая чувствительность к погрешностям замеров и к гидрогеологическим условиям
- нахождение производной сложных функций

Построение деривативной кривой по трем ближайшим замерам понижения: $i-1, i, i+1$

$$\Delta s_{i-1} = s_i - s_{i-1} \quad \Delta \ln t_{i-1} = \ln t_i - \ln t_{i-1}$$

$$\Delta s_{i+1} = s_{i+1} - s_i \quad \Delta \ln t_{i+1} = \ln t_{i+1} - \ln t_i$$

Построение расчетной деривативной кривой:

$$\frac{ds}{d \ln t} = \frac{t}{dt} d \left[\frac{Q}{4\pi T} W(u) \right] = \frac{Q}{4\pi T} \exp \left(\frac{-r^2}{4at} \right)$$

Деривативный анализ: графоаналитическая обработка

Способ прямой линии

Функция Тейса: $s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right)$

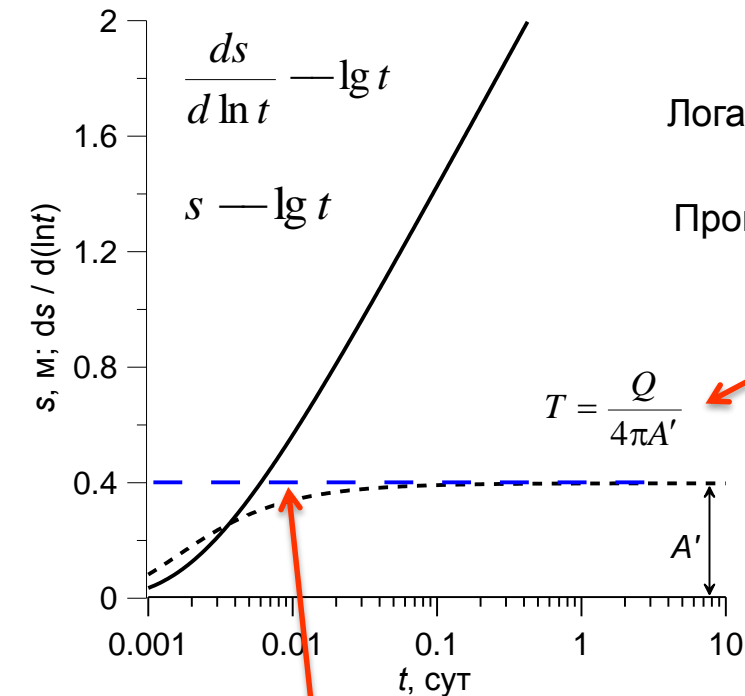
Производная функции: $\frac{ds}{d \ln t} = \frac{Q}{4\pi T} \exp\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$

Логарифмическая аппроксимация: $s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2}$

Производная: $\frac{ds}{d \ln t} = \frac{Q}{4\pi T}$

Определение фильтрационных параметров по функциям с меньшим количеством неизвестных

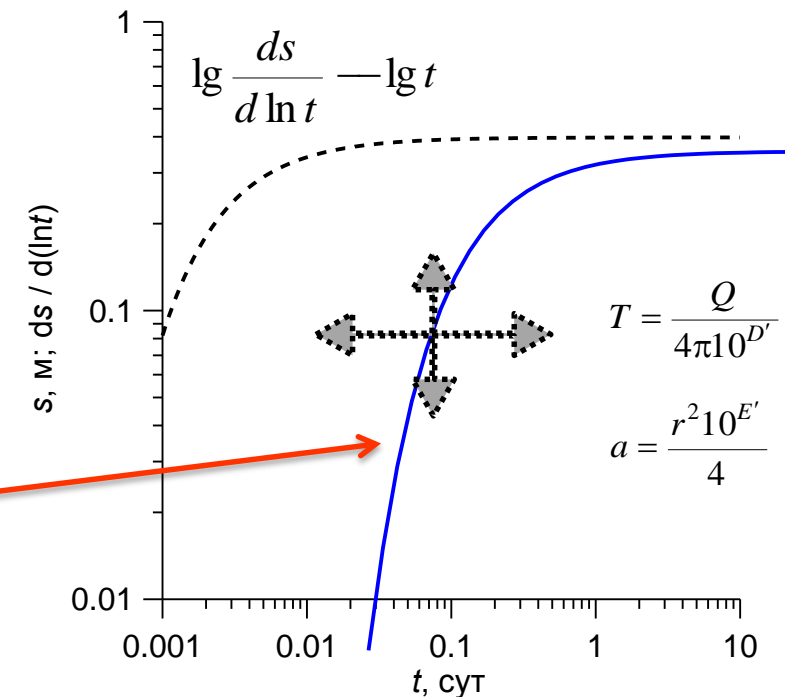
Способ эталонной кривой



Горизонтальная прямая линия

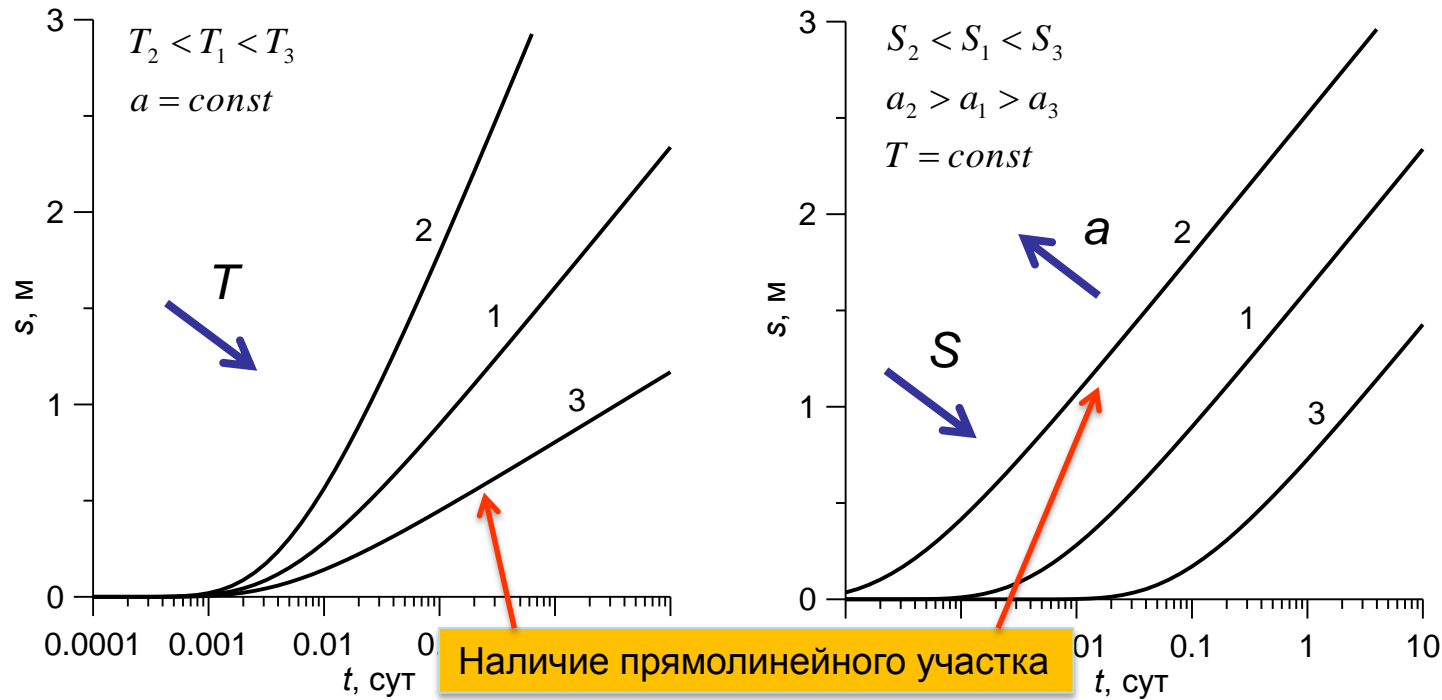
Эталонная кривая:

$\lg \exp(-u) \sim \lg \frac{1}{u}$



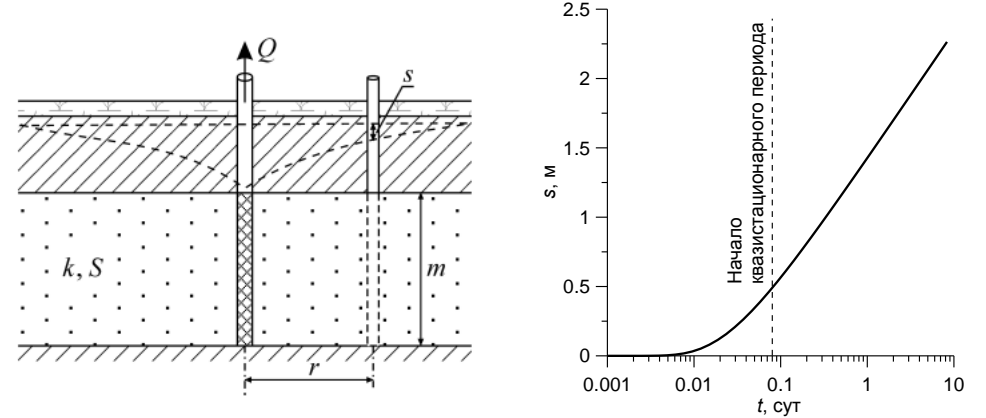
Анализ данных: напорный пласт

Влияние фильтрационных параметров

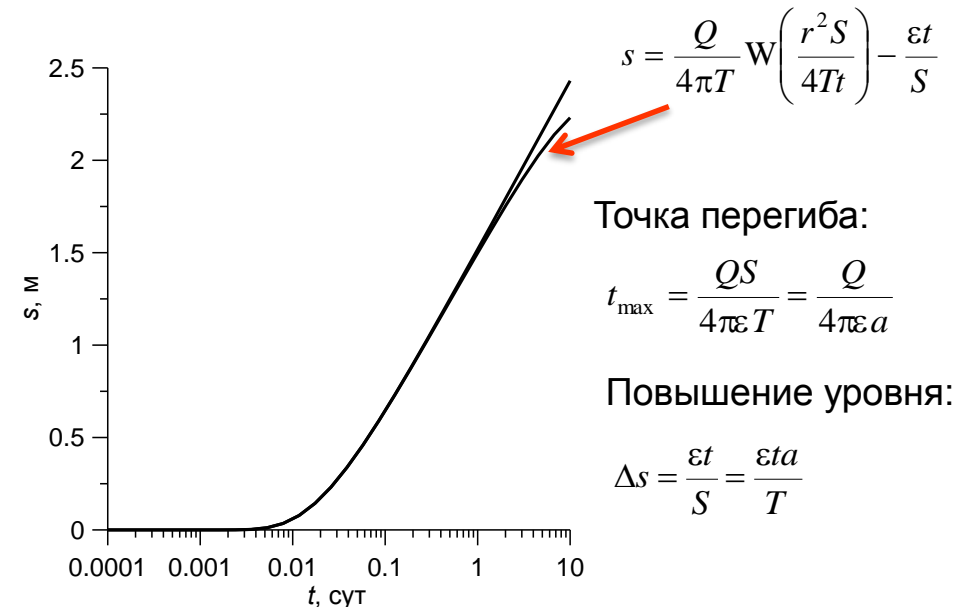


Экспертная оценка проводимости пласта:
 T [м²/сут], Q [м³/сут], s_w [м]

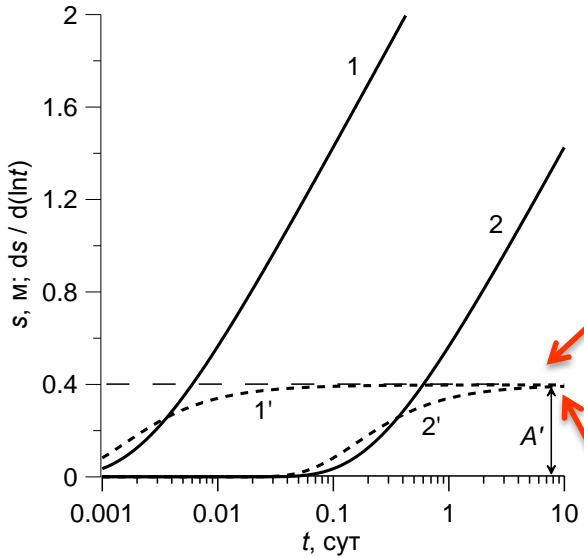
$$T \approx 1.22 \frac{Q}{s_w}$$



Влияние инфильтрационного питания



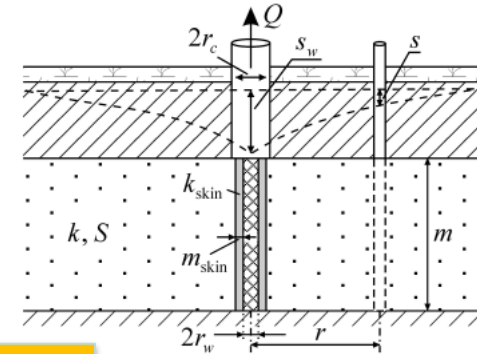
Деривативный анализ: напорный пласт



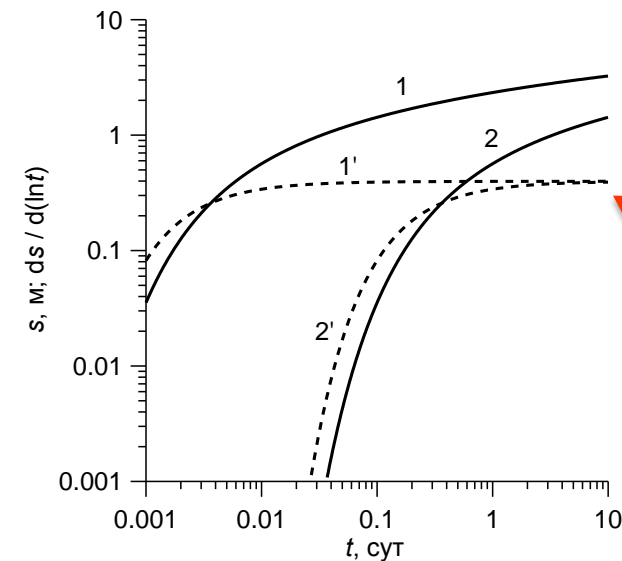
Определяем
проводимость пласта

$$T = \frac{Q}{4\pi A'}$$

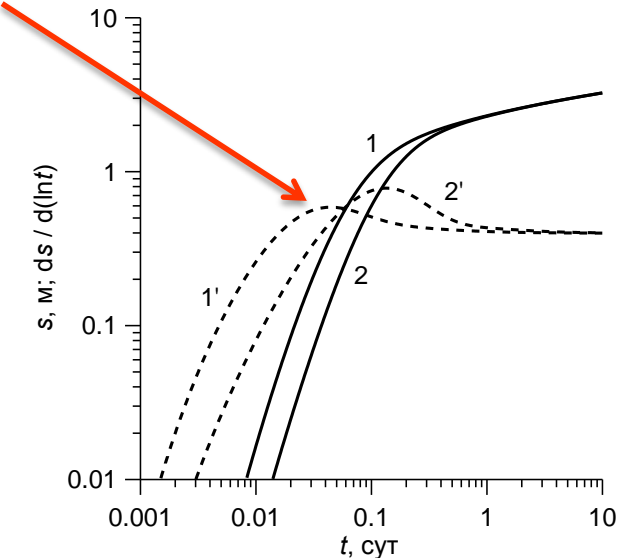
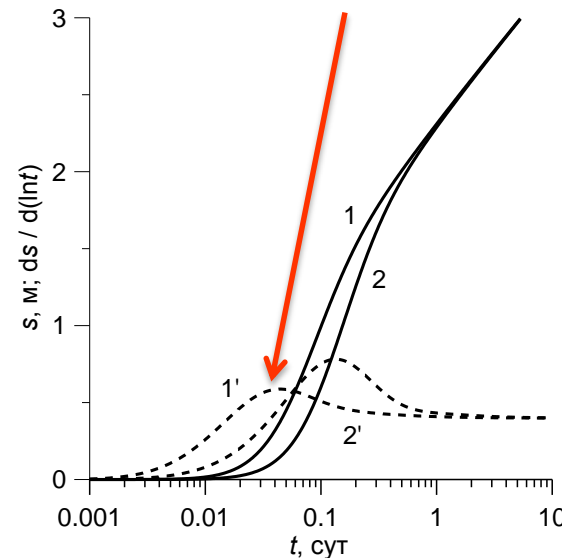
Деривативные кривые: влиянию
емкости скважины и скин-эффекта



Наличие точки максимума на
деривативных кривых



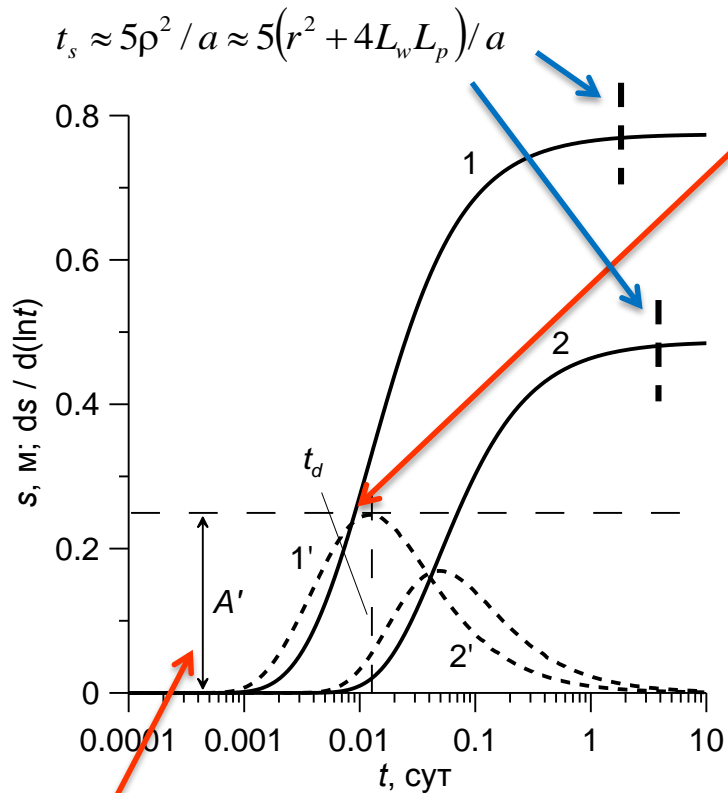
Деривативные кривые по
всем наблюдательным
скважинам сливаются в
одну горизонтальную
линию



1 – влияние емкости; 2 – влияние емкости и скина

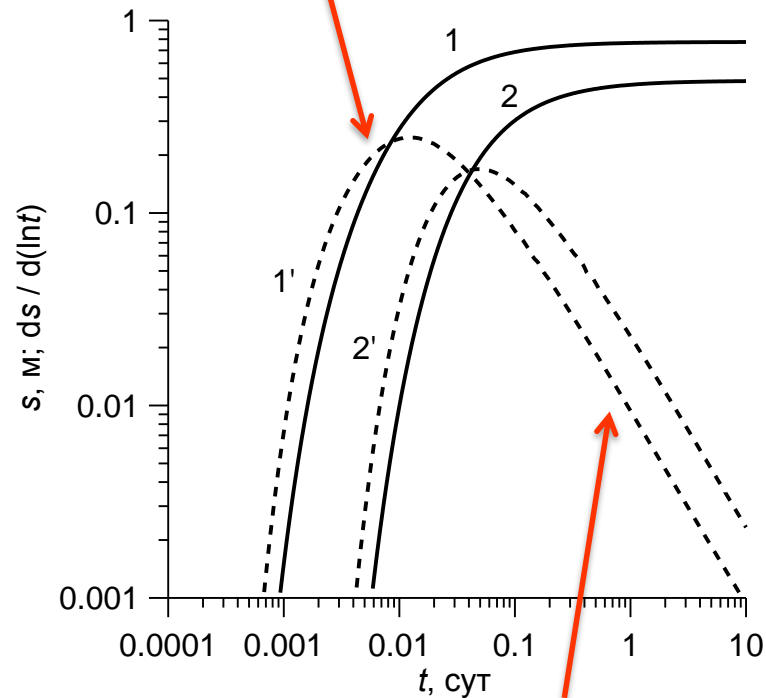
Анализ данных: граница I рода

Время наступления стационара зависит от положения скважин относительно границы



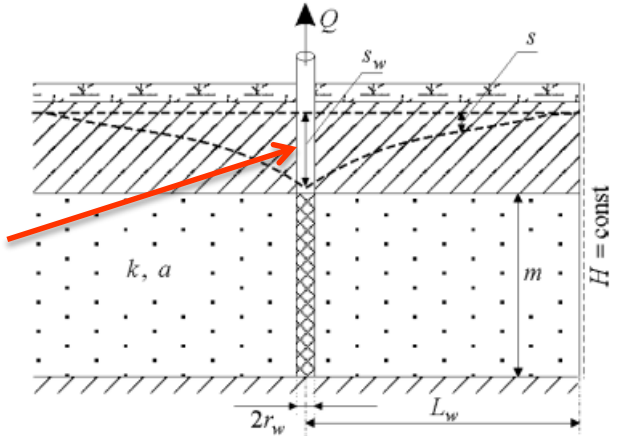
По точке максимума определяем проводимость пласта

Наличие точки максимума на деривативных кривых



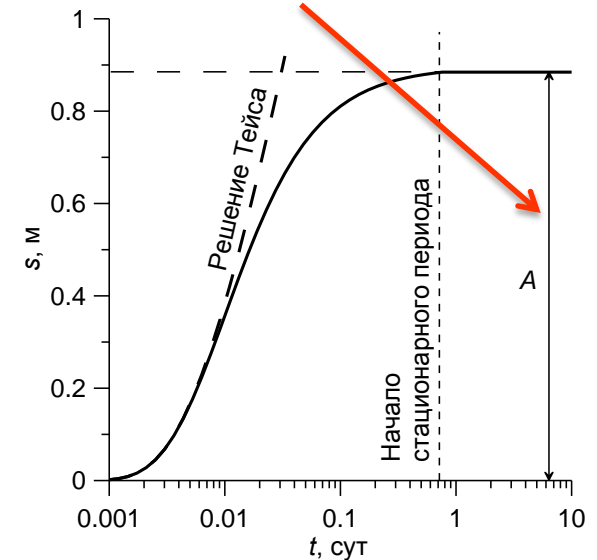
Линии параллельны на нисходящей кривой бигарифмического графика

$$T = \frac{0.366Q}{s_{mw}} \lg \frac{2L_w}{r_w}$$

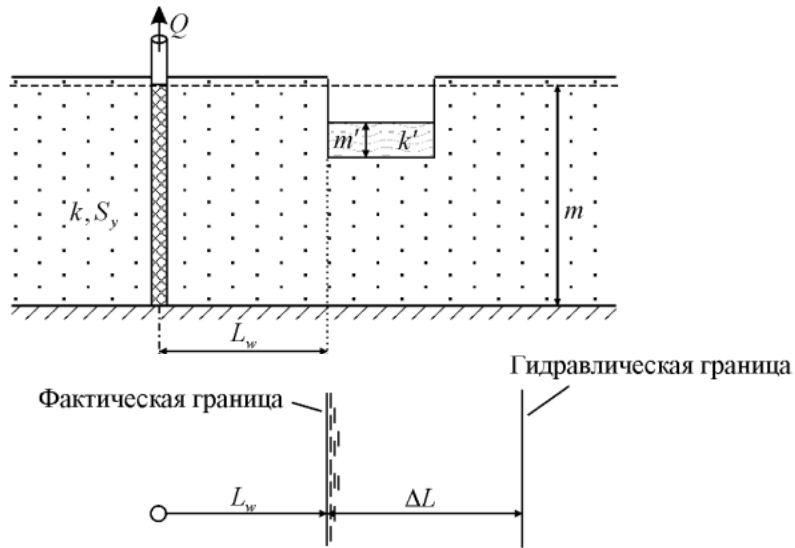


Проводимость определяем по максимальному понижению

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho}{r}$$



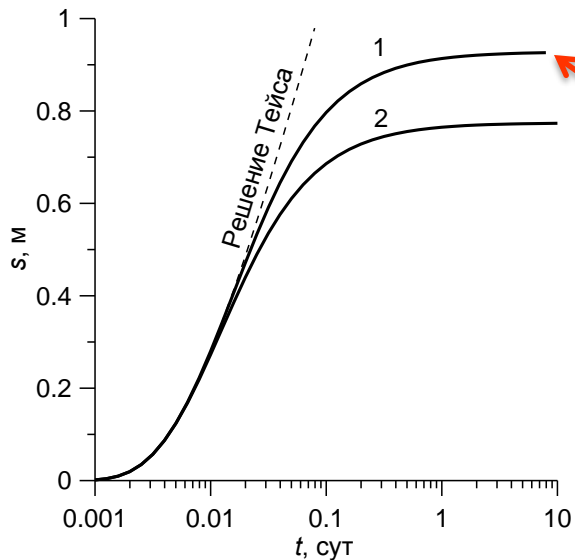
Анализ данных: откачка вблизи реки



Деривативный анализ

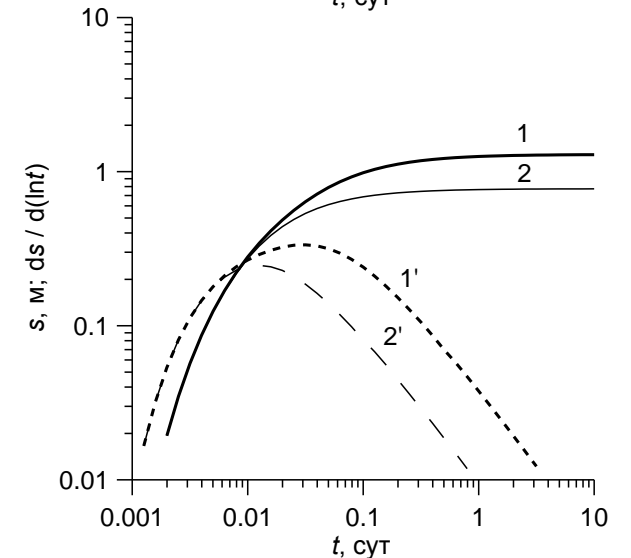
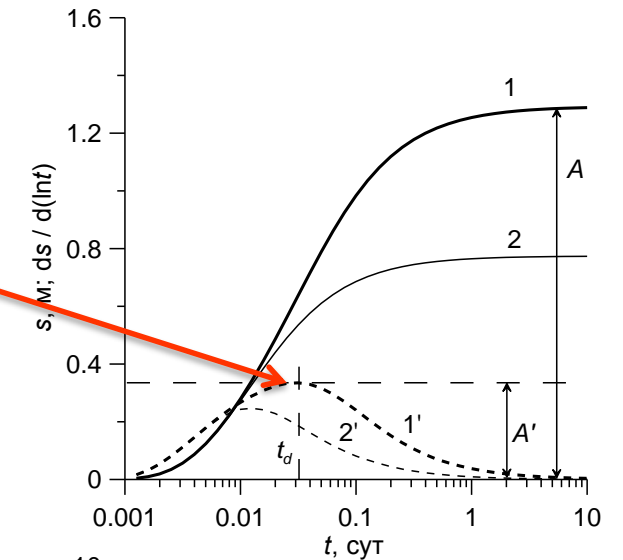
По точке максимума определяем проводимость пласта

Графики понижения и скорости снижения уровня для границы I рода и реки подобны



По понижению на период стационара определяем проводимость пласта

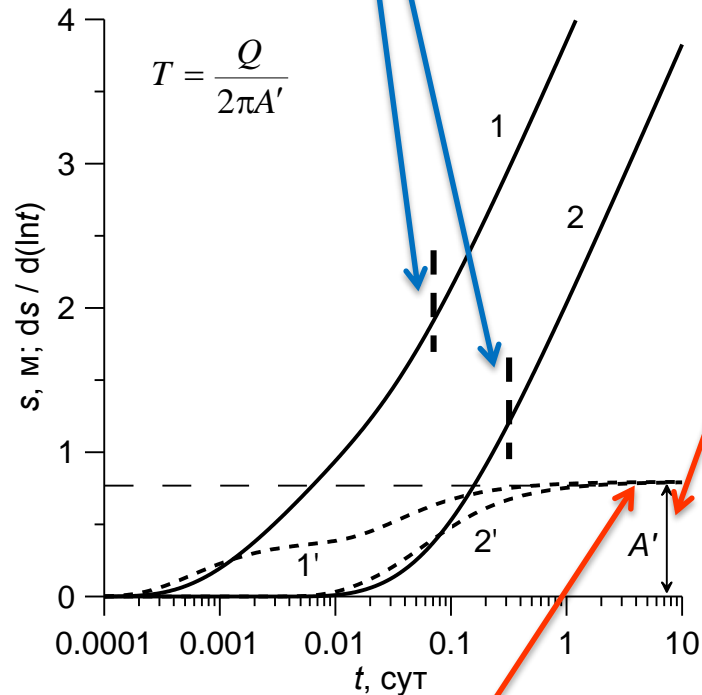
1 – река; 2 – I род



Анализ данных: граница II рода

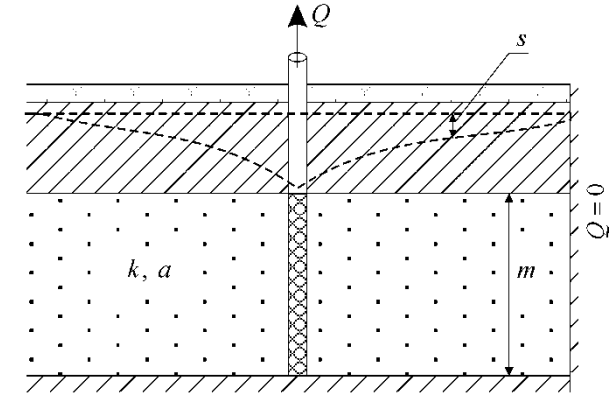
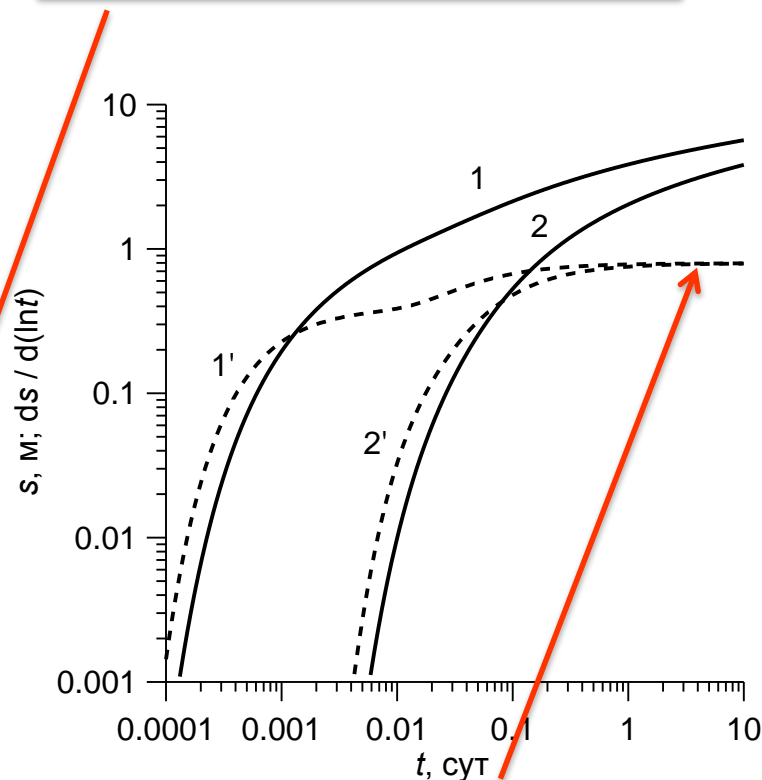
Время наступления квазистационара зависит от положения скважин относительно границы

$$t_s \approx 5\rho^2 / a \approx 5(r^2 + 4L_w L_p) / a$$

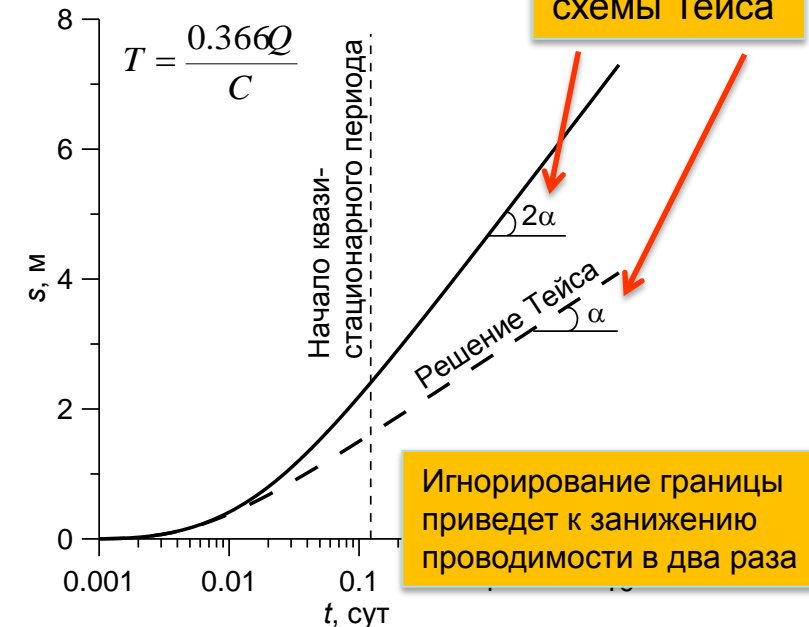


Деривативные кривые по всем наблюдательным скважинам сливаются в одну горизонтальную линию

Определяем проводимость пласта



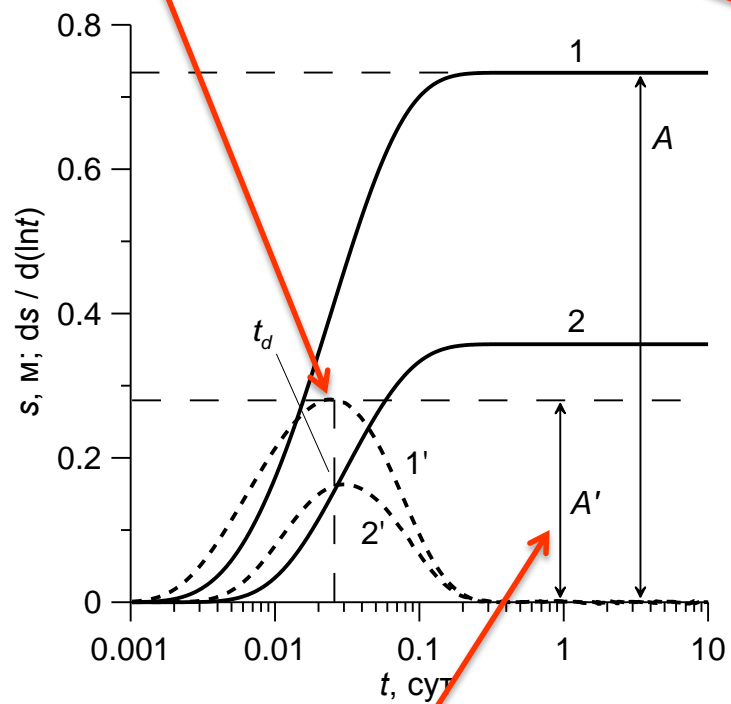
Угол наклона отличается в два раза от схемы Тейса



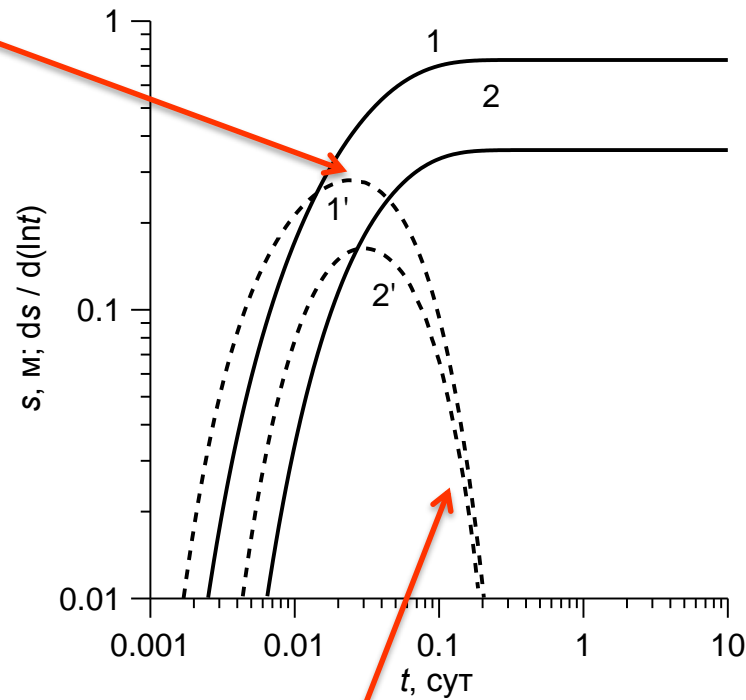
Игнорирование границы приведет к занижению проводимости в два раза

Анализ данных: пласт-полоса (I род)

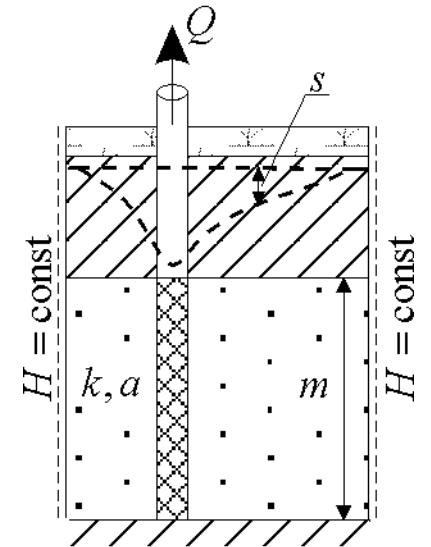
Наличие точки максимума на
деривативных кривых



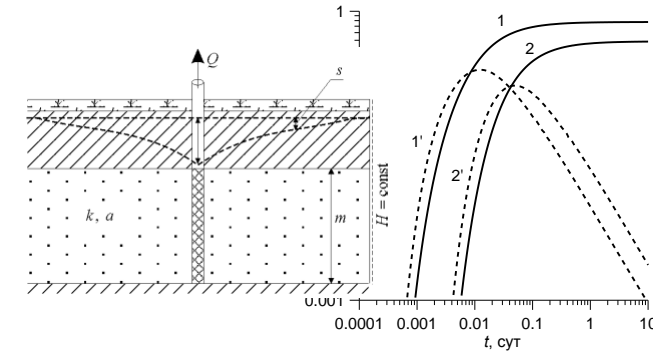
По точке максимума определяем
проводимость пласта



Линии сливаются на нисходящей
кривой билогарифмического графика



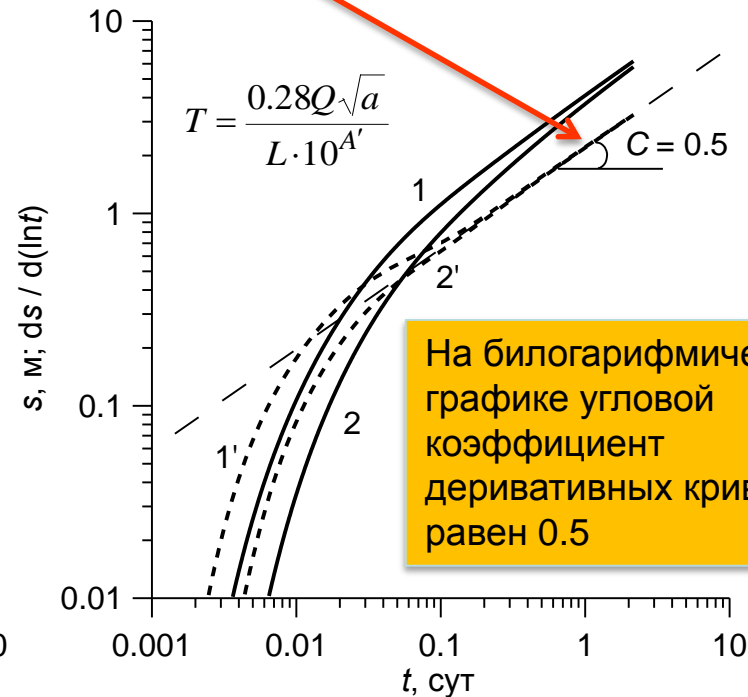
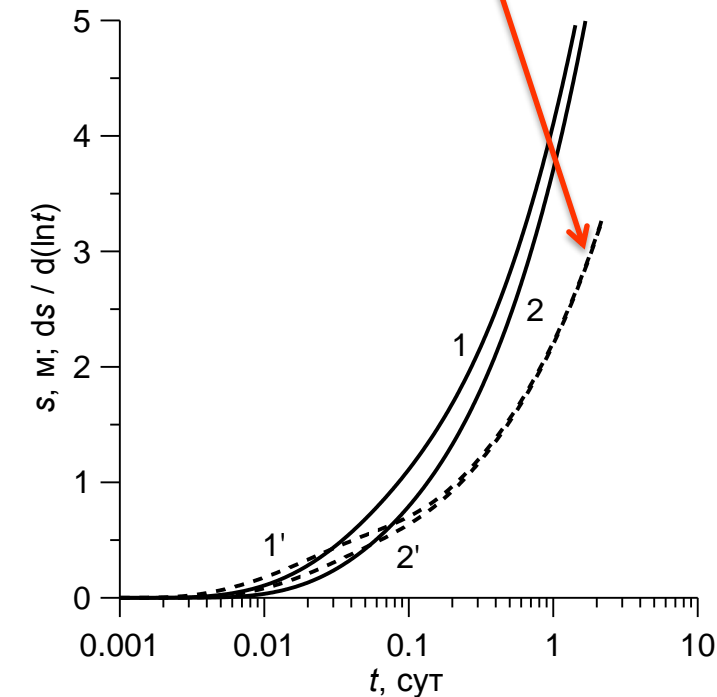
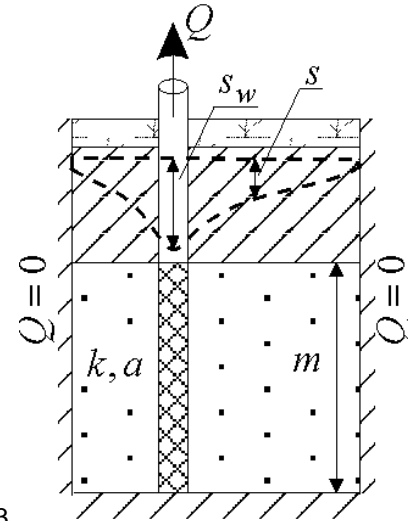
Полуограниченный пласт – I род



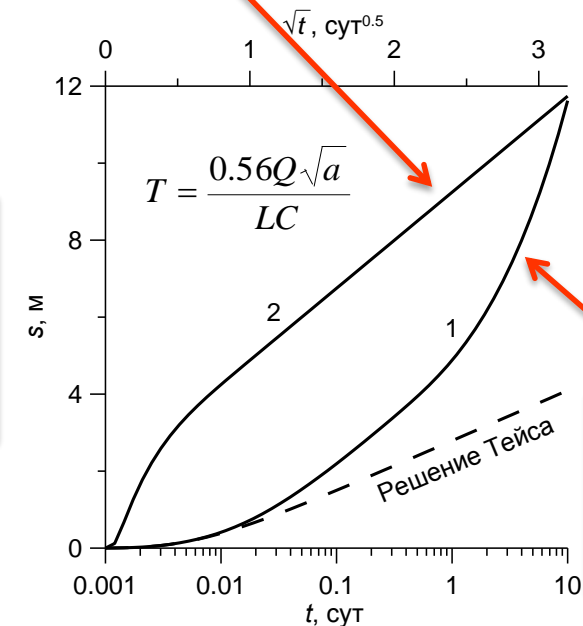
Анализ данных: пласт-полоса (II род)

Деривативные кривые по разным наблюдательным скважинам сливаются

График понижения $s \sim \sqrt{t}$ имеет прямолинейный участок



На билогарифмическом графике угловой коэффициент деривативных кривых равен 0.5

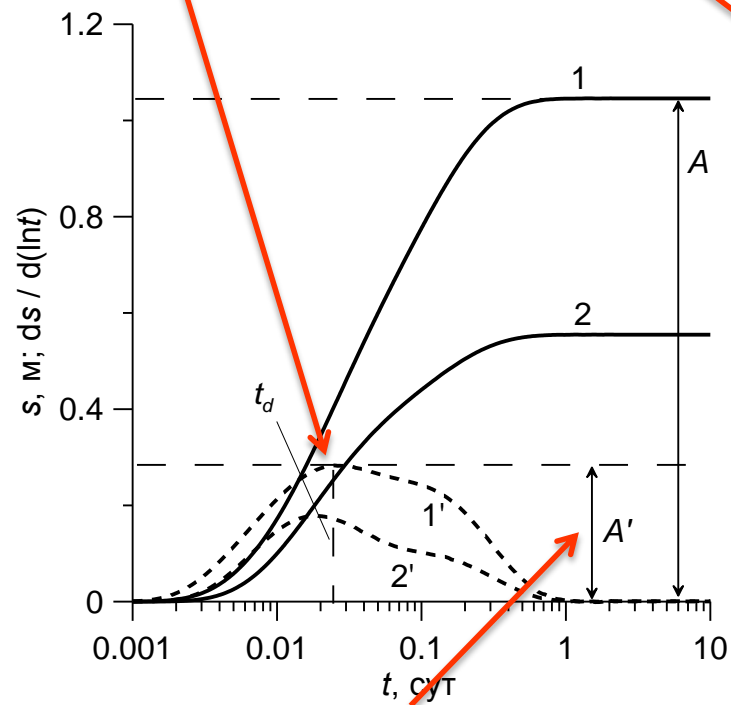


На графике $s \sim \lg t$ отсутствует прямолинейный участок

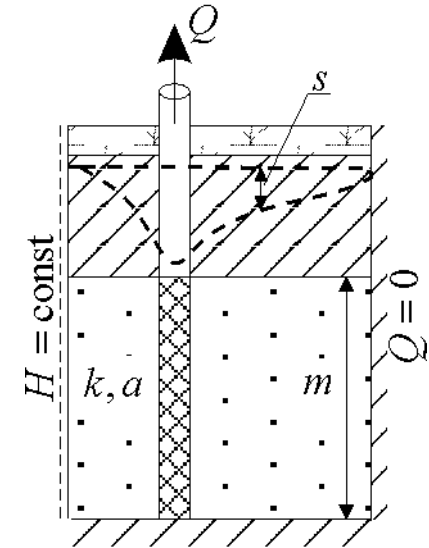
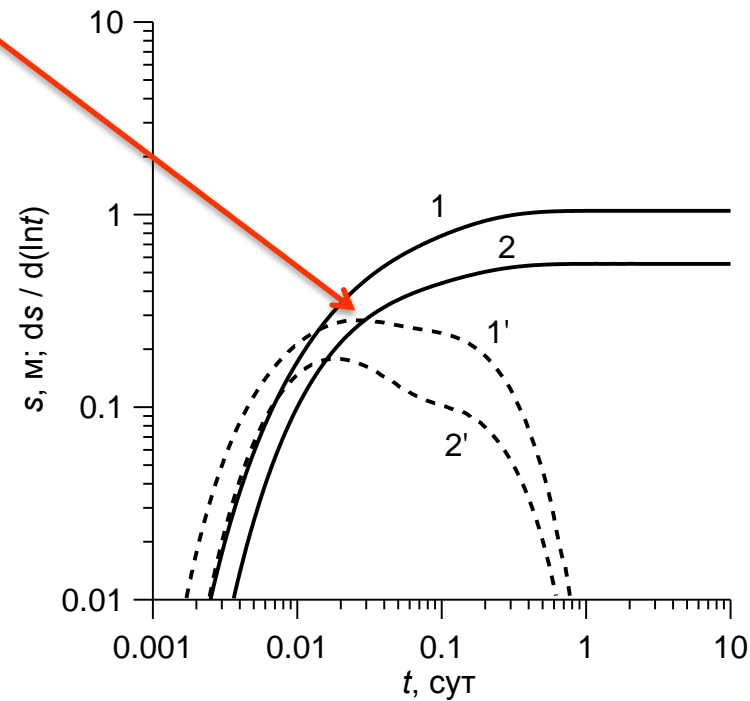
Кривые понижения сливаются на большие моменты времени

Анализ данных: пласт-полоса (I и II род)

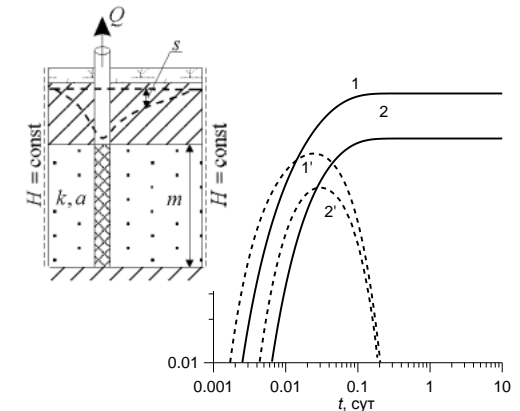
Наличие точки максимума на
деривативных кривых. Широкий купол



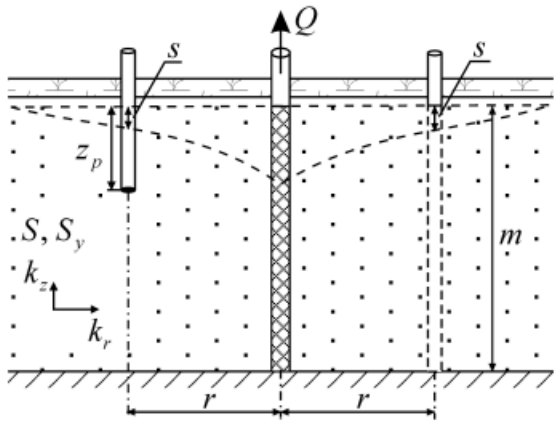
По точке максимума определяем
проводимость пласта



Пласт-полоса – I род

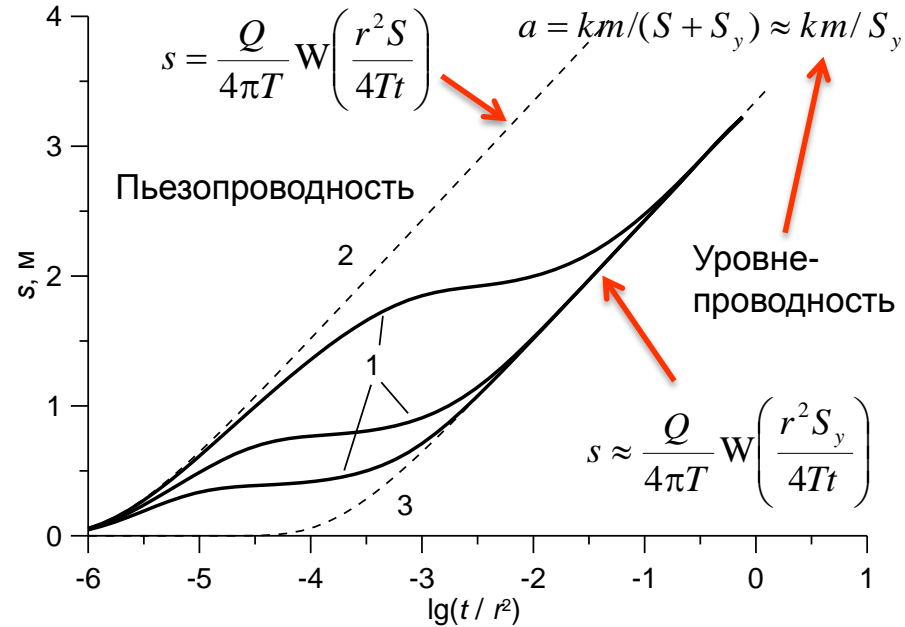


Анализ данных: безнапорный пласт

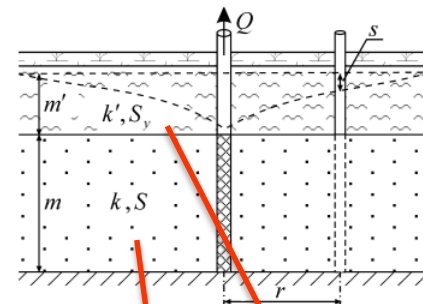


Экспертная оценка коэффициента фильтрации: k [м/сут], Q [м³/сут], s_w [м]

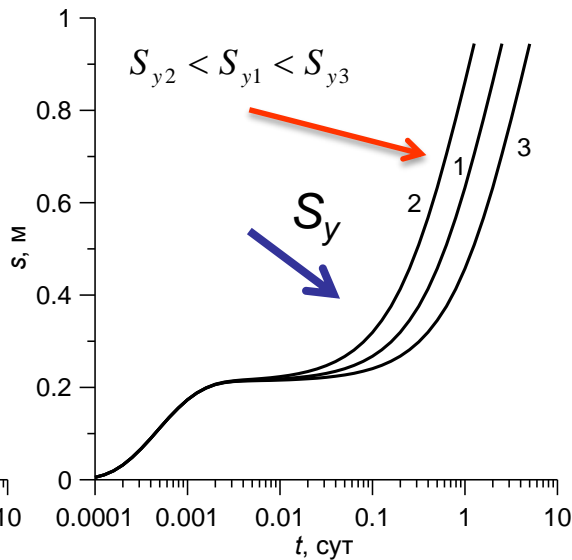
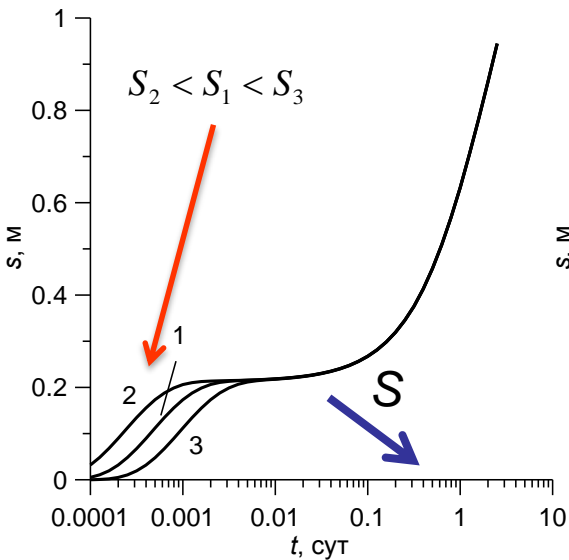
$$k \approx 2.43 \frac{Q}{s_w (2m - s_w)}$$



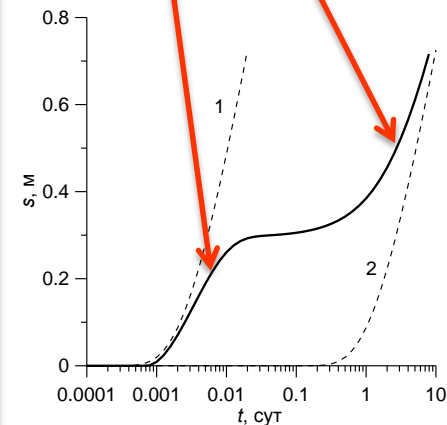
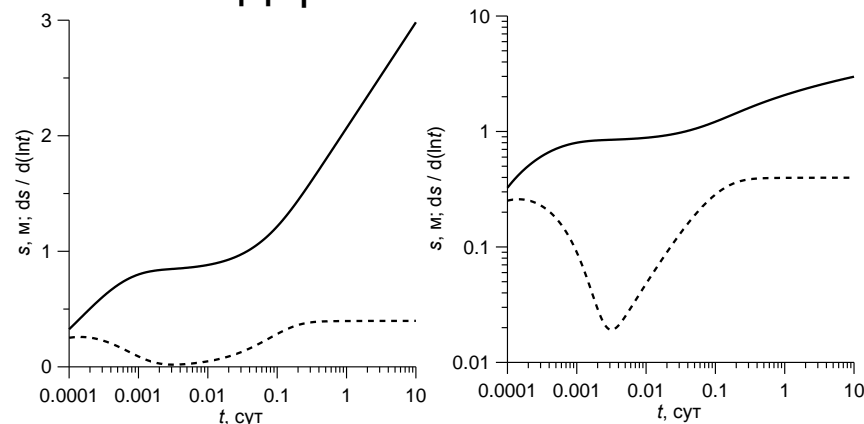
Двухслойный безнапорный пласт



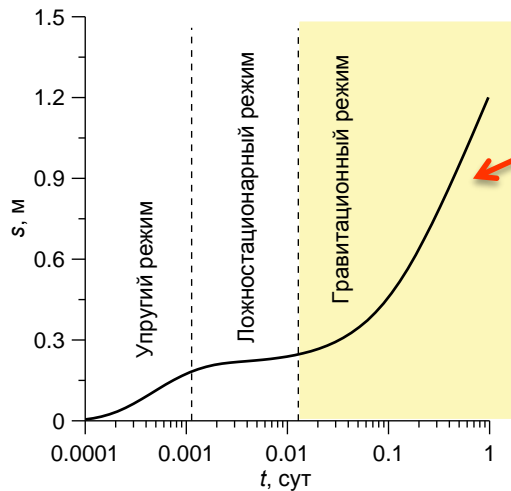
Влияние фильтрационных параметров



Деривативный анализ



Анализ данных: безнапорный пласт, коррекция понижения

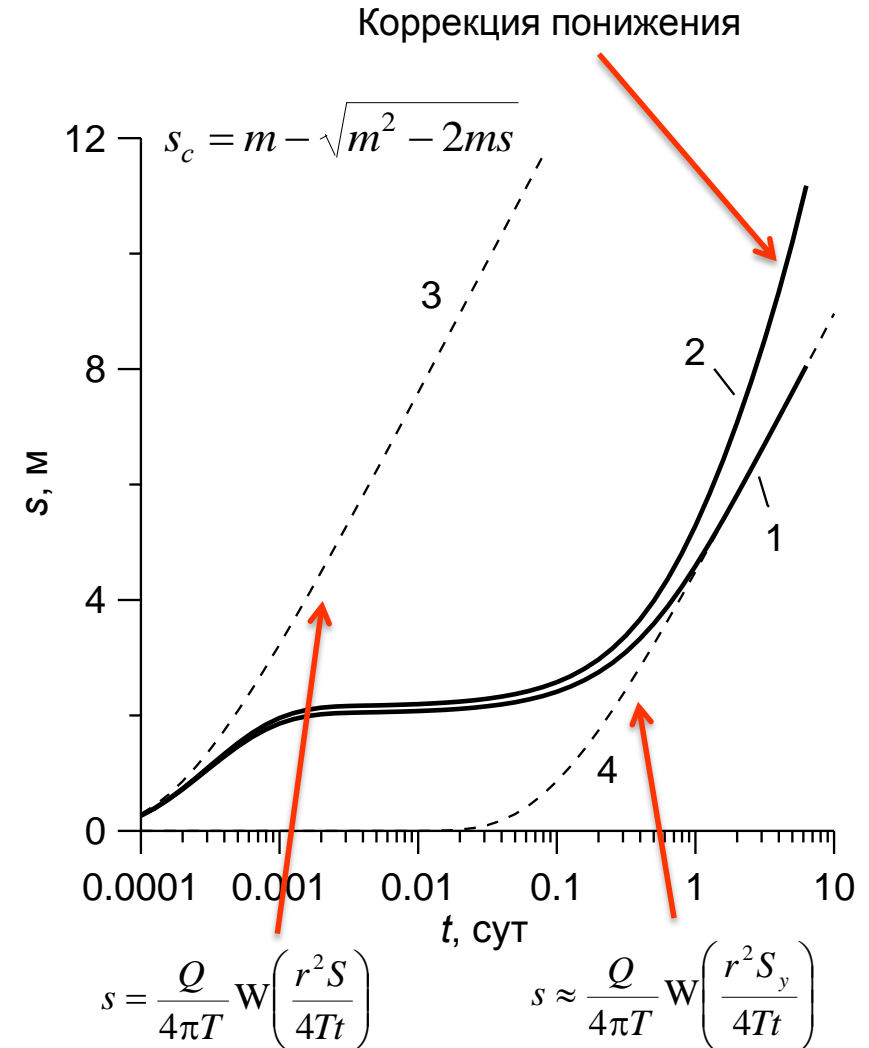
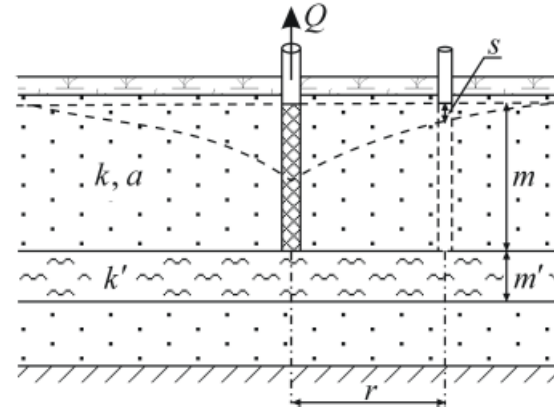
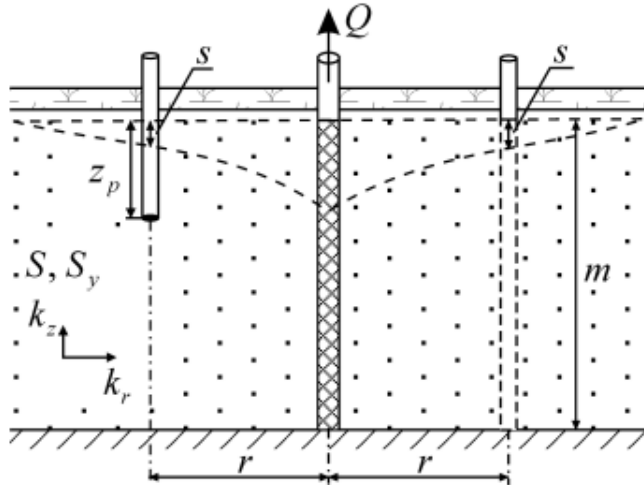


$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} W\left(\frac{r^2 S_y}{4Tt}\right)}$$

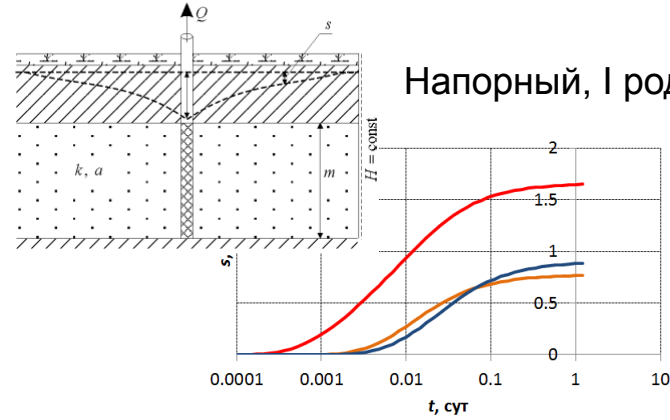
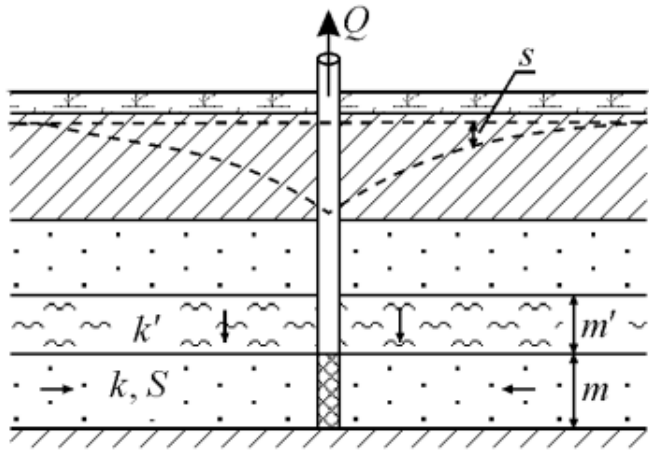
Коррекция понижения учитывает изменение обводненной мощности водоносного пласта в процессе откачки

Безнапорный пласт с перетеканием

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} W\left(\frac{r^2 S_y}{4Tt}, \frac{r}{B}\right)}$$



Анализ данных: пласт с перетеканием



Наклонные участки кривой не параллельны

Стационар во всех скважинах наступает одновременно при условии $r/B < 2$

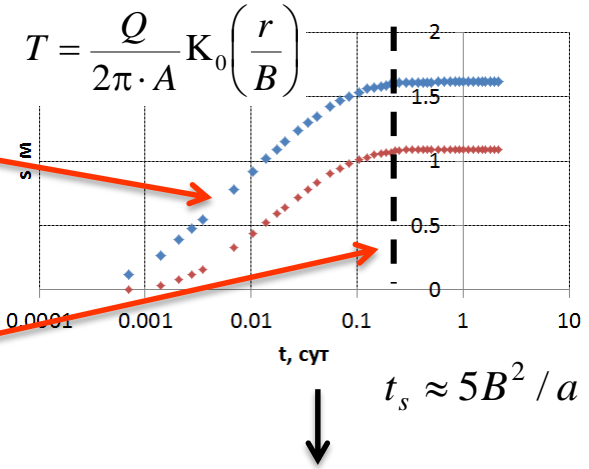
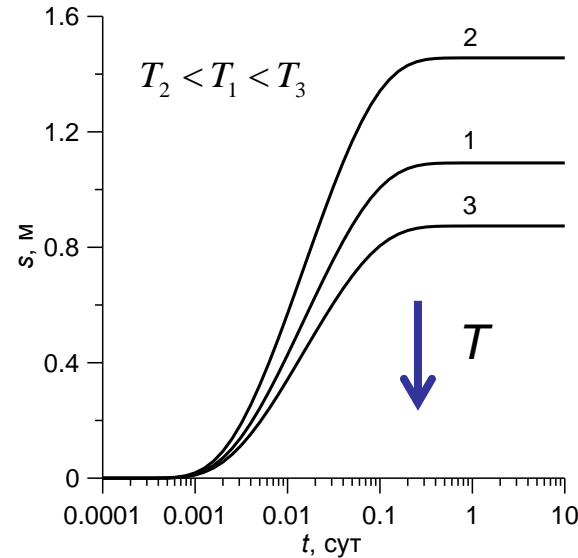
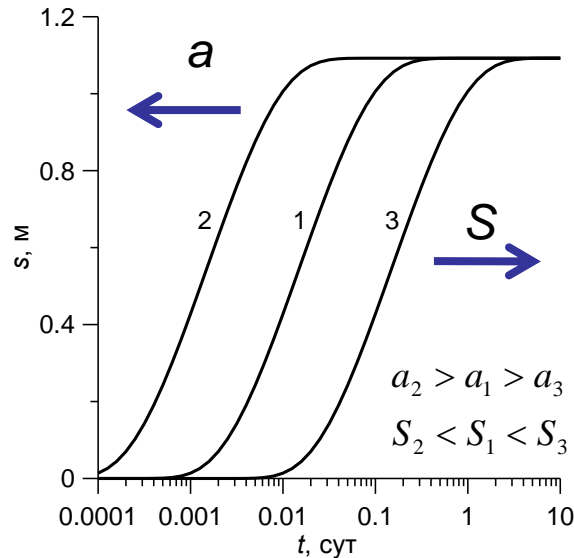
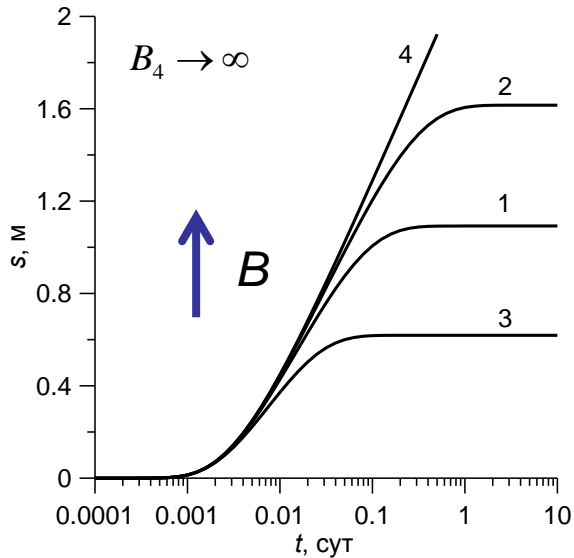
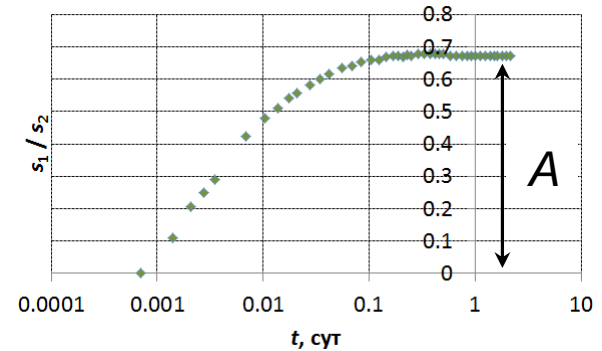


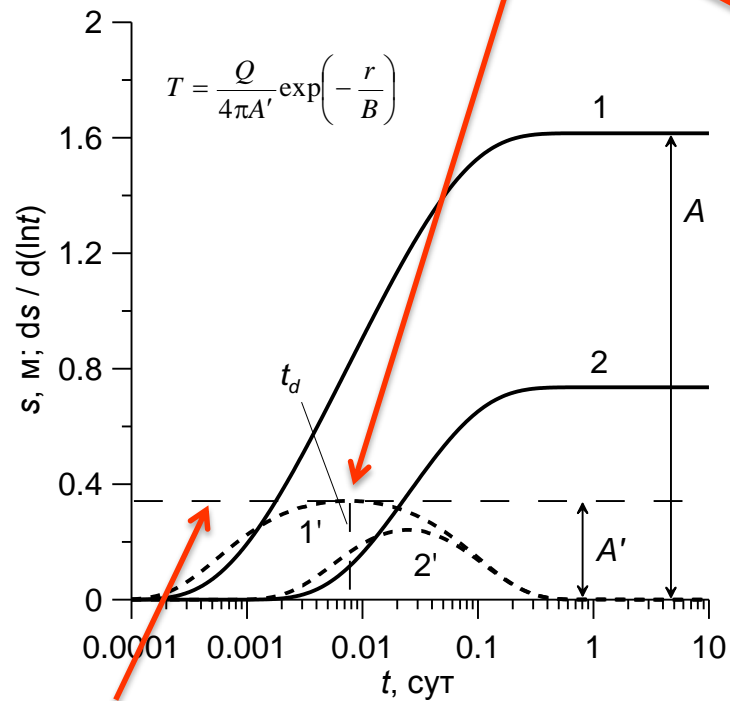
График отношения понижений

$$A = K_0\left(\frac{r_1}{B}\right) / K_0\left(\frac{r_2}{B}\right)$$

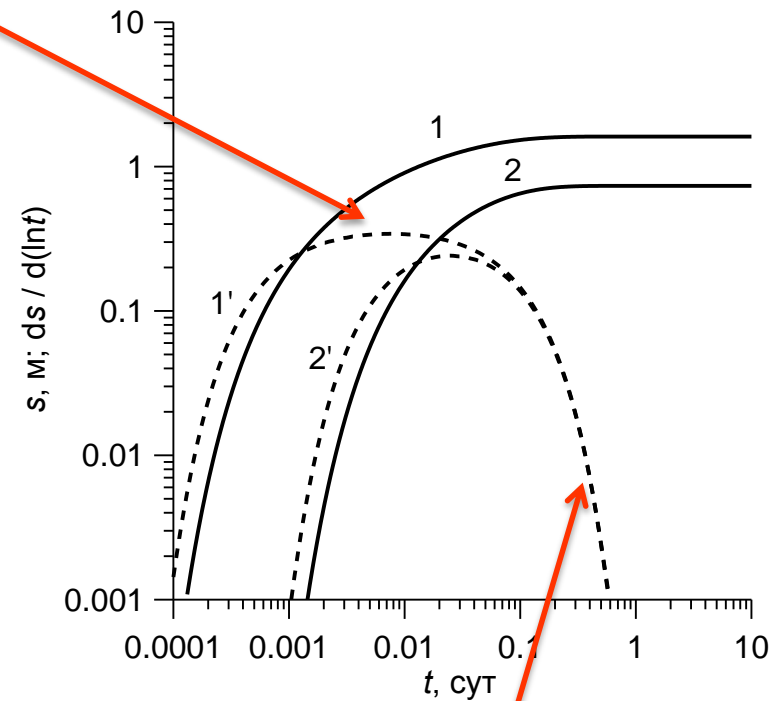


Деривативный анализ: пласт с перетеканием

Наличие точки максимума на деривативных кривых

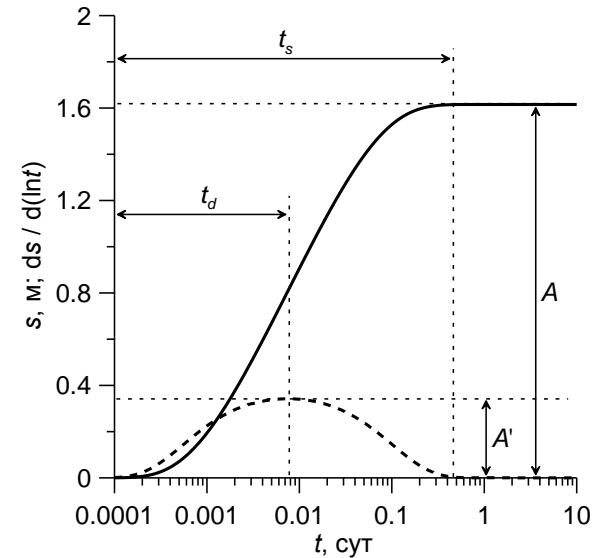


По точке максимума определяем проводимость пласта



Линии сходятся на нисходящей кривой билогарифмического графика

Оценка параметра перетекания по графику понижения и деривативной кривой



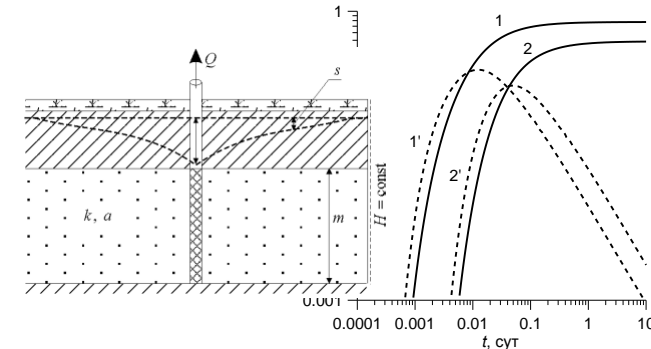
$$2 \frac{A'}{A} = \frac{\exp(-r/B)}{K_0(r/B)}$$

$$B = \sqrt{0.2at_s}$$

$$B = \frac{2at_d}{r}$$

$$B = 0.1r \frac{t_s}{t_d}$$

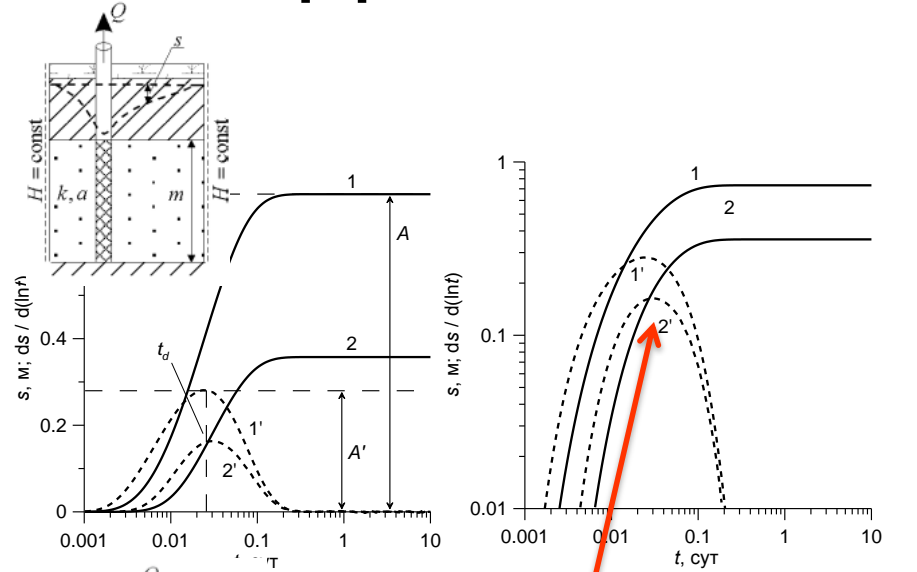
Полуограниченный пласт – I род



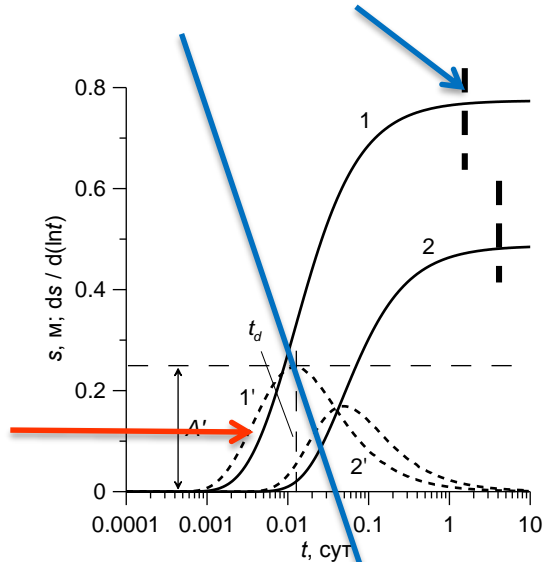
Сравнение стационарных моделей

Время наступления стационара

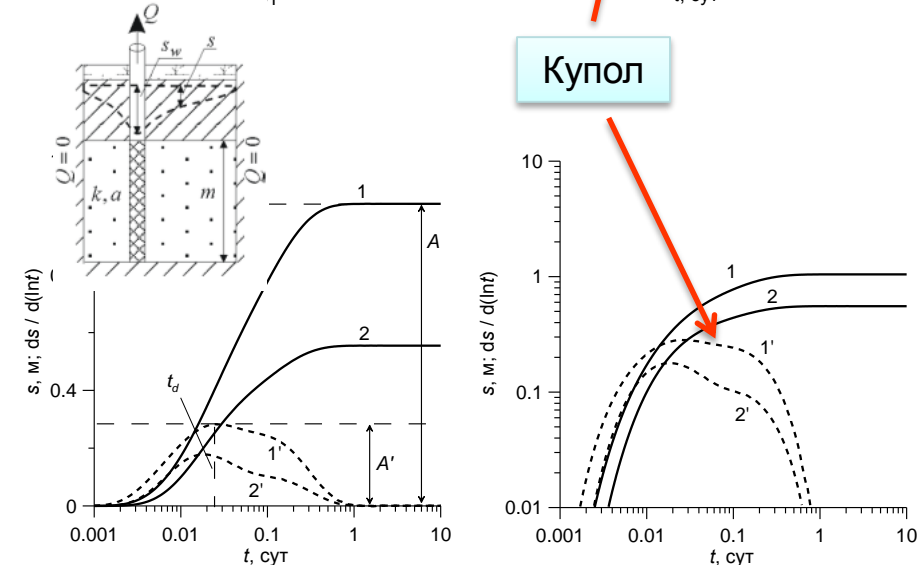
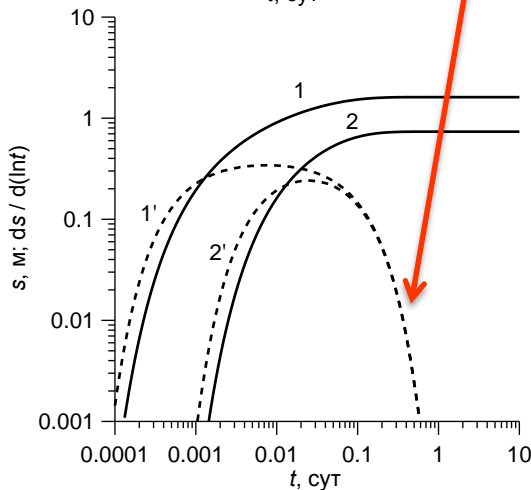
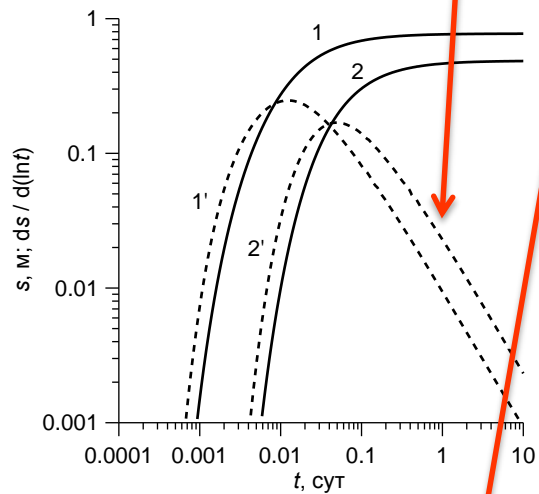
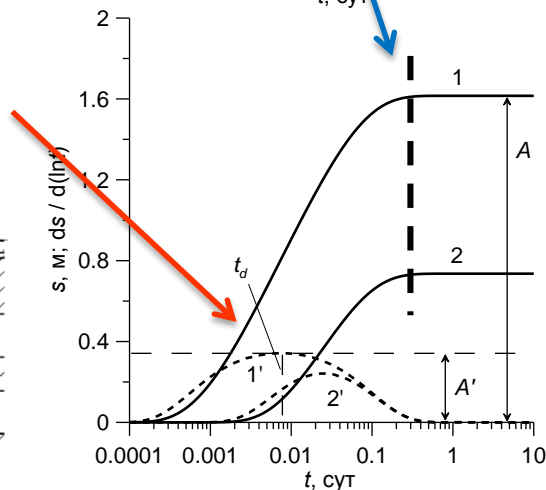
Линии на нисходящей кривой бигарифмического графика



До влияния границы линии параллельны

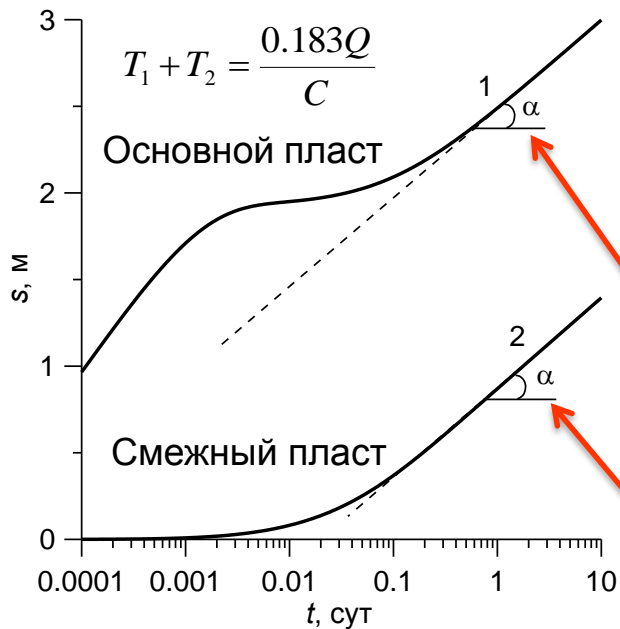
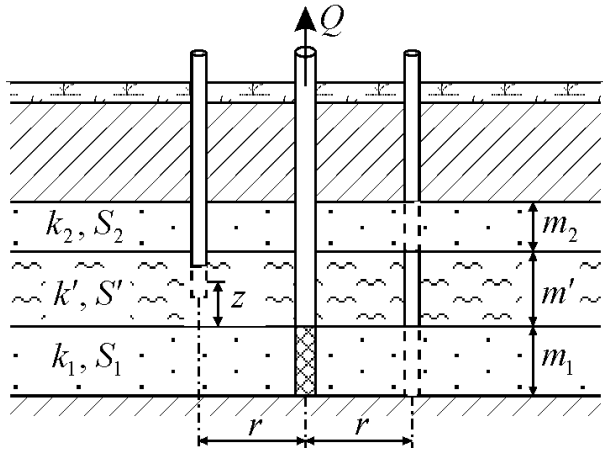


Отсутствие параллельности



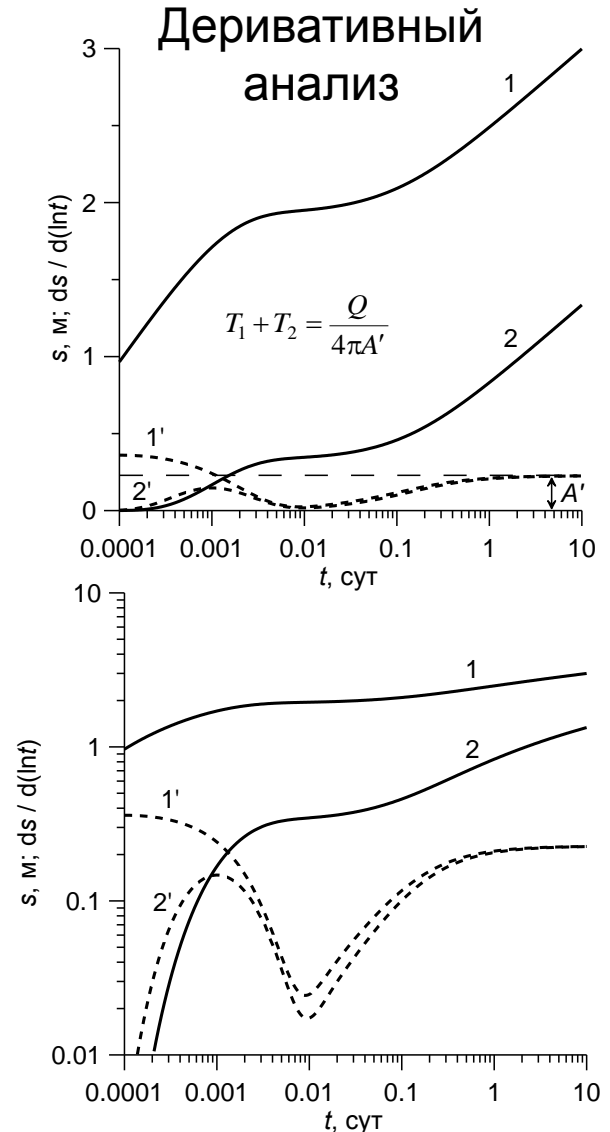
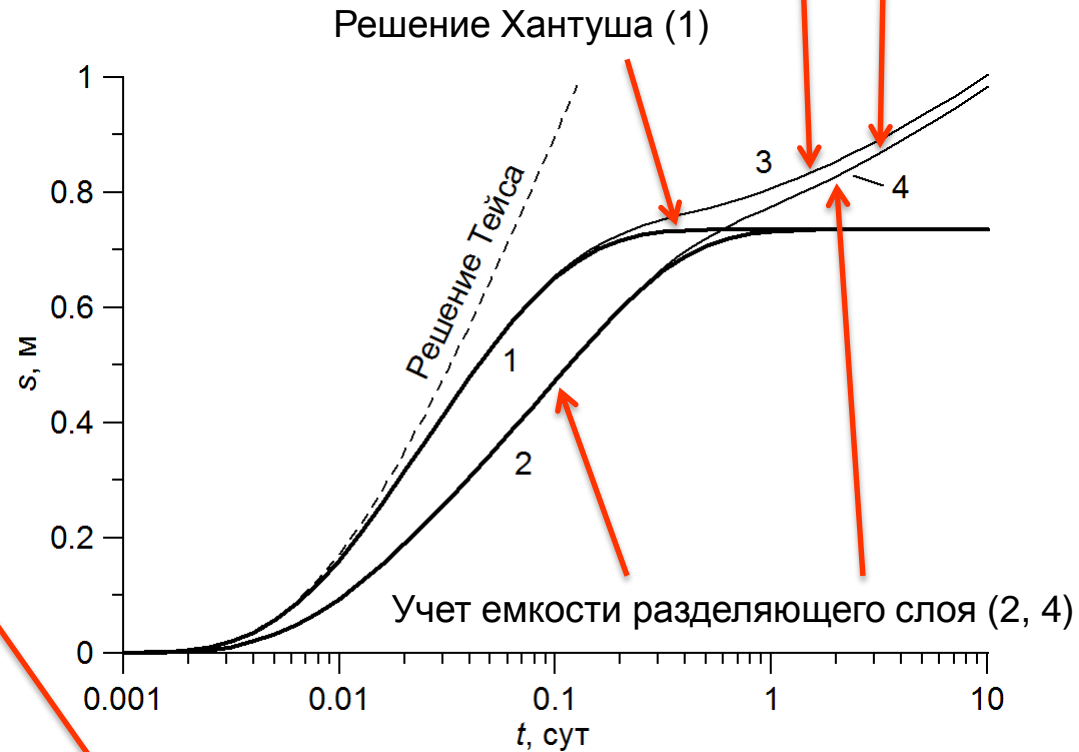
Купол

Анализ данных: водоносные комплексы

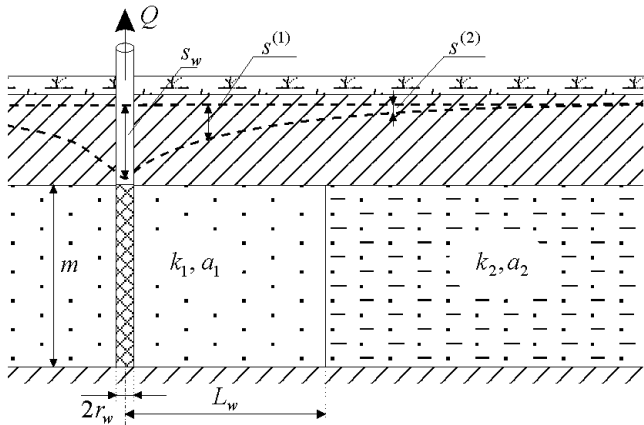


Углы наклона равны

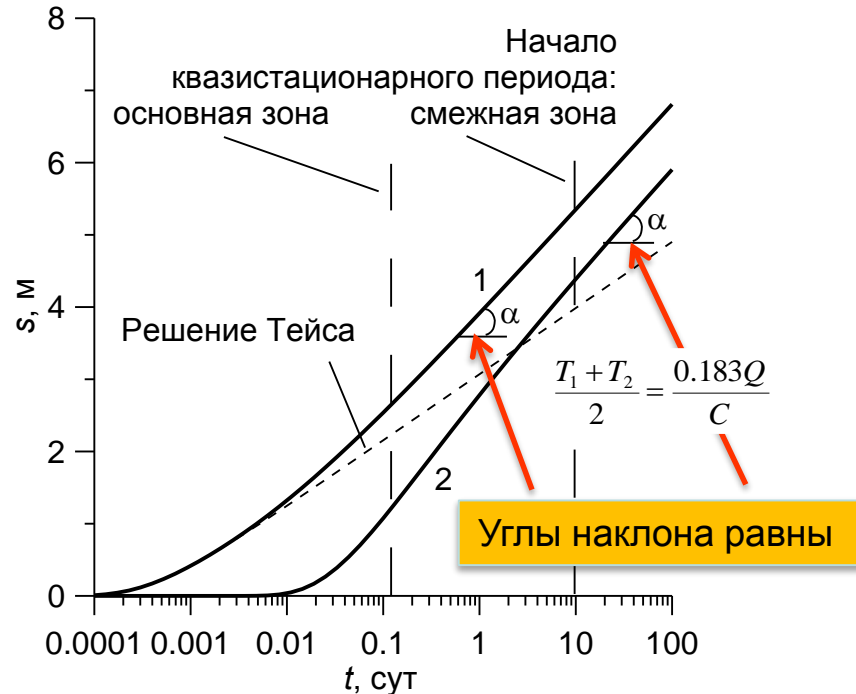
Изменение уровня в смежном пласте (3, 4)



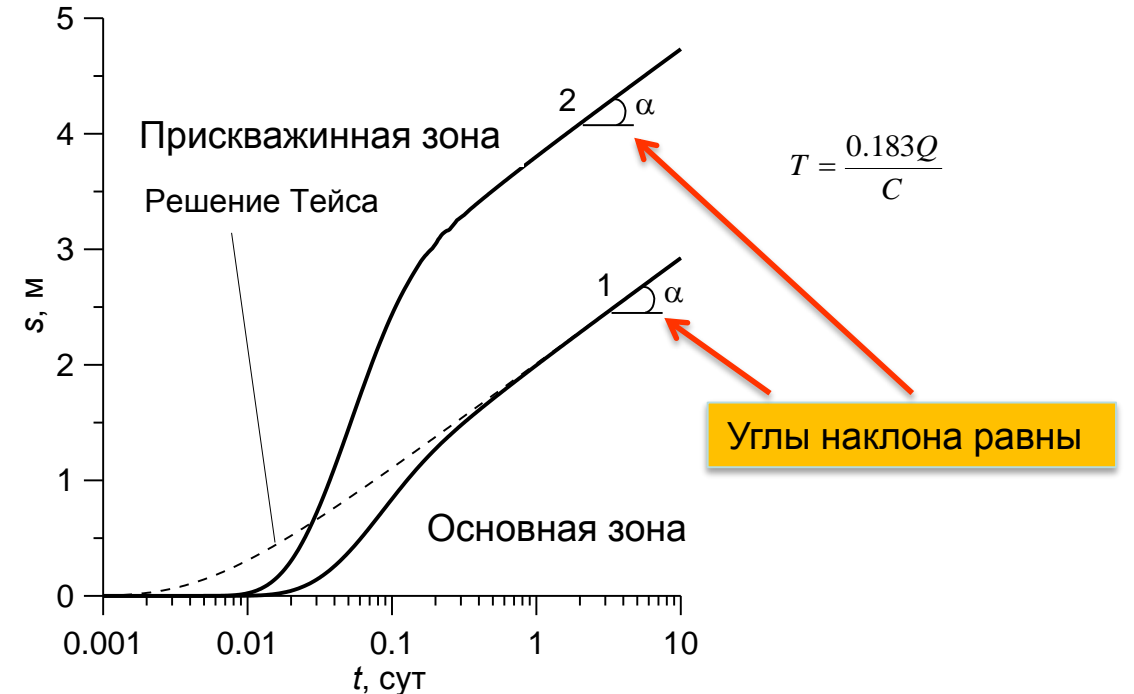
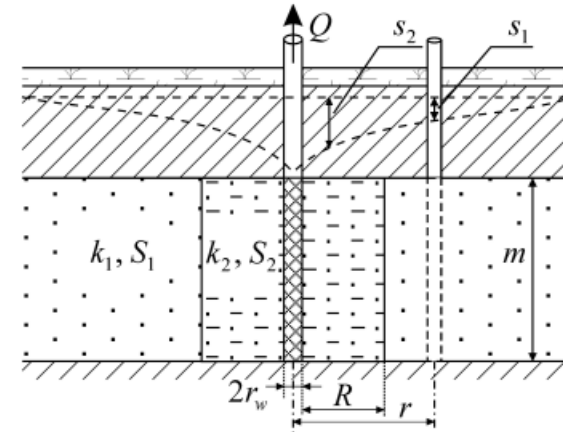
Анализ данных: неоднородные пласты



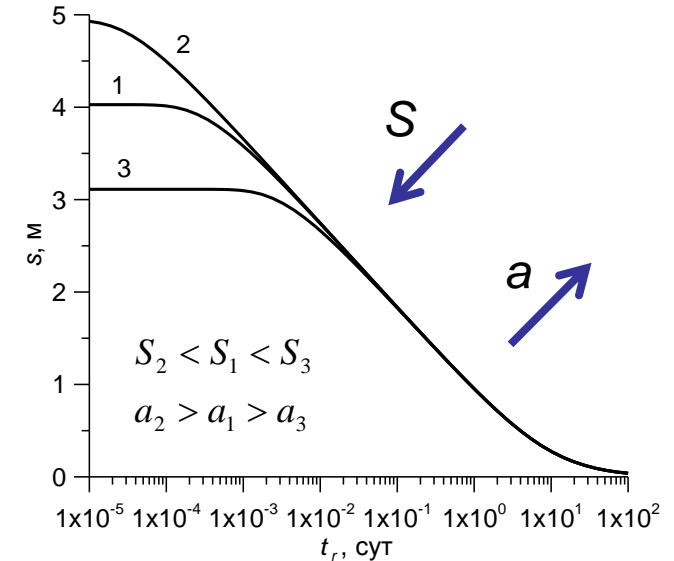
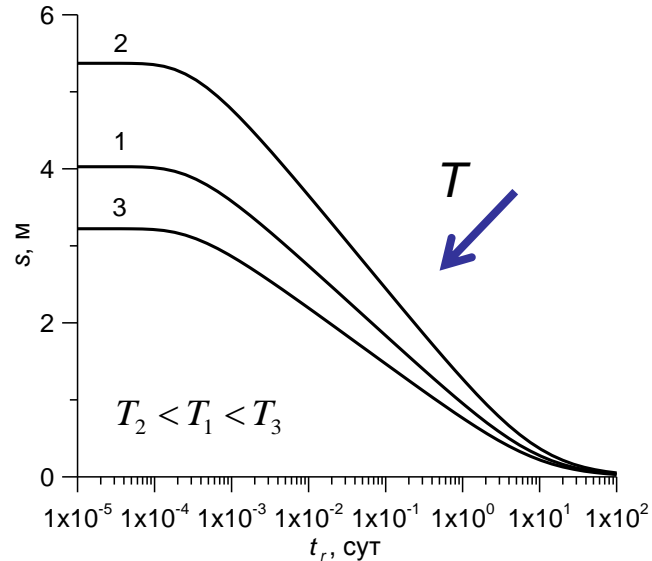
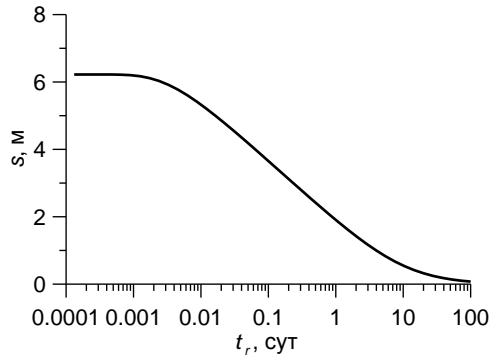
Линейная граница раздела зон



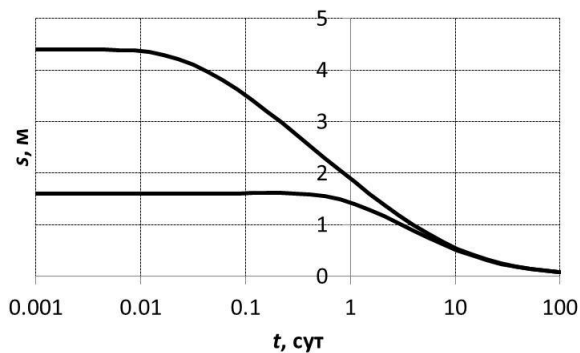
Радиально-неоднородный пласт



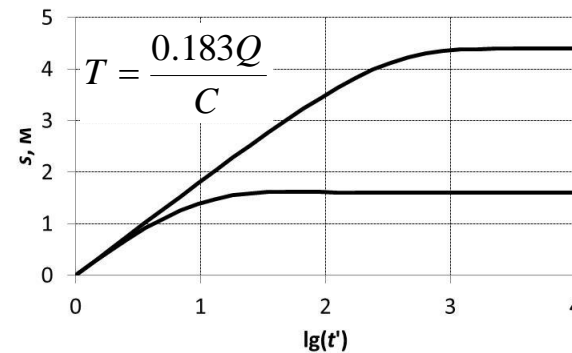
Восстановление: уровень отсчитывается от начала откачки



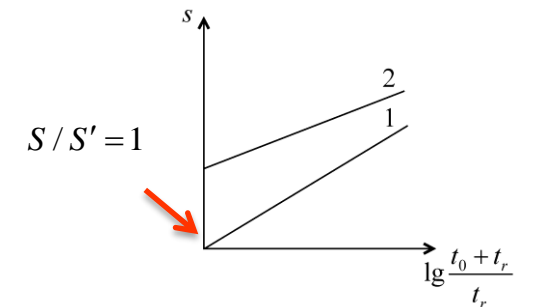
$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]$$



$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r}$$

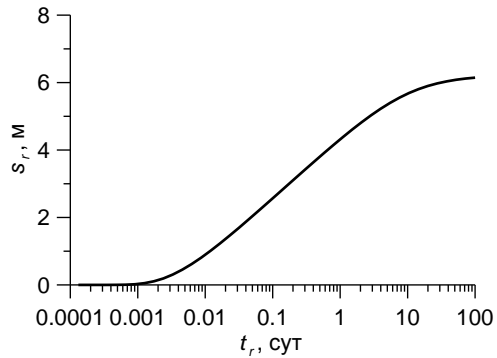


Прямая выходит из начала координат

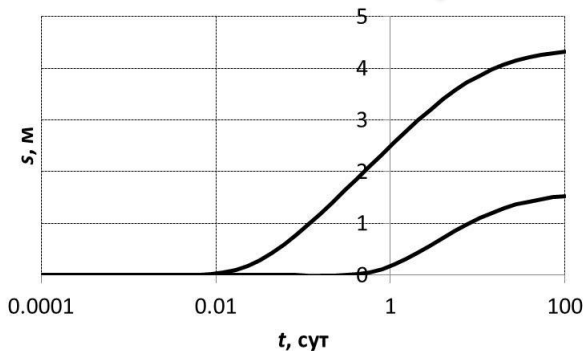


t_0 – длительность откачки; t_r – время от начала восстановления

Восстановление: уровень отсчитывается от начала восстановления



$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} [s_0 - s] = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]$$



$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2}$$

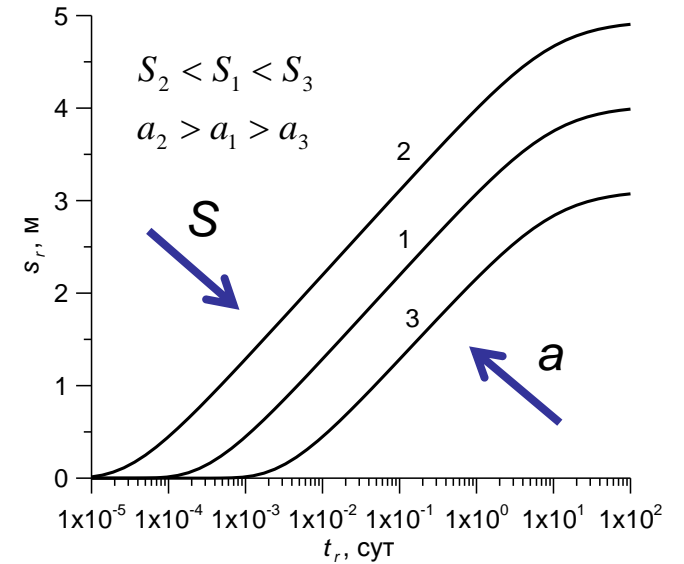
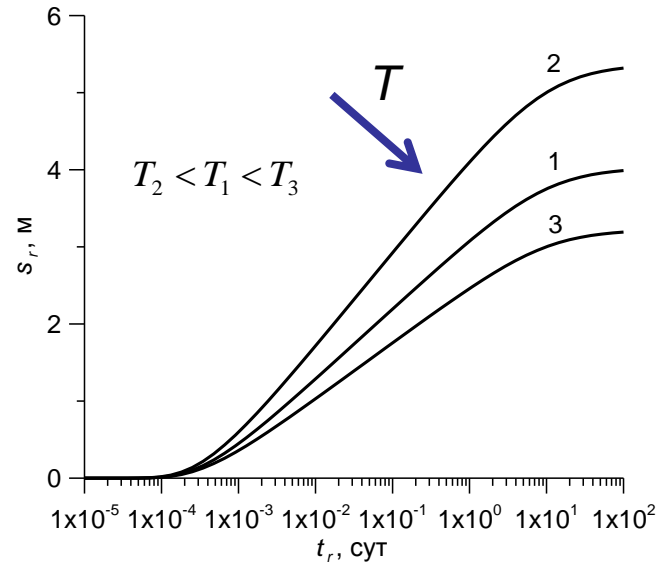
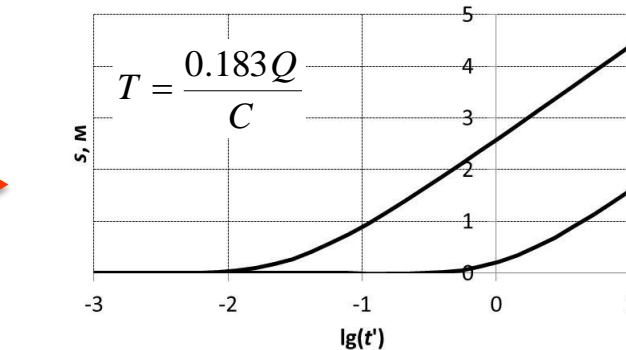
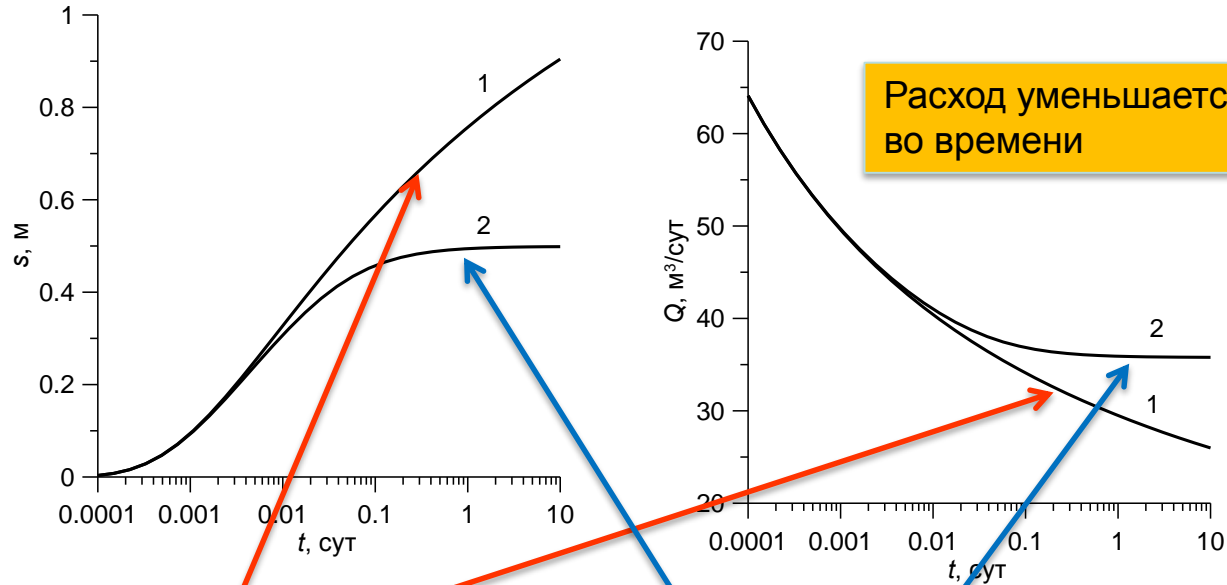


График и обработка
подобны откачке

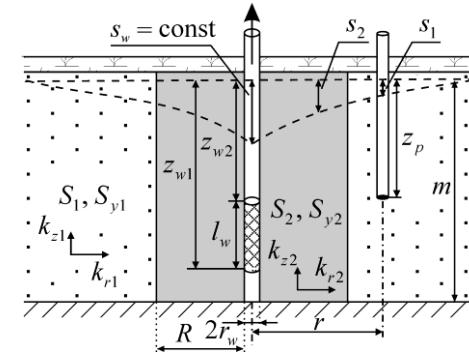
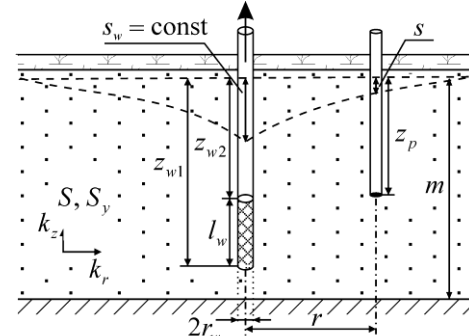
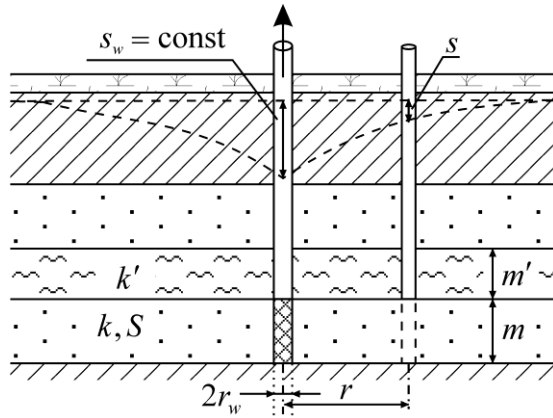
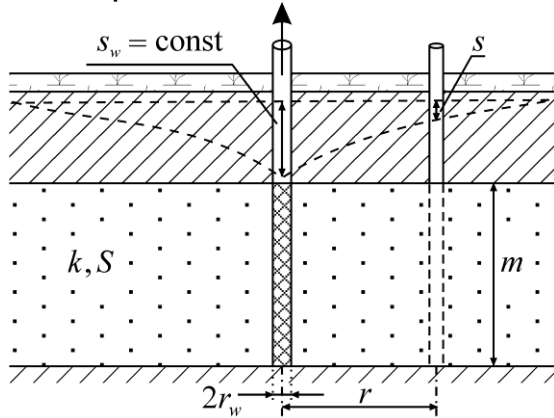
t_0 – длительность откачки; t_r – время от начала восстановления

Откачка с постоянным понижением

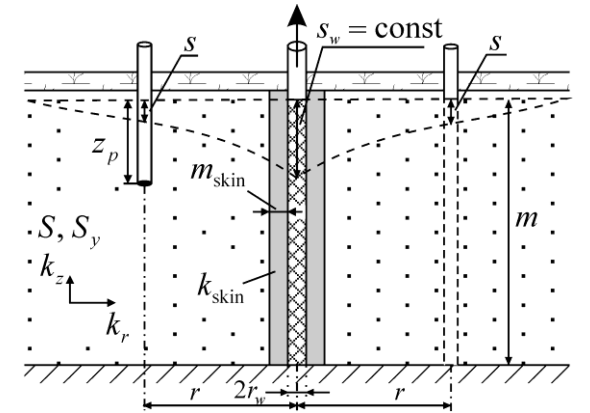


Напорный пласт

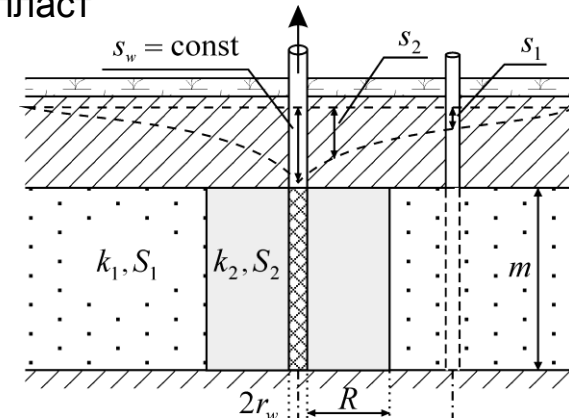
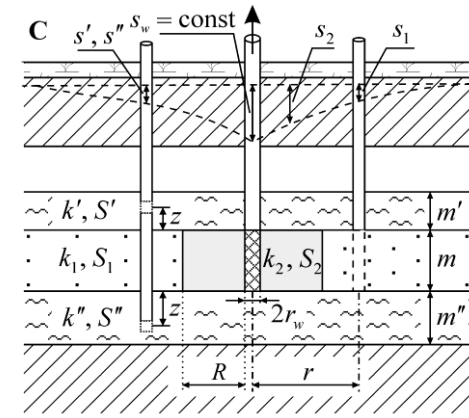
Водоносные комплексы



Безнапорный пласт



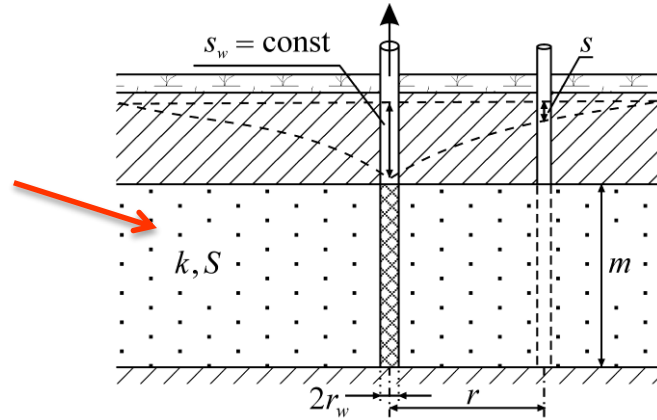
Радиально-неоднородный пласт



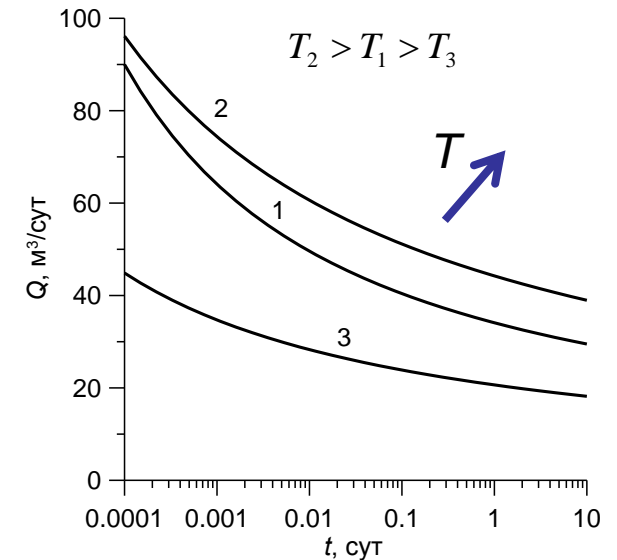
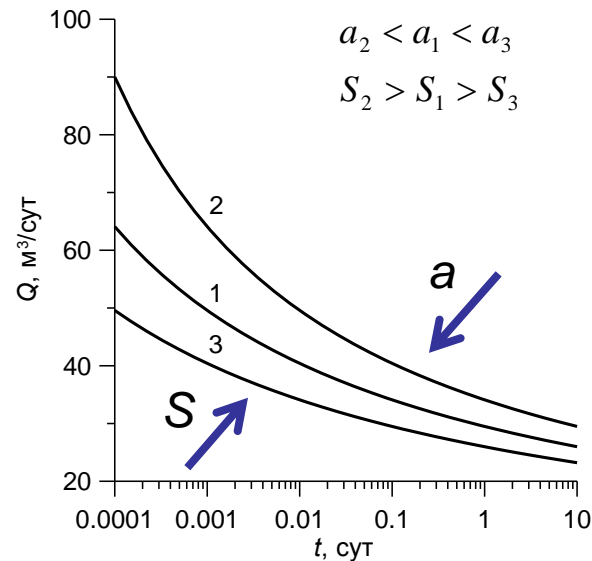
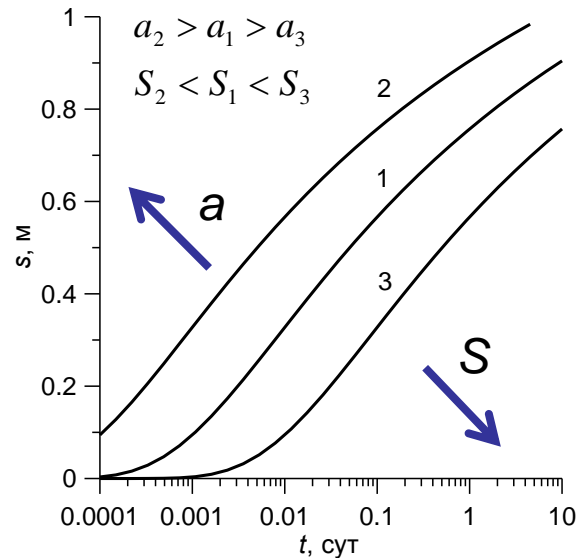
Откачка с постоянным понижением: анализ данных

В напорном пласте понижение s зависит только от пьезопроводности: $a = T / S$

Расход Q зависит от пьезопроводности и проводимости

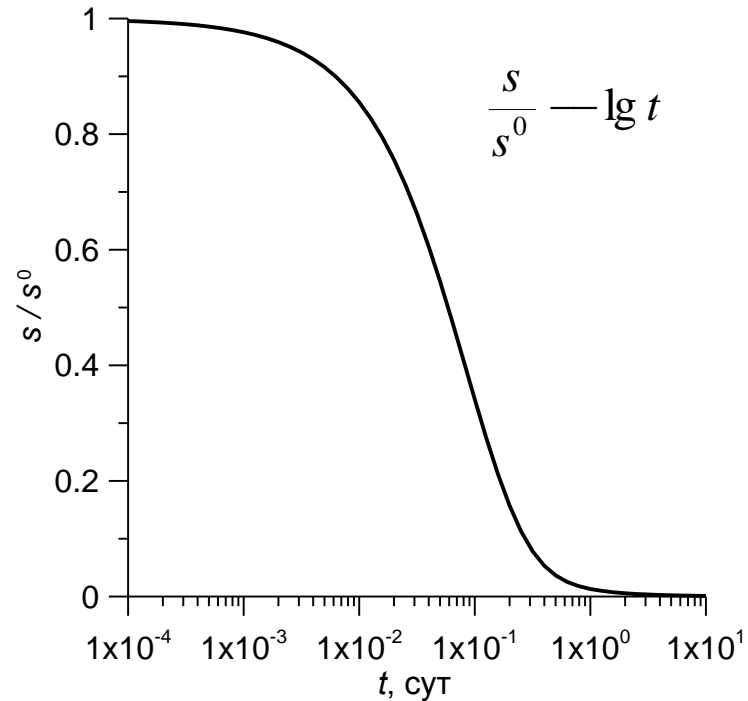
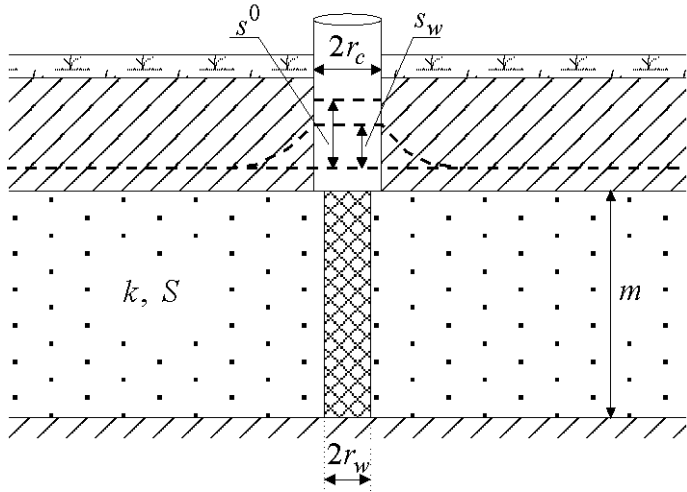


Параметры водоносных пластов определяются по изменению понижения в наблюдательных скважинах и изменению расхода в опытной скважине

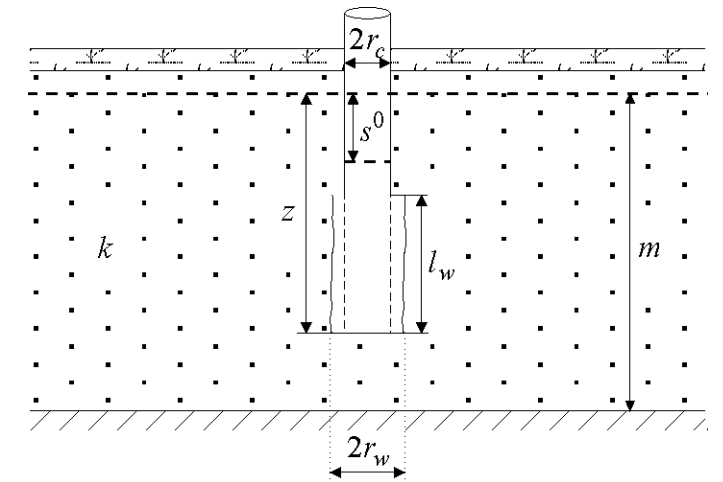


Экспресс-опробования

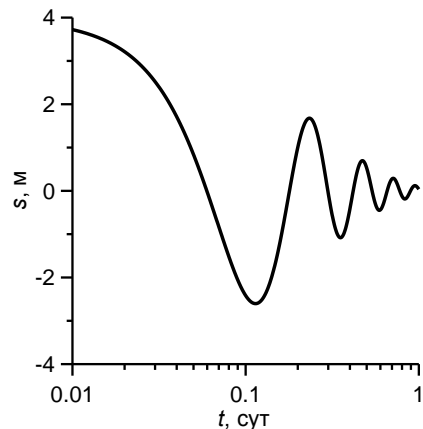
Напорный пласт: решение Купера



Безнапорный пласт: решение Бауэра—Райса

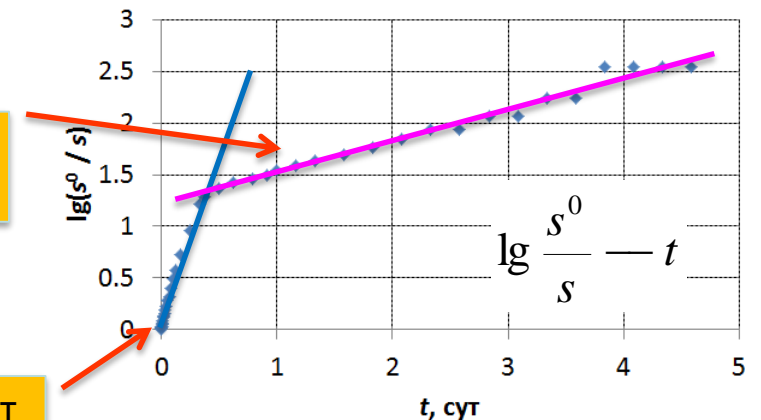


Реакция на возмущение в высокопроницаемых пластах



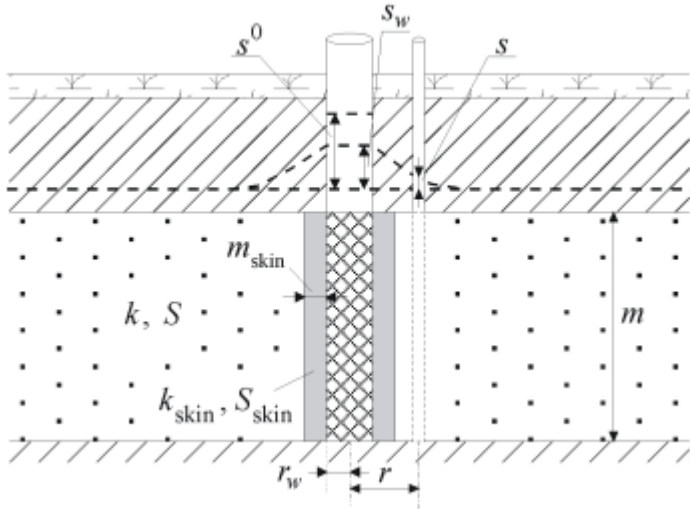
Как правило, два прямолинейных участка. **Обработка по второй прямой**

Прямая выходит из начала координат

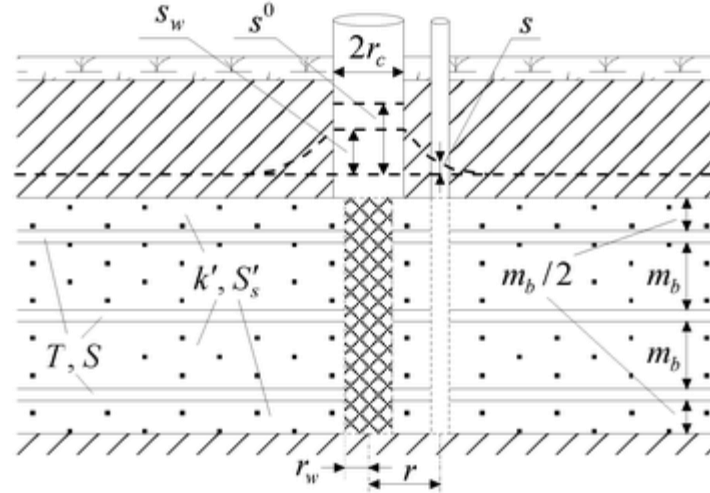


Экспресс-опробования (продолжение)

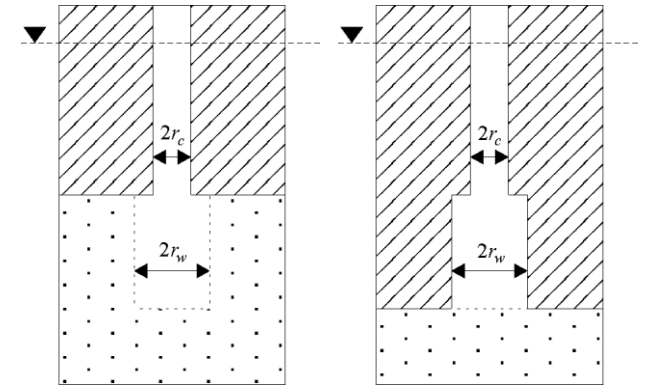
Скин-эффект



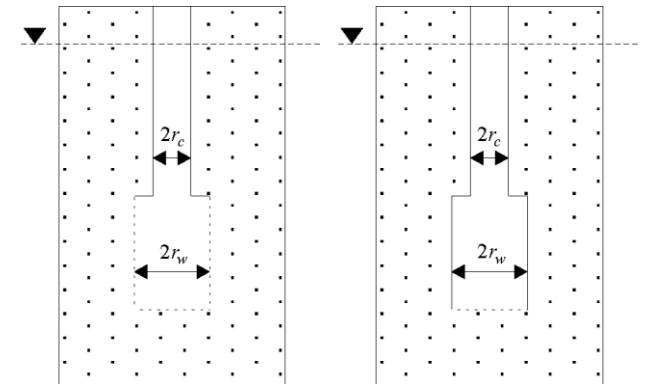
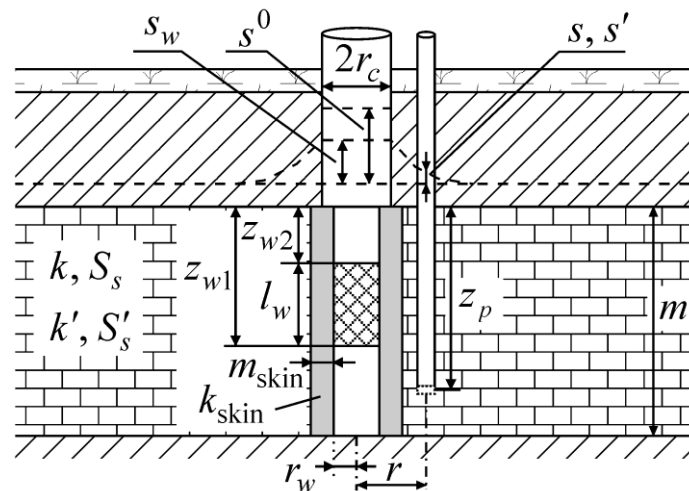
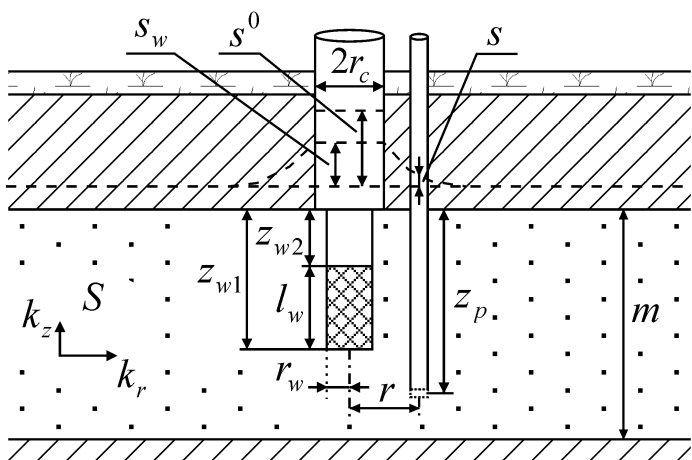
Трещиновато-пористые среды



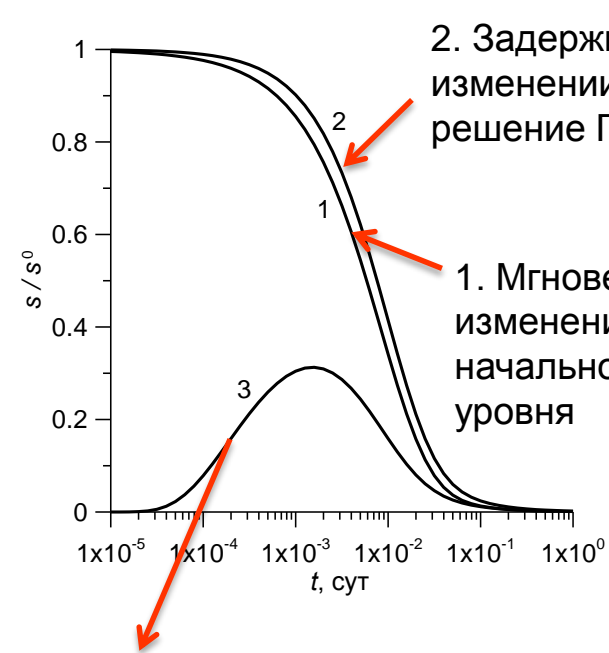
Решения Хворслева



Несовершенные по степени вскрытия скважины

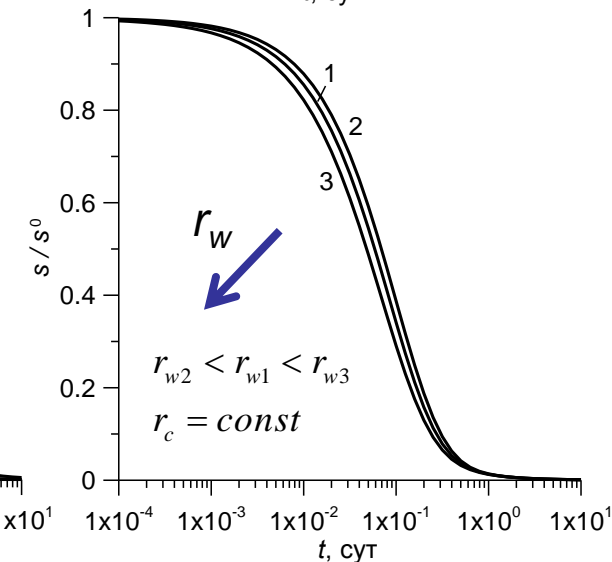
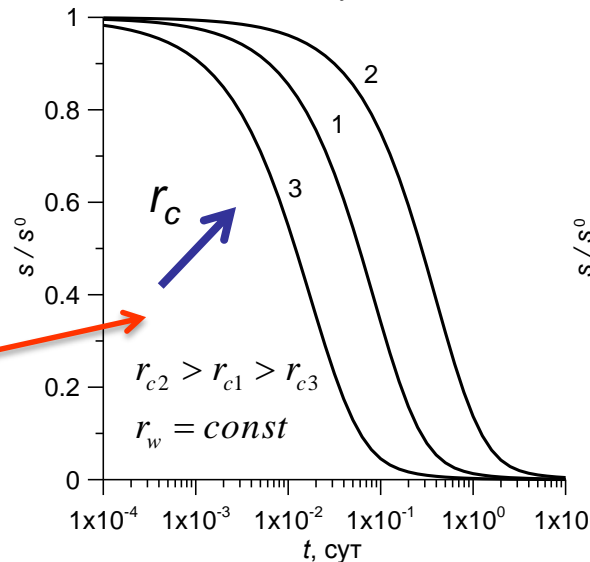
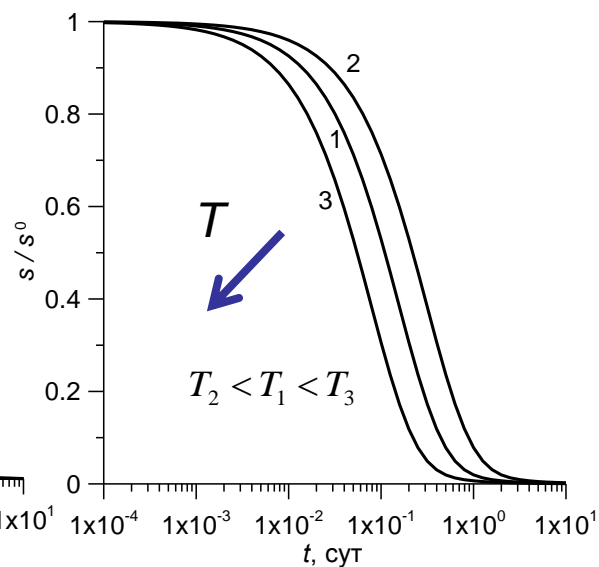
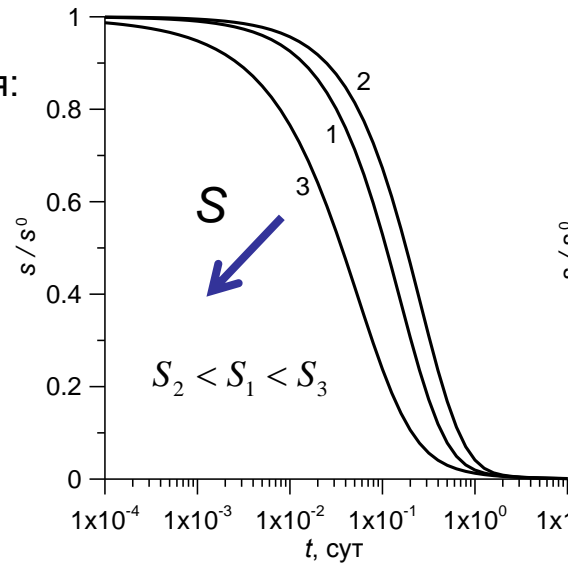


Экспресс-опробования: анализ данных



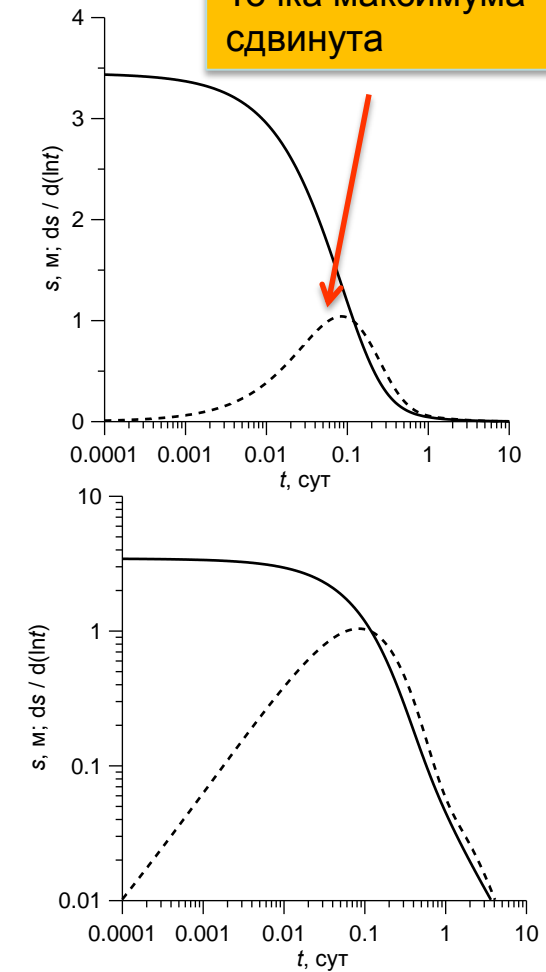
3. Наблюдательная скважина

Основное влияние оказывает радиус обсадной трубы



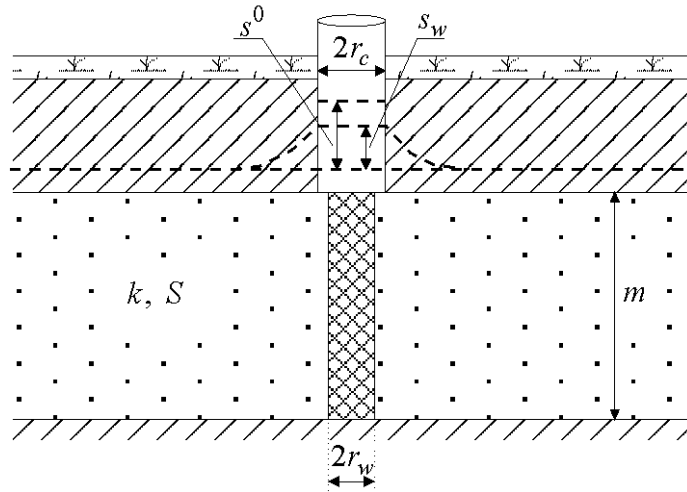
Деривативный анализ

Точка максимума сдвинута

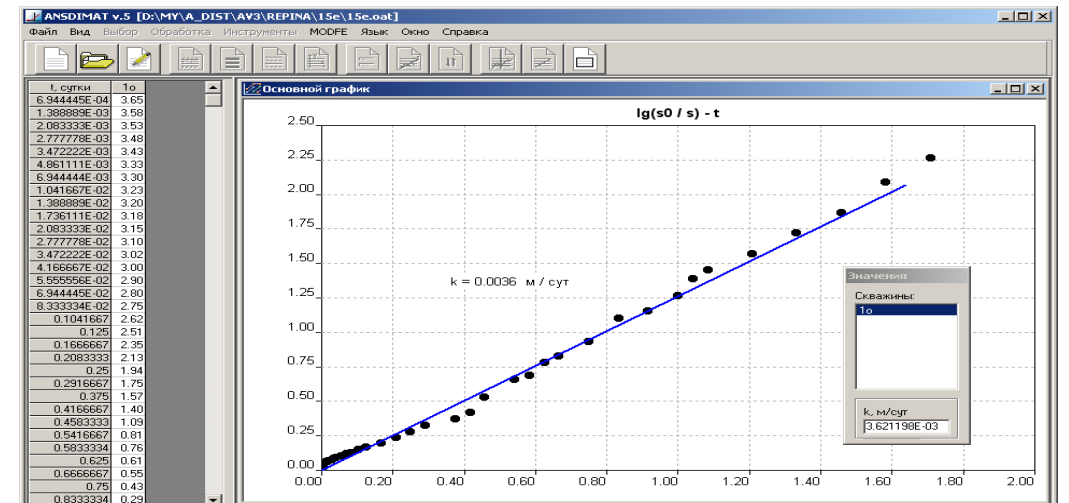
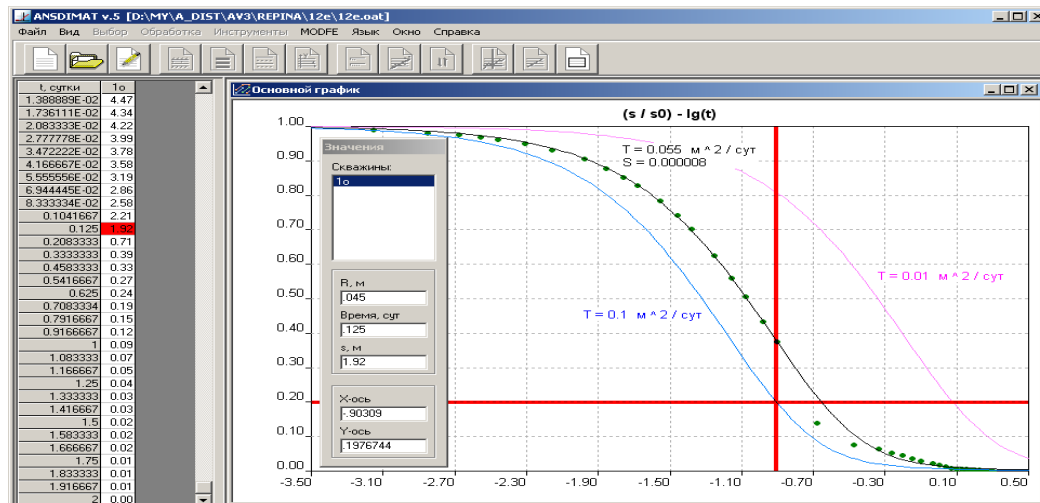
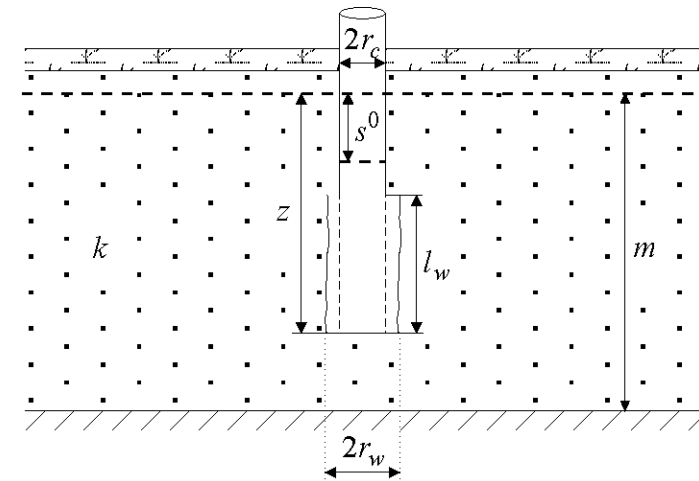


Экспресс-опробования: примеры

Решение Купера

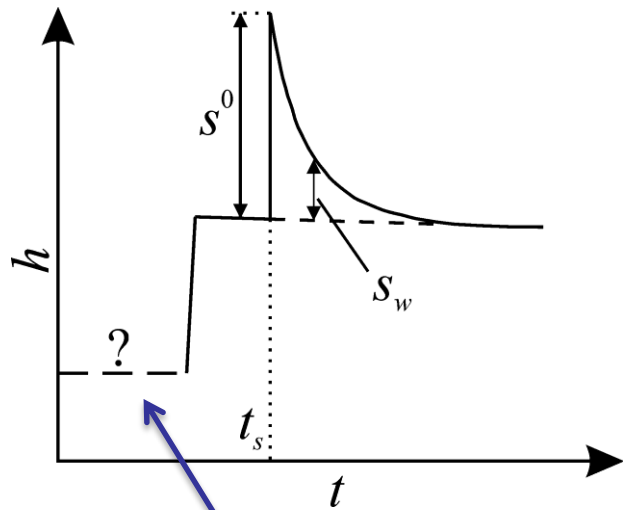


Решение Бауэра и Райса



Экспресс-опробование слабопроницаемых пластов

Метод Бредехфорта и Пападопулоса

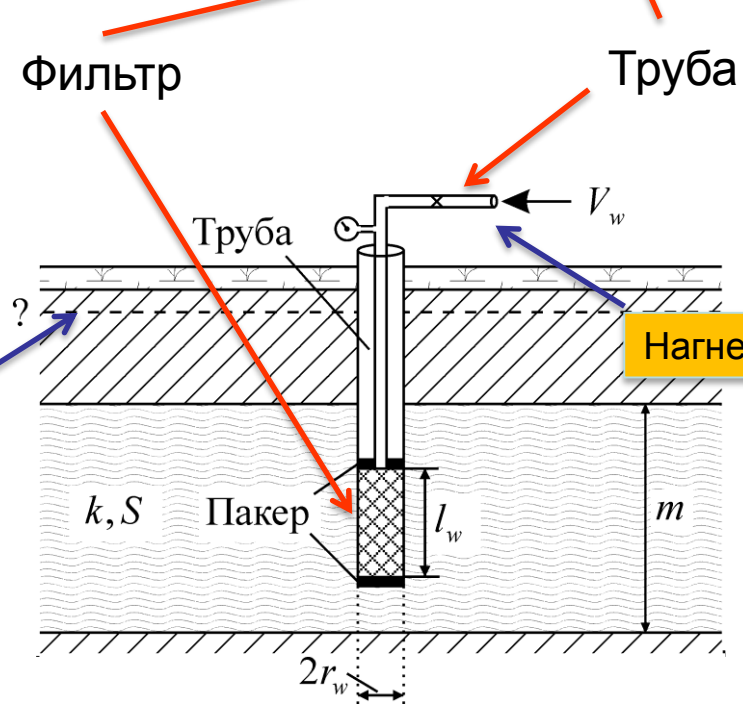


Начальный уровень может быть неизвестен

$k < 0.001$ м/сут

Эффективный радиус $r'_c = \sqrt{V_w \beta_w \rho_w g / \pi}$

$$V_w = \pi r_w^2 l_w + \pi r_t^2 l_t$$

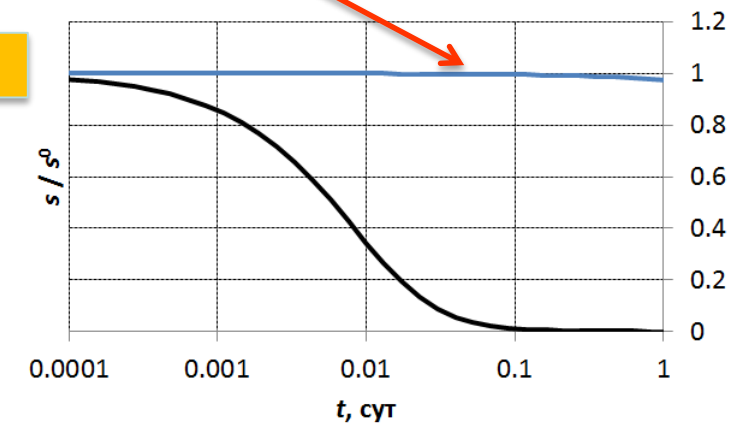


Без применения методики восстановления может длиться годами

Решение Купера

$$s_w = s^0 F_s \left(\frac{Tt}{r_c^2}, \frac{r_w^2}{r_c^2} S \right)$$

r'_c заменить

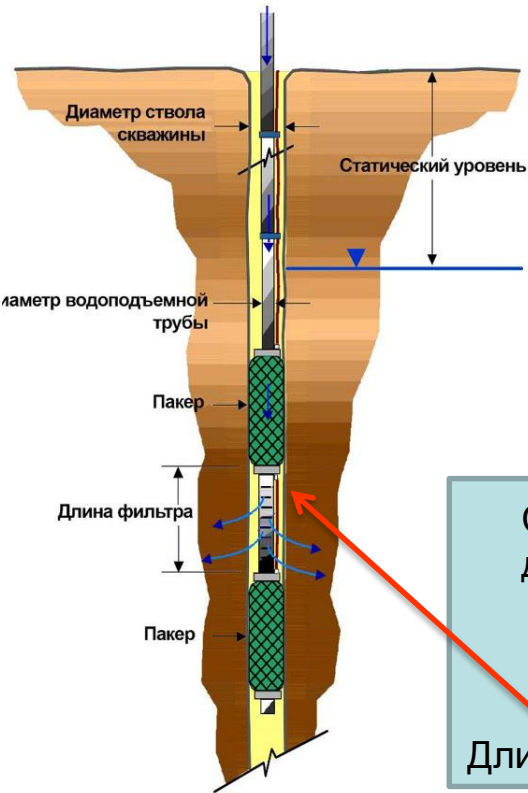


Пакерное опробование: метод Люжона

Метод Люжона – оценка водопоглощения слабопроницаемых трещиноватых пород

Люжон (Lu) – потеря воды в л / м на 1 м скважины под избыточным давлением 1 МПа

1. На скважине поддерживается (10 мин) постоянное давление P .
2. Каждую минуту измеряется расход воды Q , необходимый для поддержания давления.
3. Последовательно создается пять возмущений (по 10 мин): $0.5P_{\max}$, $0.75P_{\max}$, P_{\max} , $0.75P_{\max}$, $0.5P_{\max}$, (P_{\max} – выбирается исходя из расстояние от поверхности земли до середины фильтра).
4. Рассчитывается **Lu** для каждой ступени и дополнительно оценивается **коэффициент фильтрации**.



Средний расход для ступени, л/мин

$$Lu = \frac{Q}{l_w} \frac{P_0}{P}$$

$P_0 = 1 \text{ МПа}$
 Давление ступени, Па

Длина фильтра, м

Lu

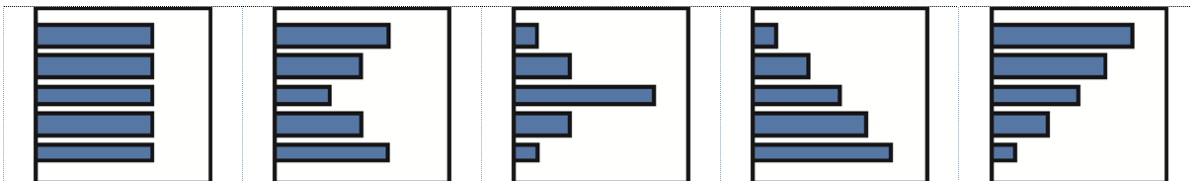
Решение Мойе: $k = \frac{Qg\rho}{2\pi l_w P} \left(1 + \ln \frac{l_w}{2r_w} \right)$

Решение Дююи (Тима): $k = \frac{Q}{2\pi l_w h} \ln \frac{R}{r_w}$

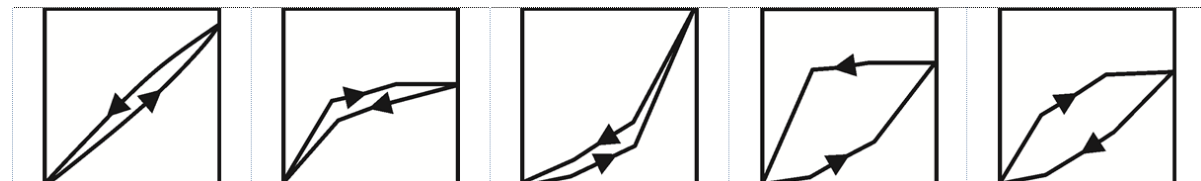
$Lu \approx 1.3 \cdot 10^{-7} \text{ м/сек} \approx 0.011 \text{ м/сут}$

График Q – P

Ламинарный Турбулентный Расширение Разрыв Заполнение



Ламинарный Турбулентный Расширение Разрыв Заполнение

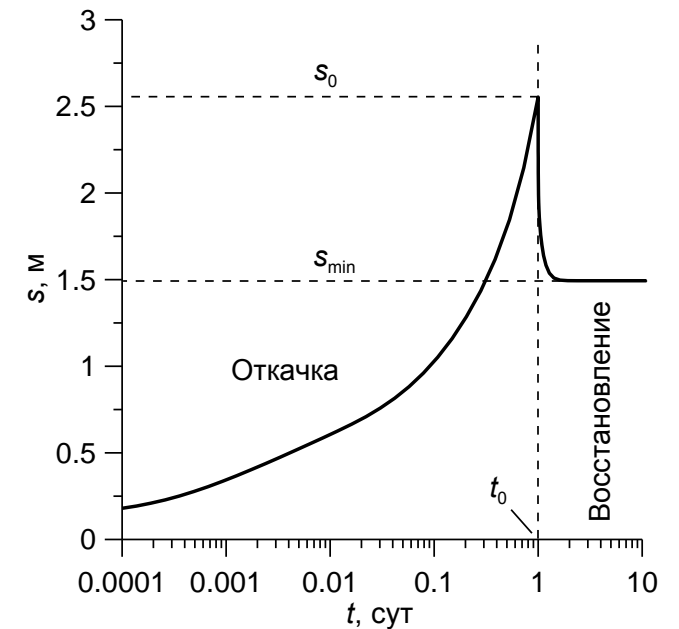


Метод Люжона: классификация

$$Lu = \frac{Q P_0}{l_w P}$$

Диапазон люжона	Классификация	Коэффициент фильтрации, м/сут	Трещиноватость	Точность определения
< 1	Очень низкая	< 0.01	Весьма слабо трещиноватые	< 1
1–5	Низкая	0.01 – 0.05	Слабо трещиноватые	0
5–15	Умеренная	0.05 – 0.2	Трещиноватые	1
15–50	Средняя	0.2 – 0.5	Весьма сильнотрещиноватые	5
50–100	Высокая	0.5 – 1.0	Сильнотрещиноватые	10
> 100	Очень высокая	> 1.0	Полости и каверны	> 100

Пример откачки в закрытом пласте



Определение параметров по величине невосстановления уровня

$$s_{\min} = \frac{Qa}{FT} t_0 = \frac{Q}{FS} t_0$$

Оценка эффективности скважины

Кратковременные откачки с последовательно увеличивающимся расходом (>3–4 ступеней)

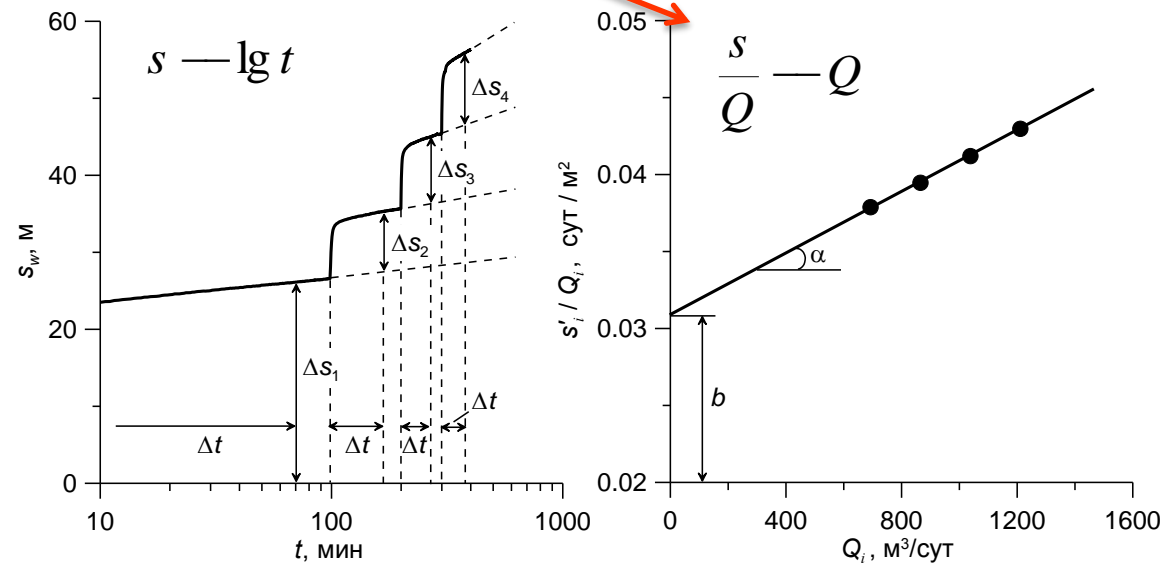
Задача: определение оптимального расхода откачки

Понижение в опытной скважине:

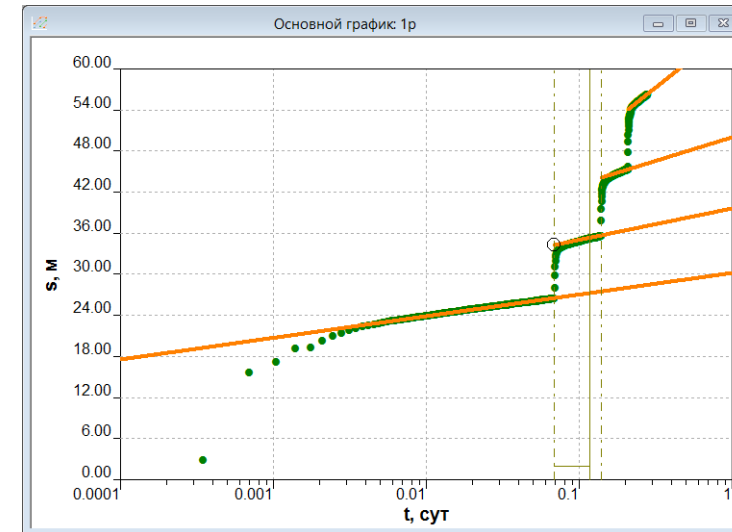
$$s = bQ + cQ^2$$

Эффективность:

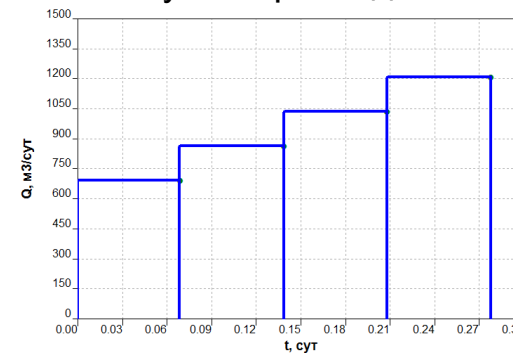
$$E = \frac{bQ}{bQ + cQ^2} \cdot 100 \quad E \approx 70\%$$



2. График временного прослеживания:



1. Ступени расхода:



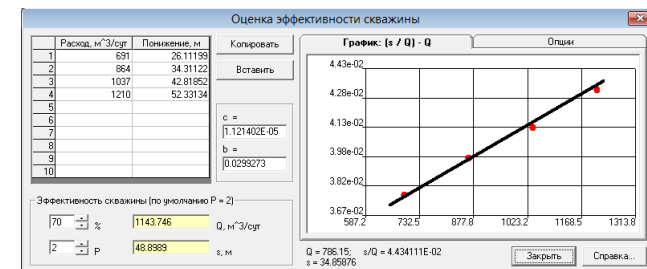
3. Определение понижений:

Данные для оценки эффективности скважины

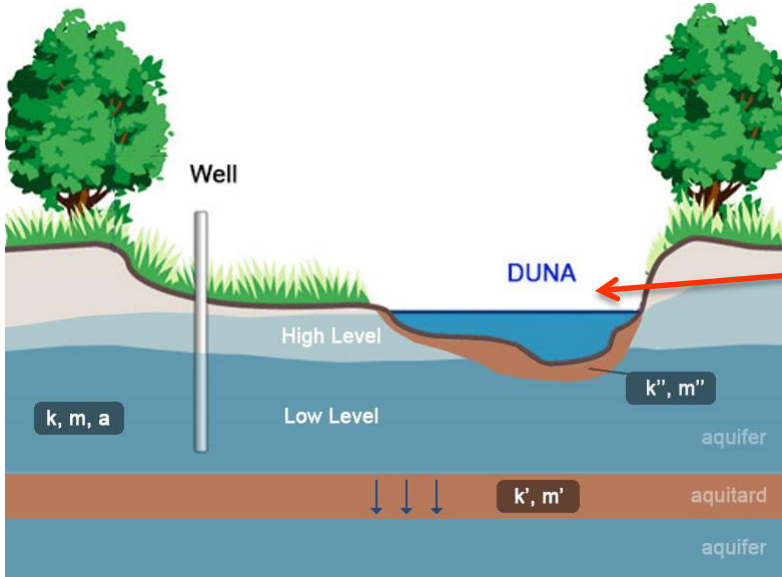
Ступени		Опции				
№	t, мин	Q, м³/сут	s (д), м	s (н), м	s', м	
1	98.49999	891	26.1156	27.31192	26.1156	26.1156
2	199.5	864	35.33976	36.23978	8.02794	34.14344
3	299.5	1037	45.07351	46.16661	8.83473	42.97817
4	400	1210	55.74021	57.57561	9.5736	52.55177

Эффективность скважины... 70 %

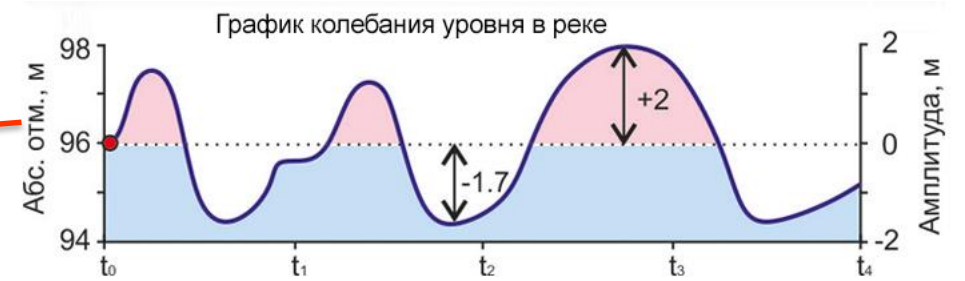
4. Обработка:



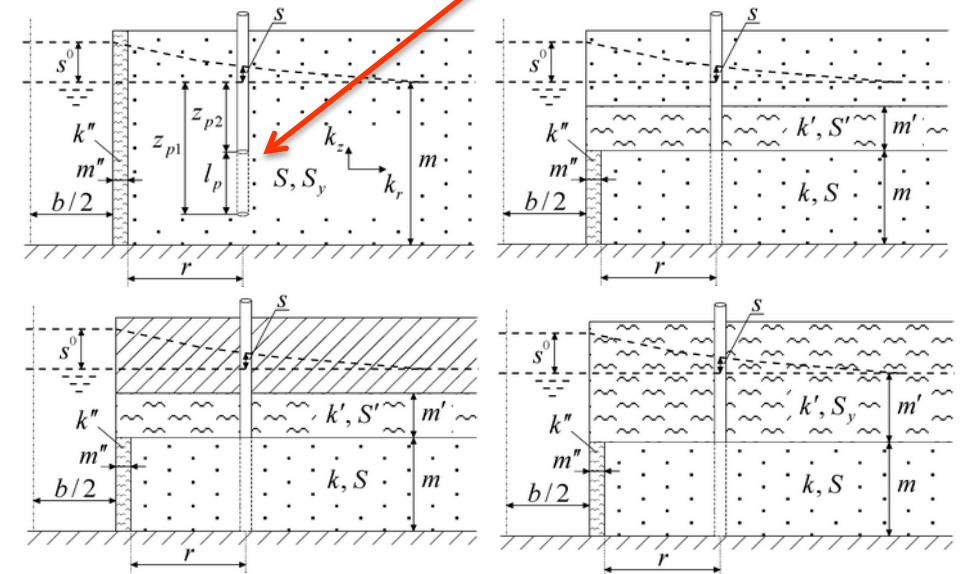
Мониторинг подземных вод



Оценка фильтрационных параметров по данным естественных колебаний подземных вод

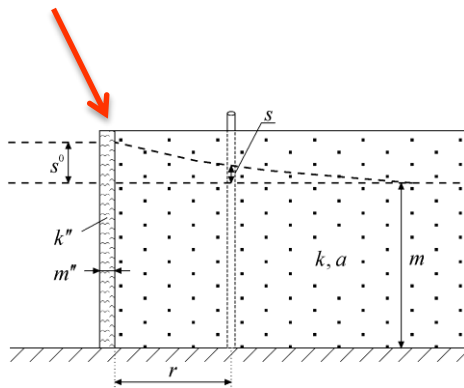
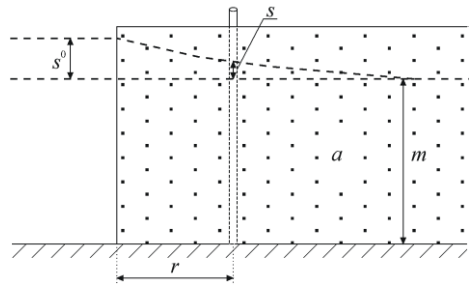


Несовершенная скважина

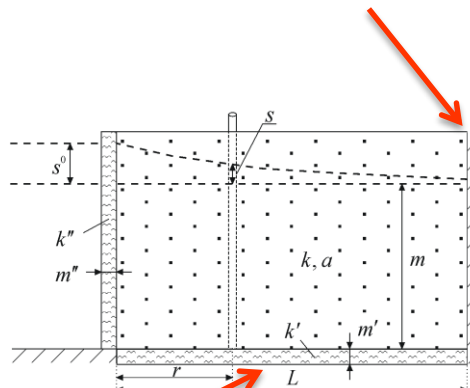


Сопротивление русла реки

$$s = s^0 \operatorname{erfc} \frac{r}{2\sqrt{at}}$$



Непроницаемая граница



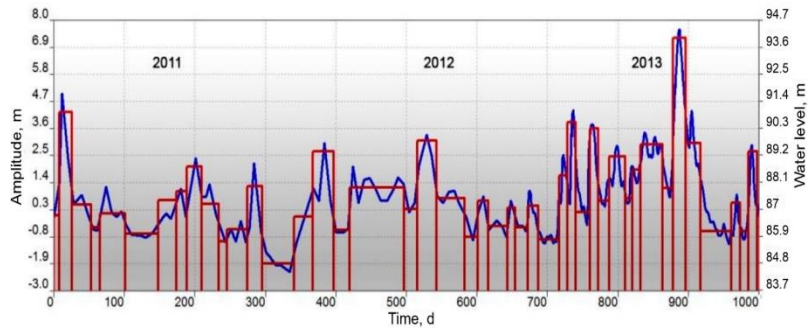
Перетекание

Мониторинг подземных вод: пример

1. Расчетная формула:

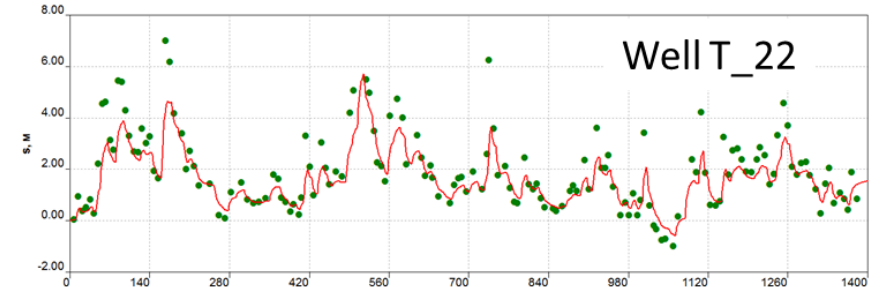
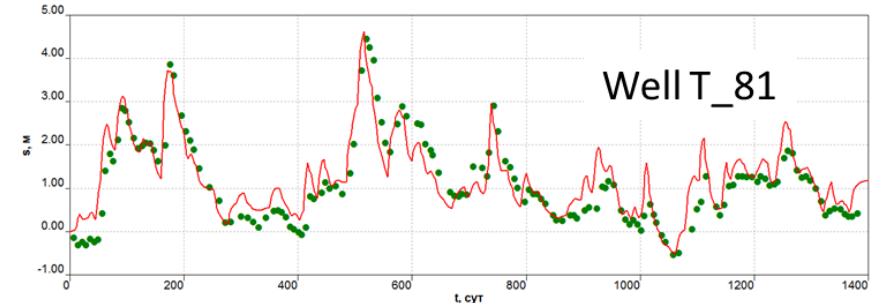
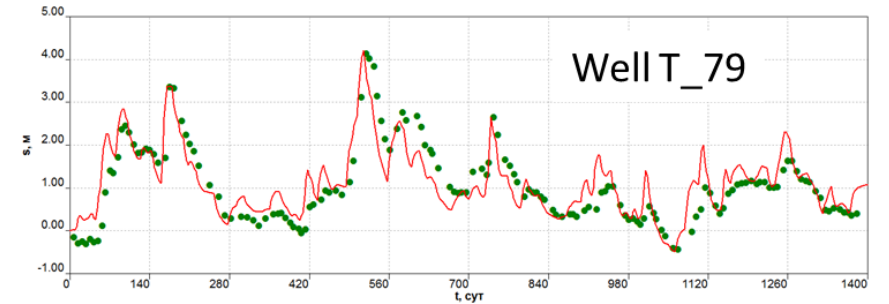
$$s = s^0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left[\frac{\exp(-r/B)}{1 + \Delta L/B} \operatorname{erfc} \frac{r - 2at/B}{2\sqrt{at}} + \frac{\exp(r/B)}{1 - \Delta L/B} \operatorname{erfc} \frac{r + 2at/B}{2\sqrt{at}} \right] - \\ - \frac{\exp[r/\Delta L + (1 - \Delta L^2/B^2)at/\Delta L^2]}{1 - \Delta L^2/B^2} \operatorname{erfc} \frac{r + 2at/\Delta L}{2\sqrt{at}} \end{array} \right\}$$

2. Заменяем колебания уровня ступенчатой функцией:



4. Получаем параметры: $a, \Delta L, B$

3. Строим расчетную кривую:



Моделирование ОФО

- **Трехмерное численное моделирование**
 - MODFLOW, FEFLOW...
- **Численное моделирование осесимметричных задач**
 - RADFLOW, MODFE...
- **Моделирование методом аналитических элементов**
 - GFLOW, ANAQSIM, MODAEM
- **Моделирование слоистых систем**
 - MLU
- **Аналитическое моделирование**
 - AMWELLS

ANSDIMAT (RADFLOW)

1. Задание разреза и положения фильтра опытной скважины:

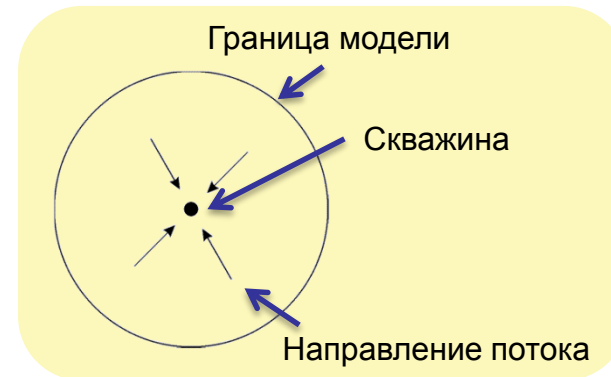
Create a new model based on the cross-section

№	Название породы	Глубина, м	Мощность, м	Кол-во слоев	kr, м/сут	kz, м/сут	Ss, 1/м	Sy, -	Цвет
1	Среднезернистый песок	14	14	14	4	4	0.0005	0.2	Yellow
2	Гравий	26.45	12.45	12	70	70	0.01	0.2	Blue
3	Среднезернистый песок	30	3.55	2	4	4	0.0005	0.2	Yellow
4	Супесь	31.5	1.5	1	0.1	0.01	0.0001	0.2	Grey
5	Среднезернистый песок	41.5	10	5	4	4	0.0005	0.2	Yellow
6	Гравий	44	2.5	3	70	70	0.01	0.2	Blue
7	Среднезернистый песок	45.6	1.6	2	4	4	0.0005	0.2	Yellow
8	Супесь	50	4.4	5	0.1	0.01	0.0001	0.2	Grey

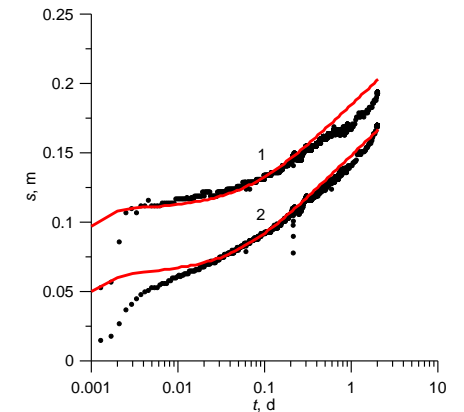
number of well screen intervals: 2

Интервал № 1		Интервал № 2	
От	До	От	До
19	24	42	46.3

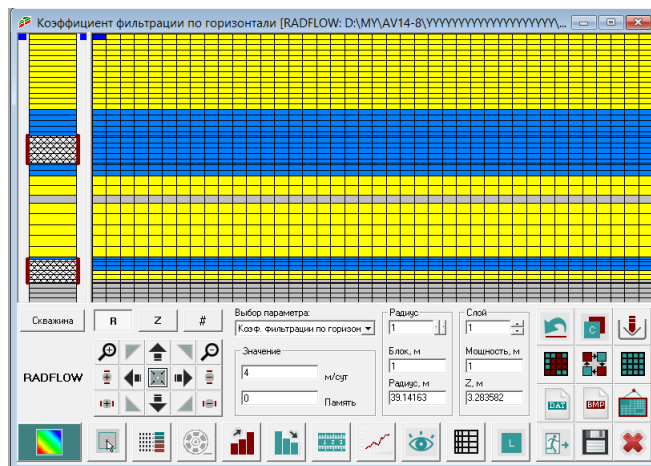
Моделирование задач фильтрации в осесимметричной постановке



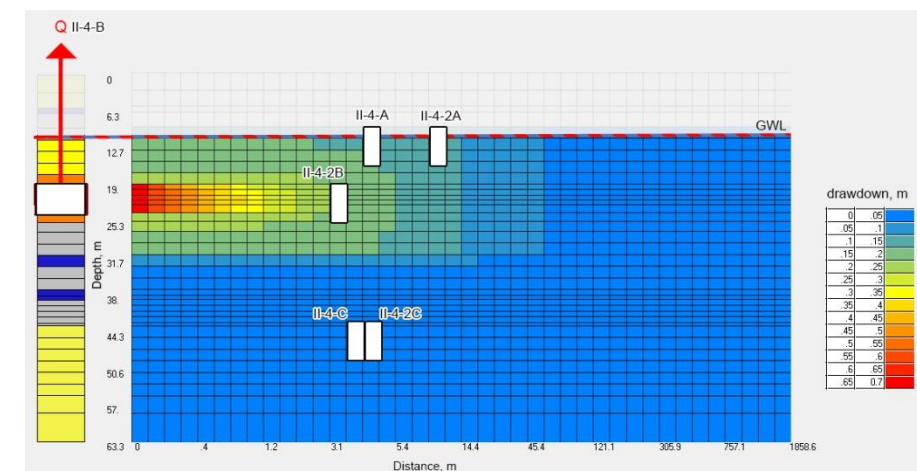
3. Просмотр результатов моделирования:



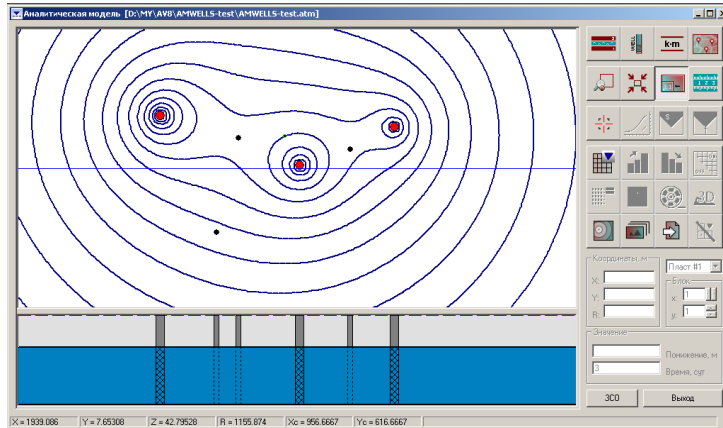
2. Создание модели:



Проектирование и обработка
ОФО, проведенных в сложных
гидрогеологических условиях

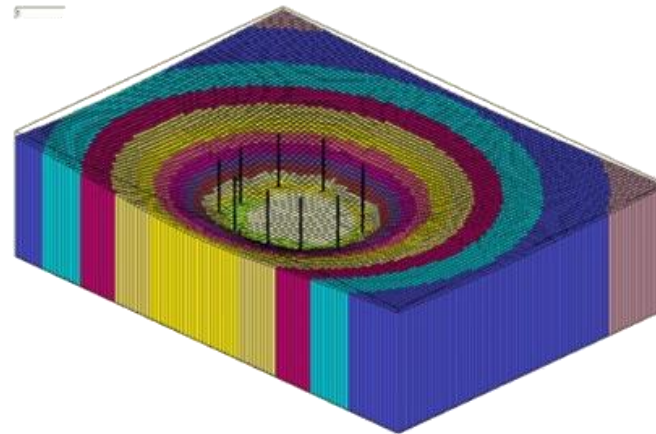
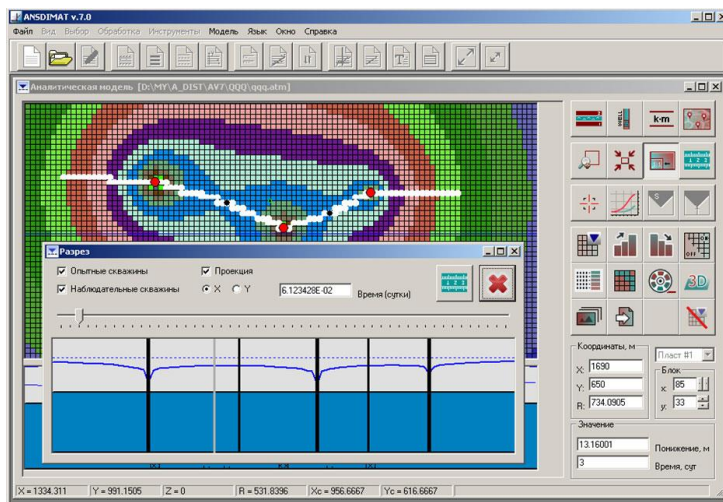


Аналитическое моделирование (AMWELLS)



Создание аналитической модели:

1. Выбор расчетной схемы
2. Задание фильтрационных параметров и мощностей водоносных пластов
3. Размещение опытных скважин и задание их производительности



Достоинства аналитической модели:

1. Точность расчета
2. Корректное моделирование потоков в неограниченных областях
3. Отсутствие сеточной и временной дефрагментации

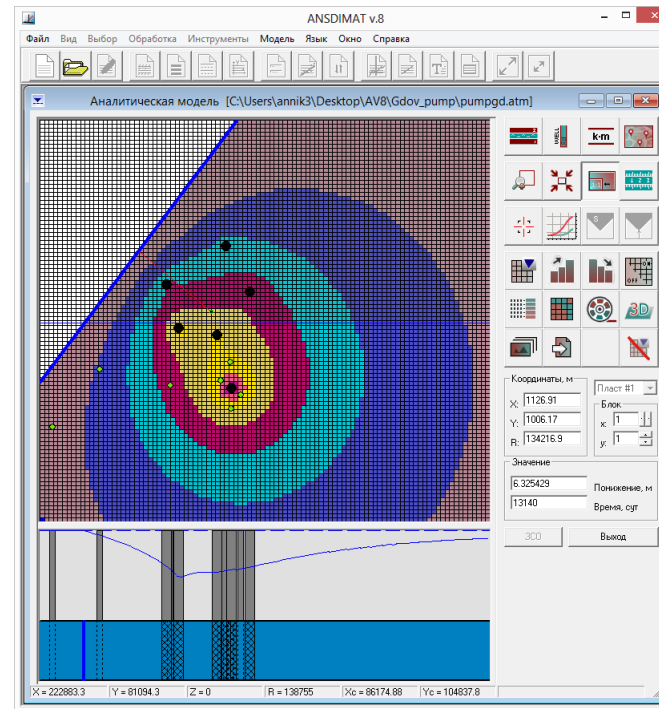
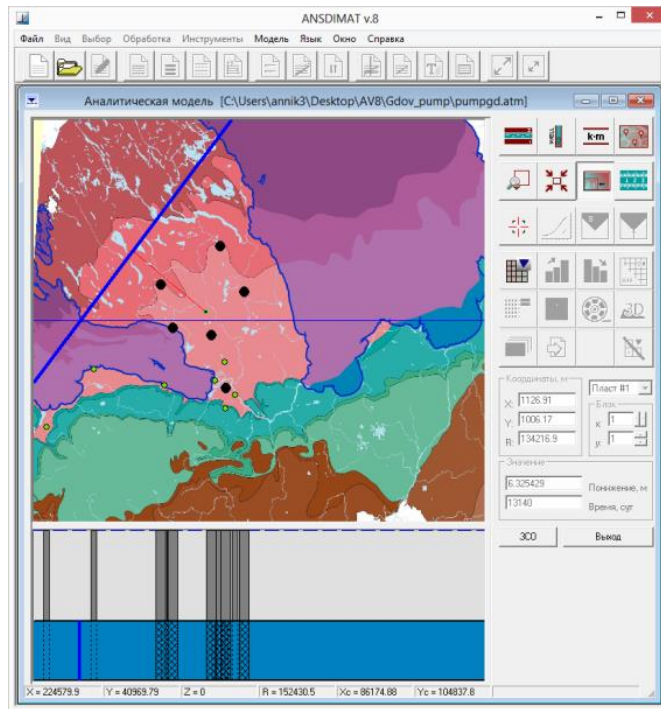
Недостатки аналитической модели:

1. Ограниченность типовых схем
2. Невозможность задания сложных границ

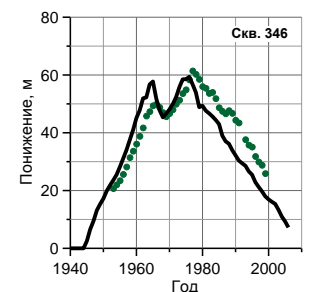
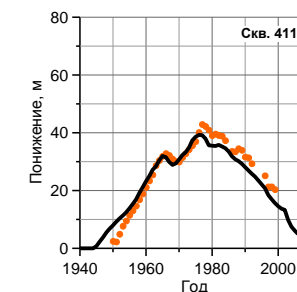
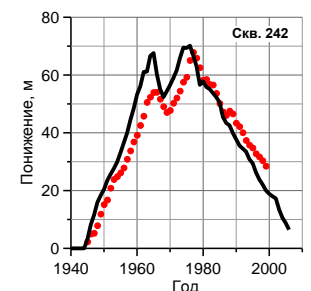
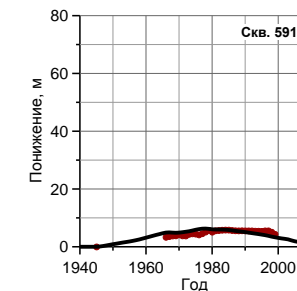
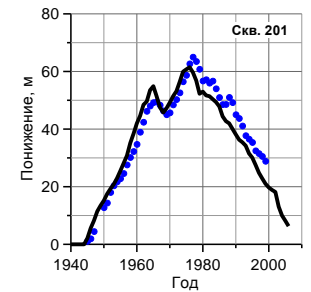
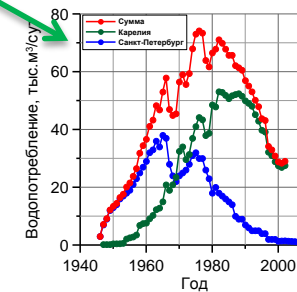
Аналитическое моделирование: пример

График изменения водопотребления

Длительный водоотбор: Ленинград–Санкт-Петербург, 1946–2006



Сравнение фактических и модельных данных



Пример решения задачи на программе ANSDIMAT (AMWELLS)