

# Задачи гидрогеологических исследований в составе инженерных изысканий

- ЗАДАЧИ
- ПАРАМЕТРЫ
- МЕТОДЫ
- ПРИЛОЖЕНИЕ

# Задачи г/г изысканий (инженерной гидрогеологии)

- Исследование условий залегания подземных вод – карта, разрез...
- Изучение гидродинамики потока – карта гидроизогипс...
- Оценка влияния строительства на подземные воды – моделирование
- Прогноз физико-геологических явлений – осадка, оползни...
- Проектирование – защита, техническое решение, экологическая оценка

# Позиции решения задач

- **Топография, гидрография, ситуация, история**
- **Гидрогеодинамические характеристики – карта гидроизогипс, питание, проводимость, баланс**
- **Гидрогеологическое строение**
- **Инженерная концепция**
- **Методология решения –экспертная оценка, моделирование**
- **Средства - программа, графика**

# Источники слабой изученности, ошибочного решения

## Изыскания:

- экономия,
- нежелание длительных ОФИ,
- запрет разведки вне объекта,
- подмена качества количеством...

## В итоге:

- уровни воды, параметры проводимости
  - низкая достоверность,
- перетекание, питание, водоотдача, сопротивление ложа рек
  - ОТСУТСТВУЮТ

# Причины низкого качества изысканий

## Квалификация:

- образование                    (нет среднего специального)
- опыт                                (вернее – плохой опыт)
- преемственность

## Норматив, а не наука

## Организация:

- изыскания и прогноз не связаны,
- отсутствуют 2-х стадийные гидрогеологические исследования в проектировании

# ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ И НАЛИВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ. РЕАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ.

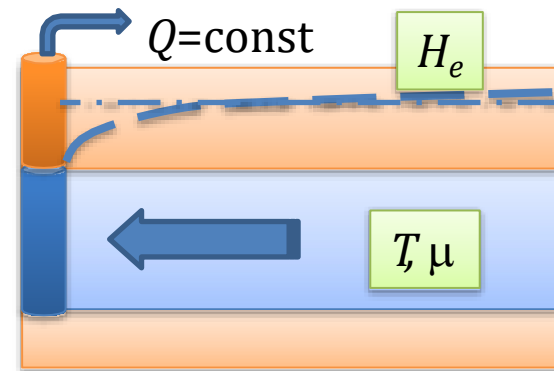
Аппарат аналитических методов основан на решении уравнения плановой фильтрации

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - \frac{1}{B^2} H + e = \frac{1}{a^*} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad a^* = \frac{T}{\mu^*}$$

Результат ОФР - параметры пласта:

- ВОДОПРОВОДИМОСТЬ ---  $T \neq km$       $T = \int k dz$
- УПРУГАЯ ЕМКОСТЬ ---  $\mu^* \neq \eta^* m$       $\mu^* = \int \eta^* dz$
- ГРАВИТАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ ---  $\mu$

# Основы расчетов совершенных скважин



• Фундаментальная нестационарная задача

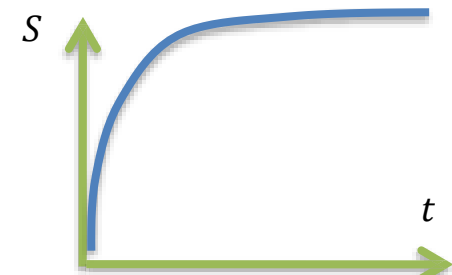
– откачка в изолированном пласте

при  $Q = \text{const}$  [Ч.Тейс, 1935]

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$S = H_e - H = \frac{Q}{4\pi T} W(u),$$

$$u = \frac{r^2}{4at}, \quad a = \frac{T}{\mu}$$

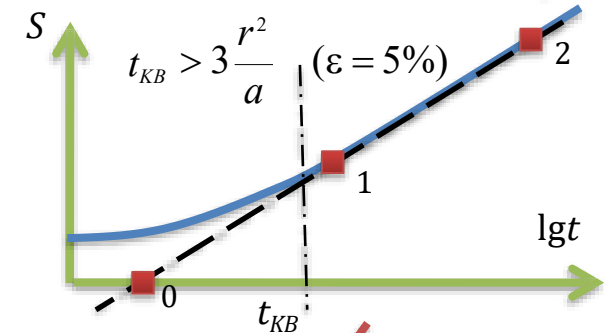


• Квазистационарный период

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2},$$

$$T = \frac{Q}{4\pi(S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1},$$

$$a = \frac{r^2}{2,25 t_{S=0}}$$



Напорный поток - опытная скважина  $t_{KB} \ll 1$  мин,

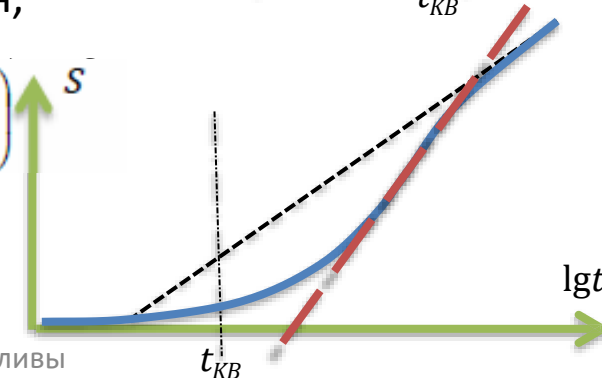
наблюдательная  $t_{KB} = 3 - 15$  мин

$$Q_c = Q \exp\left(-\frac{r_c^2}{4at}\right)$$

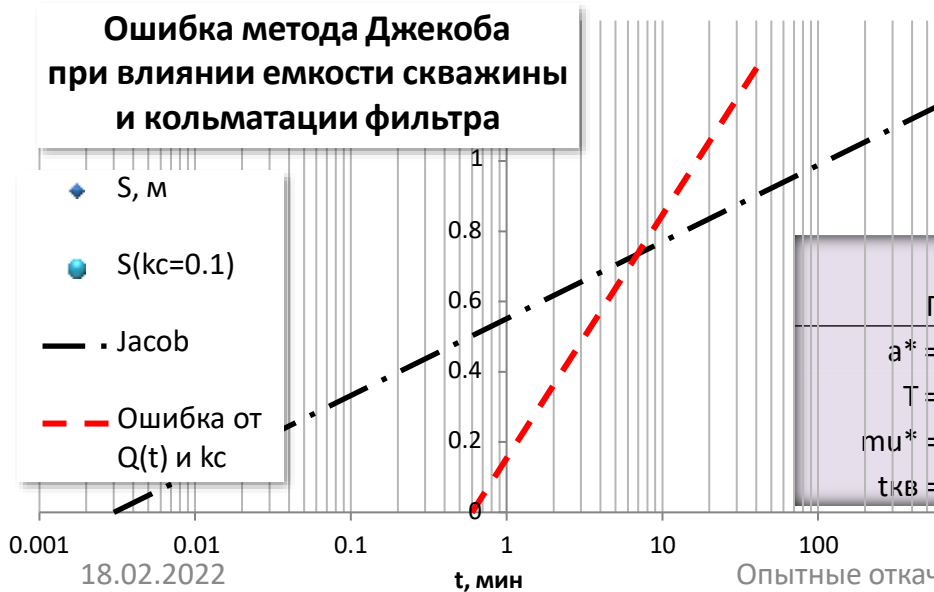
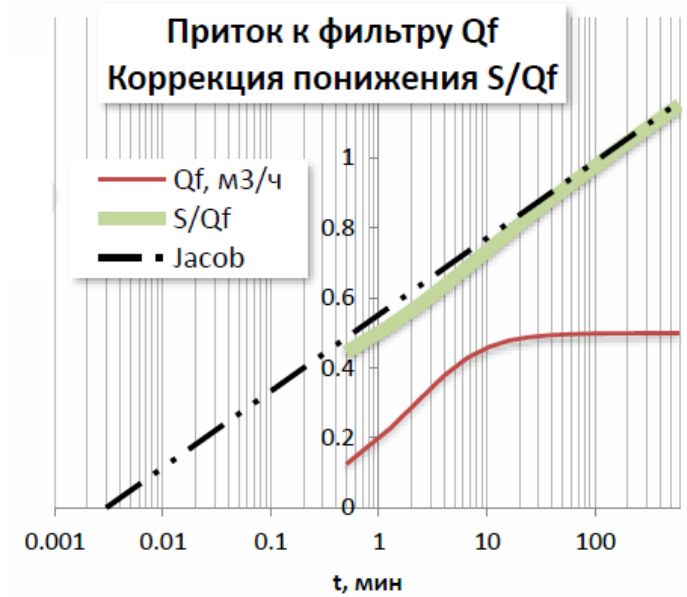
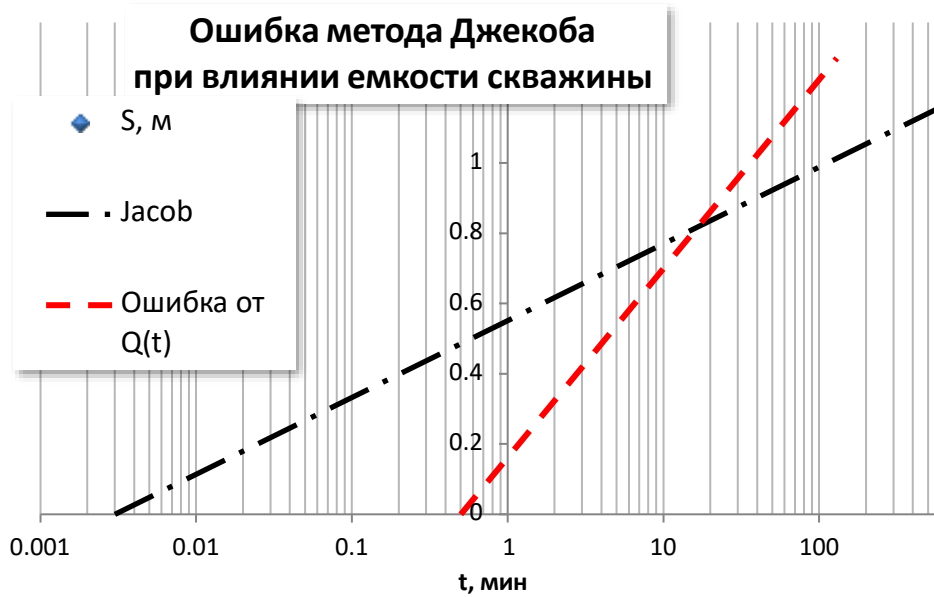
Безнапорный поток -  $t_{KB} > 14 \div 1$  сут

• Влияние емкости ствола

$$Q_c \cong Q, \quad t_c > \frac{\pi r_c^2 S_c}{Q \varepsilon}$$



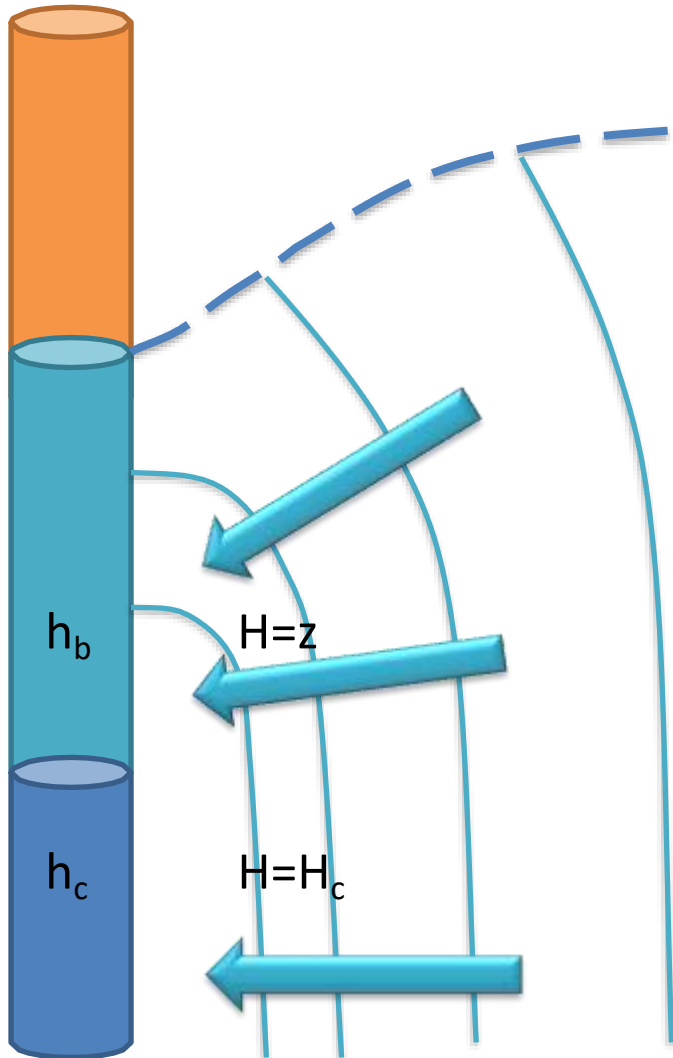
# Влияние емкости и кольматации скважины в опытах малой длительности



	Правильно	Ошибка от Q(t)	Ошибка от Q(t) и kc
a*	1905	11	10 м2/сут
T	10.0	4.1	3.2 м2/сут
mu*	0.0053	0.36	0.33
tкв	0.02	3.4	4.1 мин



# Высачивание на стенке фильтра



- Причина – пространственный характер потока вблизи контура, не работает предпосылка Дюпюи

- Следствие – неправильный расчет динамического уровня при заданном расходе, ошибка в проекте дренажа, выборе насоса.

$$\frac{h_c + h_b}{H} = \frac{\ln \frac{H}{\pi r_c}}{\ln \frac{R}{r_c}} \quad - \text{И.А. Чарный}$$

$$h_c + h_b = \sqrt{\left( \frac{1}{\pi} \ln \frac{\sqrt{Q/k}}{r_c} - 0,5 \right) \frac{Q}{k} + h_c^2}$$

– В.М. Шестаков

# Восстановление. Графические методы

- Интерпретация с помощью графика  $S - \log(t/t_0)$

Метод сложения течений – изменение дебита ступенью  $Q \Rightarrow -Q$

Условия:

1. квазистационарность – важно для наблюдательных
2. сработка емкости – для опытных скважин
3. Некорректный статический уровень до откачки – график пересекает ось  $S \neq 0$   $t = 0$

- Расчет с помощью графика  $S - 1/t$

Восстановление после кратковременной откачки  $t \gg t_0$

Используется в Экспресс-откачках и наливах

Минусы - в расчетный период  $S \rightarrow 0$ , нечувствителен к  $T$

**!! Применять**

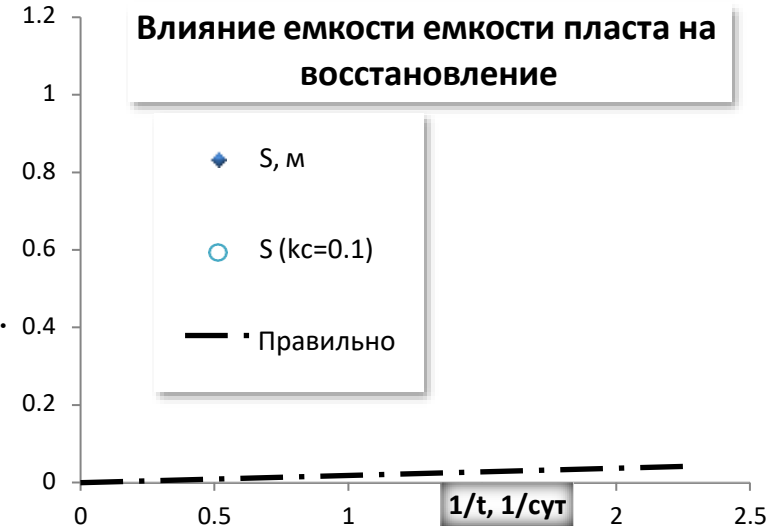
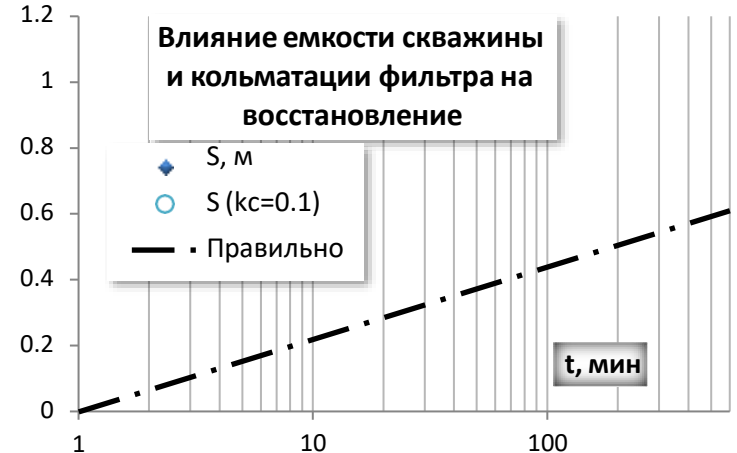
**НЕ рекомендуется !!**

$$\ln \frac{t}{t-t_0} = \ln \frac{t_0 + t_B}{t_B} = \frac{t_0}{t_B} - 0,5 \left( \frac{t_0}{t_B} \right)^2 + \dots$$

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \frac{t_0}{t_B}, \quad T = \frac{Q}{4\pi S} \ln \frac{t}{t-t_0}$$

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2} - \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25a(t-t_0)}{r^2}$$

$$T = \frac{Q}{4\pi S} \ln \frac{t}{t-t_0}$$



# Изменение дебита Q(t)

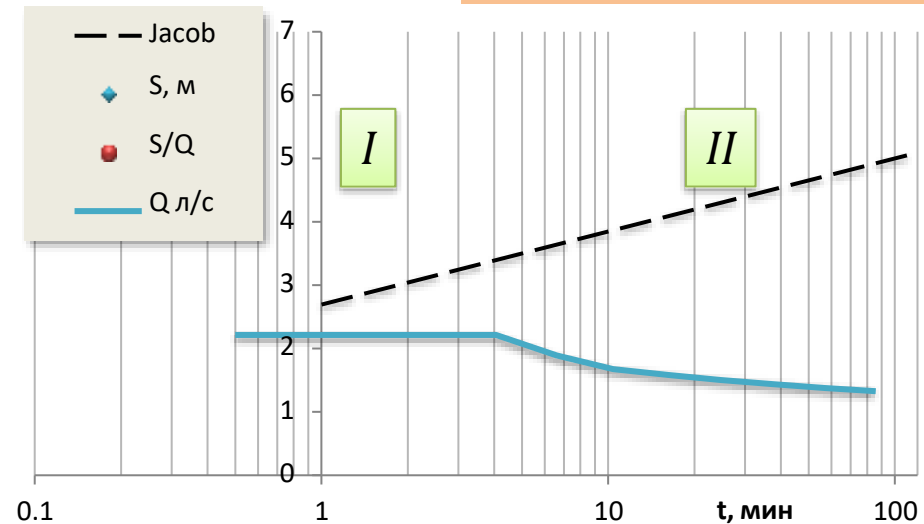
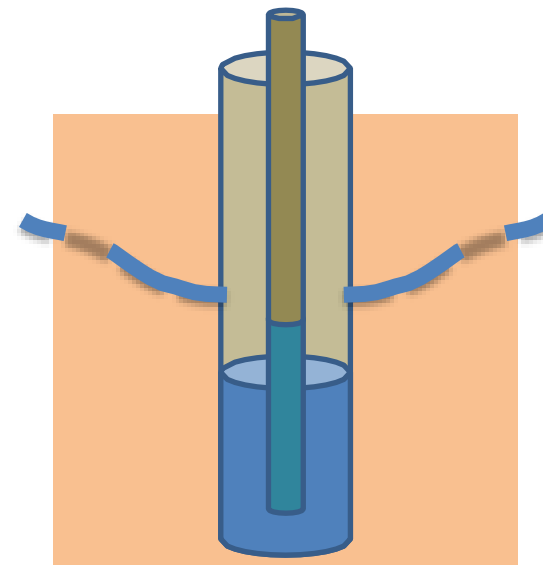
1. Влияние емкости ствола (см. выше)
2. Нагнетания с заданным давлением
3. Неравномерная работа насоса по техническим причинам
4. Смена режима заданного дебита фиксированным напором
  - осушение насоса (работа на «храп»)
  - излив на устье скважины при наливе

Приближенное решение  $t > 10 \frac{r^2}{a} > 3 \cdot t_{KB}$

$$\frac{S}{Q} = \frac{1}{4\pi T} W(u) = \frac{1}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2}$$

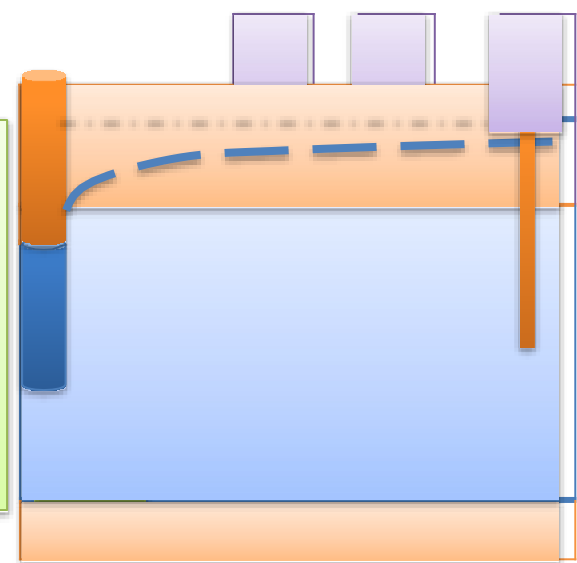
Применимы все методы с заменой S на S/Q

- Пример искажения всего периода откачки при видимой характерной форме графика:  
2-часовая откачка с осушением насоса  $T=15 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $\mu^*=0,005$ ,  $d \text{ 189 мм}$
- I. Наклонный участок графика искажен емкостью ствола
- II. Стабилизация S – осушение насоса  $Q$  – падает



# Несовершенные скважины

- Аналитическая модель – скважина с дополнительным сопротивлением – поправкой на несовершенство  $\zeta$
- Аналитический расчет  $\zeta$  возможен для однородного пласта
- Расчет поправки  $\zeta$  - программная процедура DZETA [Лехов, 2002]



• Расчет  $T$  по графику временного прослеживания  $S$

[Шестаков, Лехов, 1975]

$$S = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + \zeta(r, z, t)] \quad \zeta(t) \rightarrow \zeta_{\text{const}}$$

$$t > \frac{m^2}{2a}, \quad S = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln \frac{2,25at}{r^2} + \zeta(r, z) \right]$$

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^{*2}}, \quad r = r \cdot \exp(-\zeta/2)$$

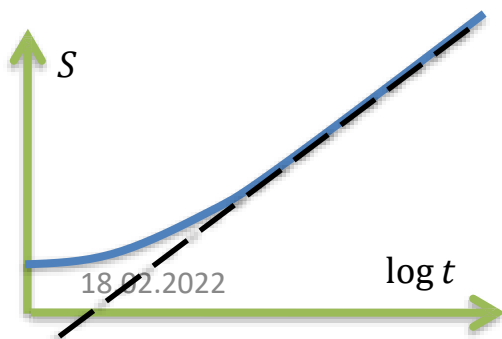
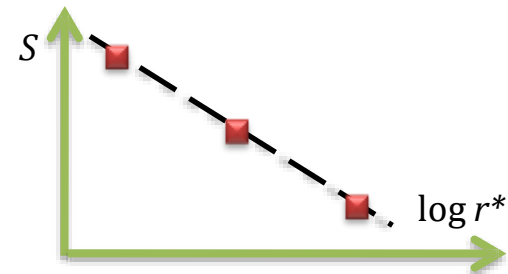
$$T = \frac{Q}{4\pi(S_1 - S_2)} \ln \frac{r_2^*}{r_1^*}$$

- **Метод Джекоба – расчет по графику временного прослеживания  $S$**

$$T = \frac{Q}{4\pi(S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1}, \quad a = \frac{r^{*2}}{2,25 t_{S=0}}$$

Опытные откачки и наливы

- В аналитических расчетах на значение проводимости пласта оказывает влияние вертикальная неоднородность и анизотропия
- **Прямой расчет ПРОНИЦАЕМОСТИ  $k$  НЕВОЗМОЖЕН**
- Интерпретация несовершенных скважин в реальных условиях (неоднородность, свободная поверхность...) - **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ** программа **1WELL** [Лехов, 2002]



# Перетекание через разделяющий слой

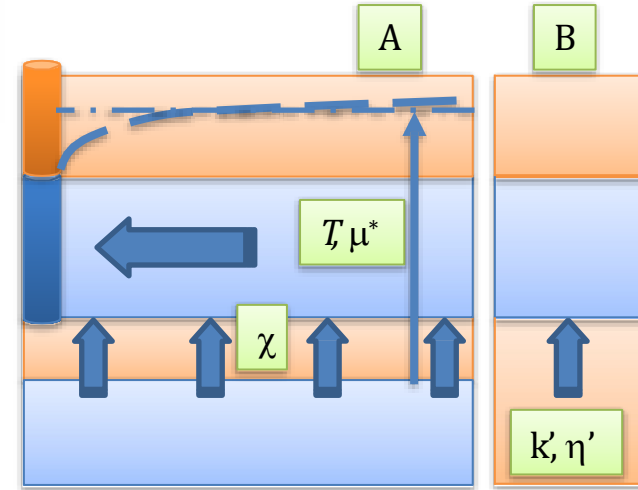
$$S = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(u, \frac{r}{B}\right) + \zeta \right]$$

## A. Жесткий водообмен с соседним пластом

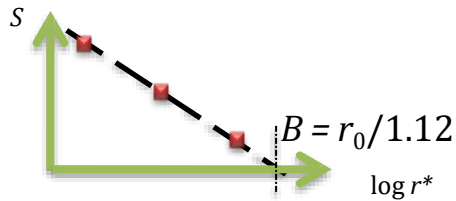
$$B = \sqrt{\frac{T}{\chi}}$$

$$\chi = \frac{k_0}{m_0}$$

- Напор в соседнем пласте  $H_B = H_e$
- Квазистационарный упругий период - применимы методы для изолированного пласта: по графикам  $S - \log t$  и  $S - \log r$
- Период стабилизации («стационарный»)



$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.12B}{r^*}$$

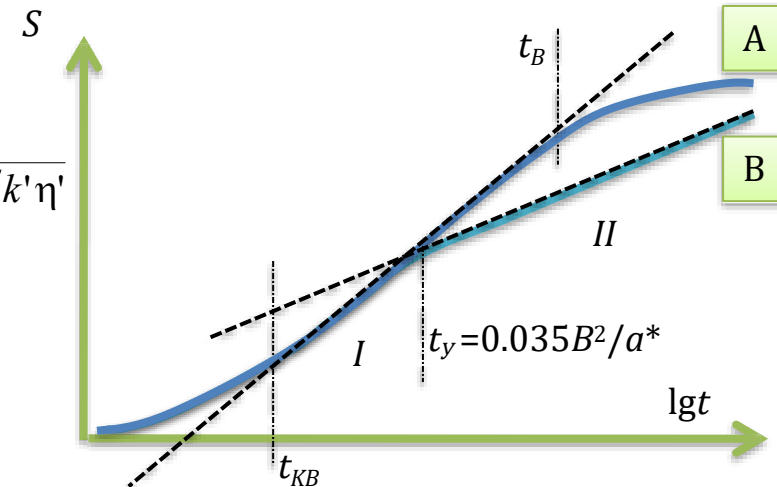


## B. Упругий водообмен с подстилающей толщей

$$B = 4\sqrt{T\mu^*/k'\eta'}$$

$$t > 10^4 \frac{0.044B^2}{ur^2}, \quad W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \frac{1}{2} \ln \frac{0.176a^*tB^2}{r^4}$$

- применим расчет по графику  $S - \log t$
- уклон прямой II в 2 раза больше прямой I

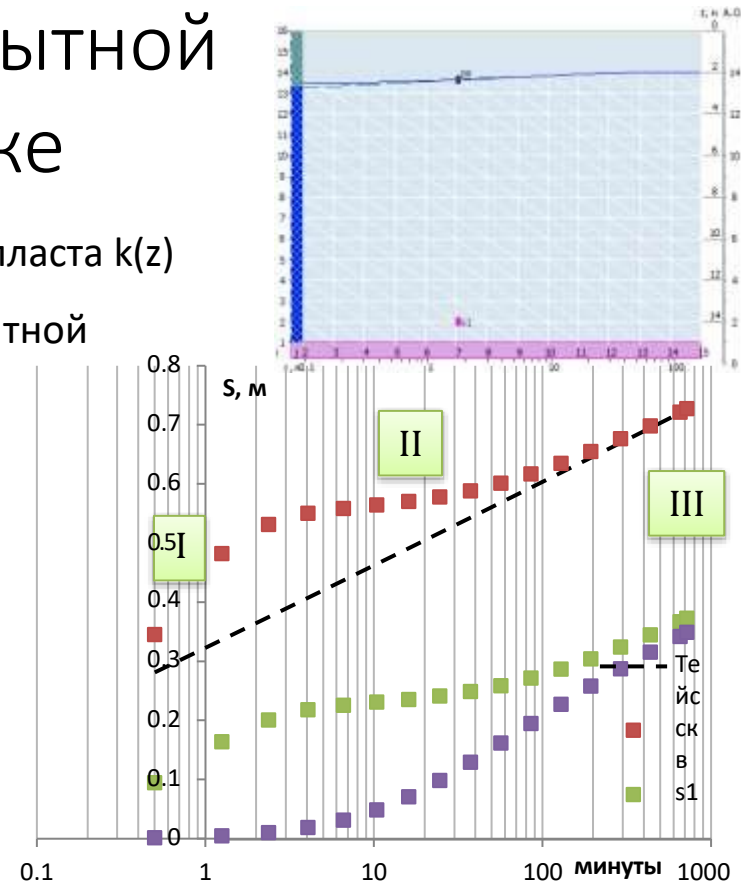


# Гравитационный режим для опытной скважины в безнапорном потоке

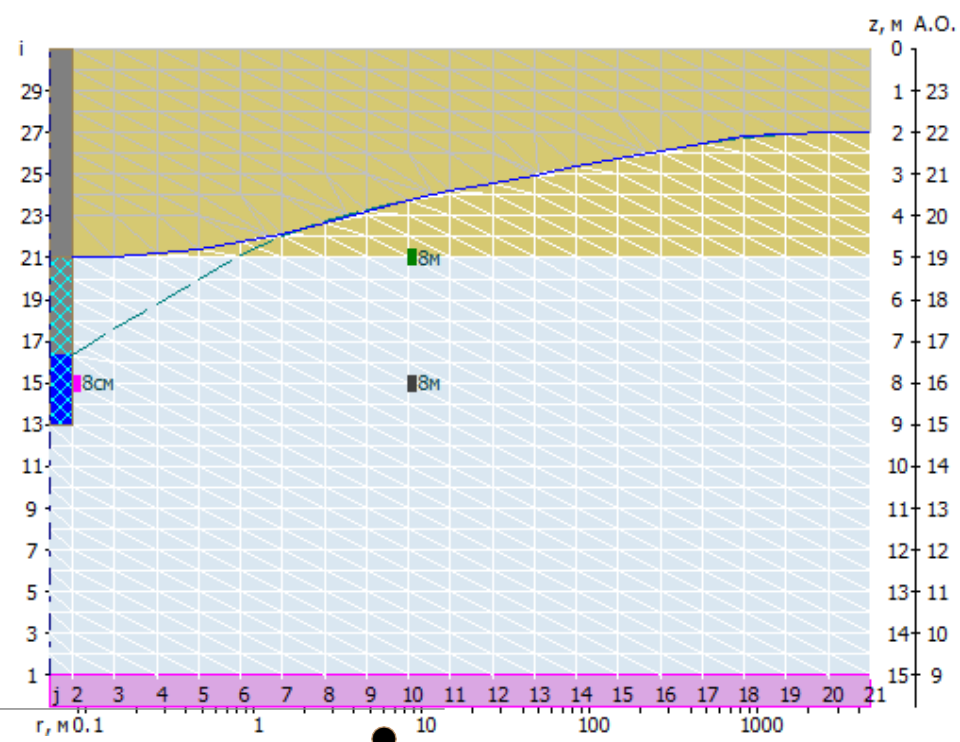
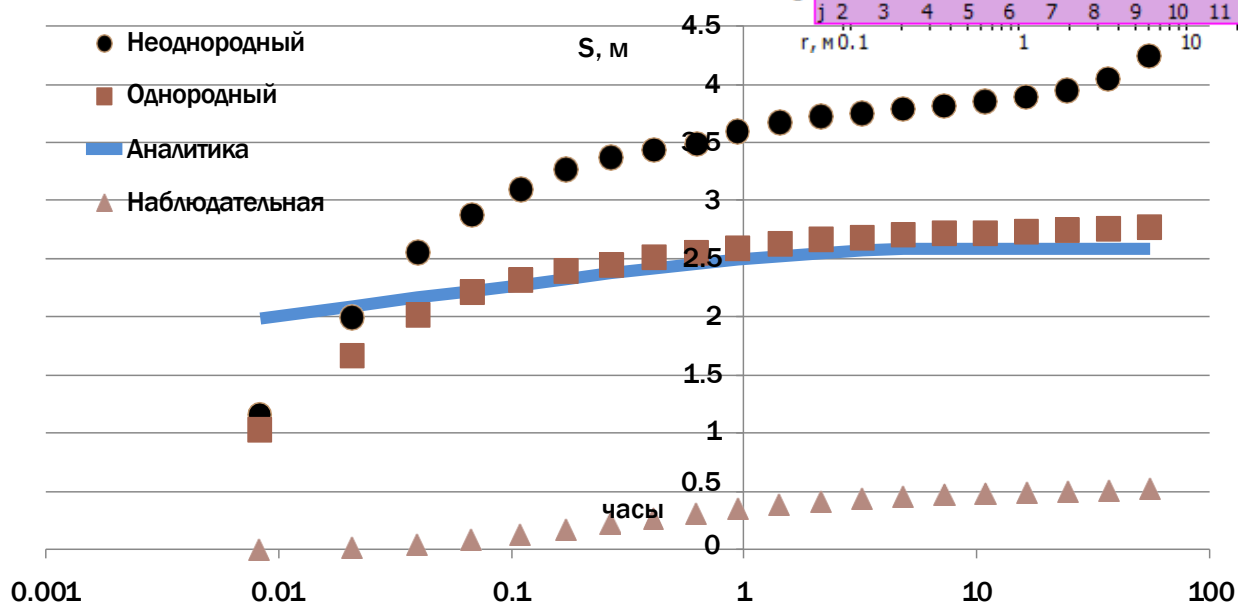
Переход  $S \rightarrow S(1 - S/2h_e)$  справедлив только для однородного пласта  $k(z) = \text{const}$  на горизонтальном водоупоре. Для расчетов по опытной скважине – совершенной. Т. е. ПРИМЕНИМ крайне РЕДКО

- I. Упругий период I краткий и искажен
- II. Ложностационарный период II в одиночной скважине не обрабатывается
- III. Гравитационный период -- метод Джекоба

$$T = \frac{Q}{4\pi(S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1}, \quad a = \frac{r^2}{2,25 t_{S=0}}$$



# Влияние неизвестной неоднородности на реакцию скважины



# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ



# Опытно-фильтрационные работы по скважинам в инженерных изысканиях

- ❖ Планирование откачек и наливов
- ❖ Интерпретация опытных данных
- ❖ Анализ факторов, осложняющих опыты
  - неоднородность
  - несовершенство
  - кольматация
  - переменный дебит

# 1WELL

## программа численного моделирования откачек и наливов в скважинах

Профильный поток в  
цилиндрических координатах

Изыскания, исследования, изучение параметров,  
водопонижение, дренаж

Слоистая неоднородность

Упругая и гравитационная емкость

Перетекание

Напорный – безнапорный поток

Емкость ствола скважины

Затопленный – незатопленный фильтр

Высачивание

Несовершенство скважины

Кольматация фильтра



[Задача, № скв. имя...] Пробная

Параметры пласта

Абсолютная отметка поверхности земли Z<sub>ао</sub>, м

Глубина до уровня воды z<sub>h</sub>, м   
 Напор потока H<sub>e</sub> = 13 м

Инфильтрация+испарение-w, м/сут ... дополнительно

Гравитационная емкость μ

Покровный слой

Мощность слоя m<sub>0</sub>, м

Коэффициент фильтрации покрова k<sub>0</sub>, м/сут

Глубина до подошвы пласта z<sub>a</sub>, м

Коэффициент фильтрации пласта k, м/сут

Коэффициент упругости η\*, 1/м

Перетекание через подошву пласта

Коэффициент перетока k<sub>p</sub>/m<sub>p</sub>, 1/сут

Шаг по оси z, м  по оси r r<sub>2</sub>/r<sub>1</sub> =  Радиус питания, м

Первый шаг по времени, мин  lg r<sub>2</sub>/r<sub>1</sub> = 0.25

равномерный

Шаг по времени dt=dt\*1.5

dt 83.1 час >5.7 час Аналитика

Задан дебит

Откачка  Налив

Дебит Q

Понижение уровня в скважине S<sub>c</sub>, м

Длительность

Параметры скважины

Возвышение трубы над устьем z<sub>u</sub>, м

Диаметр фильтра d<sub>с</sub>, м

Глубина до верха фильтра z<sub>1</sub>, м

Глубина до низа фильтра z<sub>2</sub>, м

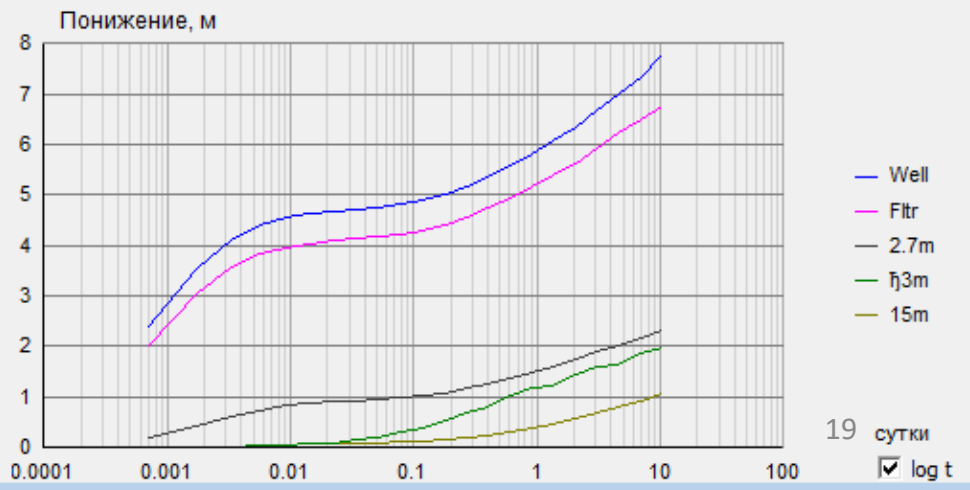
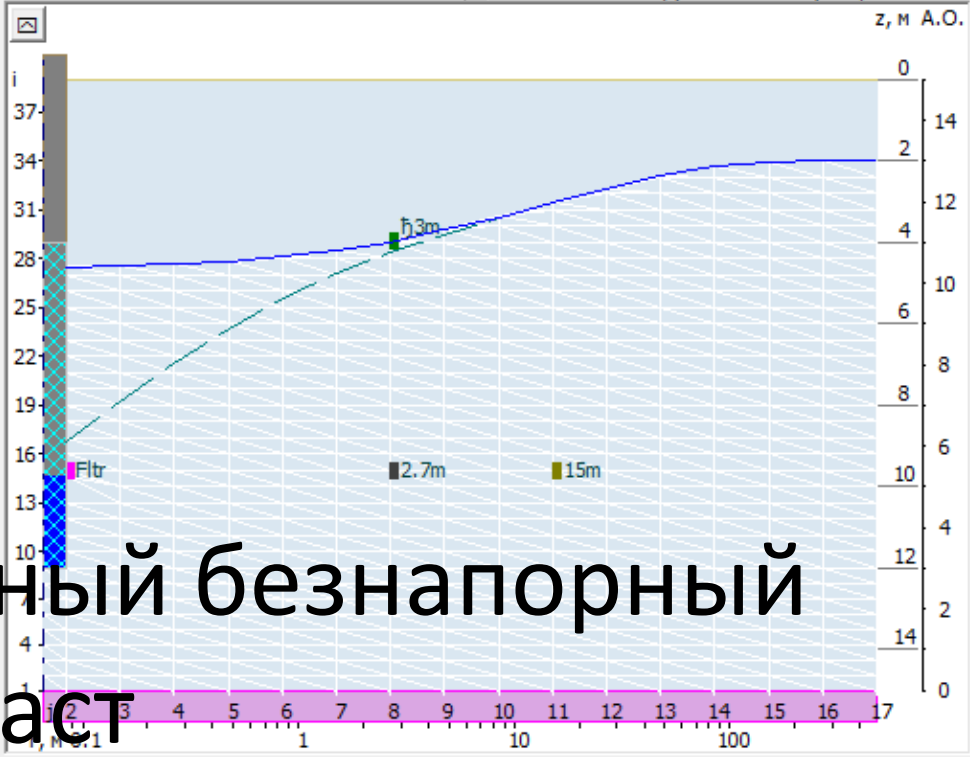
Коэффициент кольтатации k<sub>c</sub>/k

Длина отстойника, м

Приток через забой

Точки прослеживания

r, м	8см	2.7м	2.7м	15м		
j	2	8	8	11		
i	15	15	27	15		
Id	Fitr	2.7m	h3m	15m		



# 1WELL – однородный безнапорный пласт



Точность, м 0.0005 j=02 i=13 dH=0.0005 м  
 По итерациям 22  
 Время 10.4 сут Шаг 22  
 Дебит 10.0 куб.м/ч

[Задача, № скв. имя...] Пробная

Задан дебит Задан напор Экспресс

Параметры пласта  
 Абсолютная отметка поверхности земли Зао, м 15  
 Глубина до уровня воды zh, м 2  
 Инфильтрация+шпарни w, м/сут ... дополнительно

Откачка  Налив   
 Дебит Q куб.м/ч 10  
 Длительность сутки 8

Пласт Слои

Параметры слоев

Слой	Подшва_м	kg, м/сут	kz, м/сут	$\mu$	$n^*$ , 1/м
1	5	5	1	0.1	0.0001
2	6	0.5	0.5		
3	9	5			0.0003
4	16	10			
5	17	0.2			
6	20	35			
7					
8					
9					

Кoeffициент перетока  $k_p/m_p$ , 1/сут  
 Длина отстойника, м  
 Приток через забой

Шаг по оси z, м 0.8 по оси r  $r_2/r_1 = 1.78$  Радиус питания, м

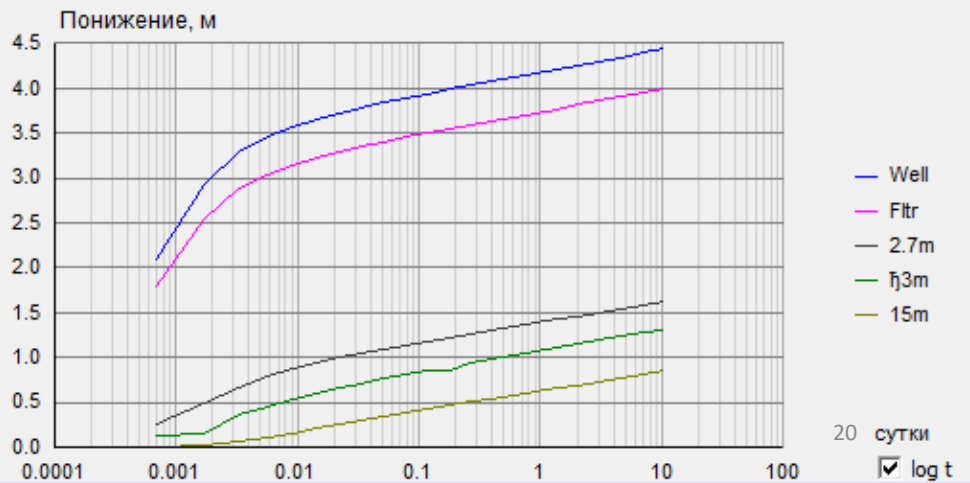
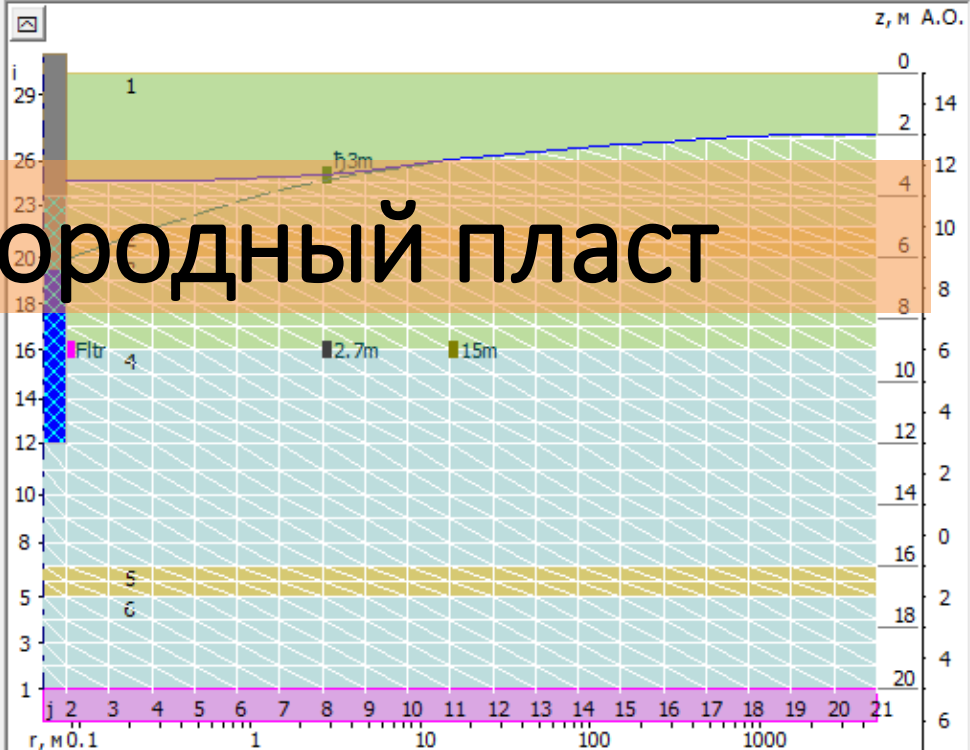
Первый шаг по времени, мин 1  $lg r_2/r_1 = 0.25$

Точки прослеживания

$r_м$	8см	2.7М	2.7М	15М
j	2	8	8	11
i	16.5	16.5	24	16.5
Id	Fitr	2.7m	h3m	15m

dt 83.1 час >5.4 сут Аналитика

# 1WELL — неоднородный пласт



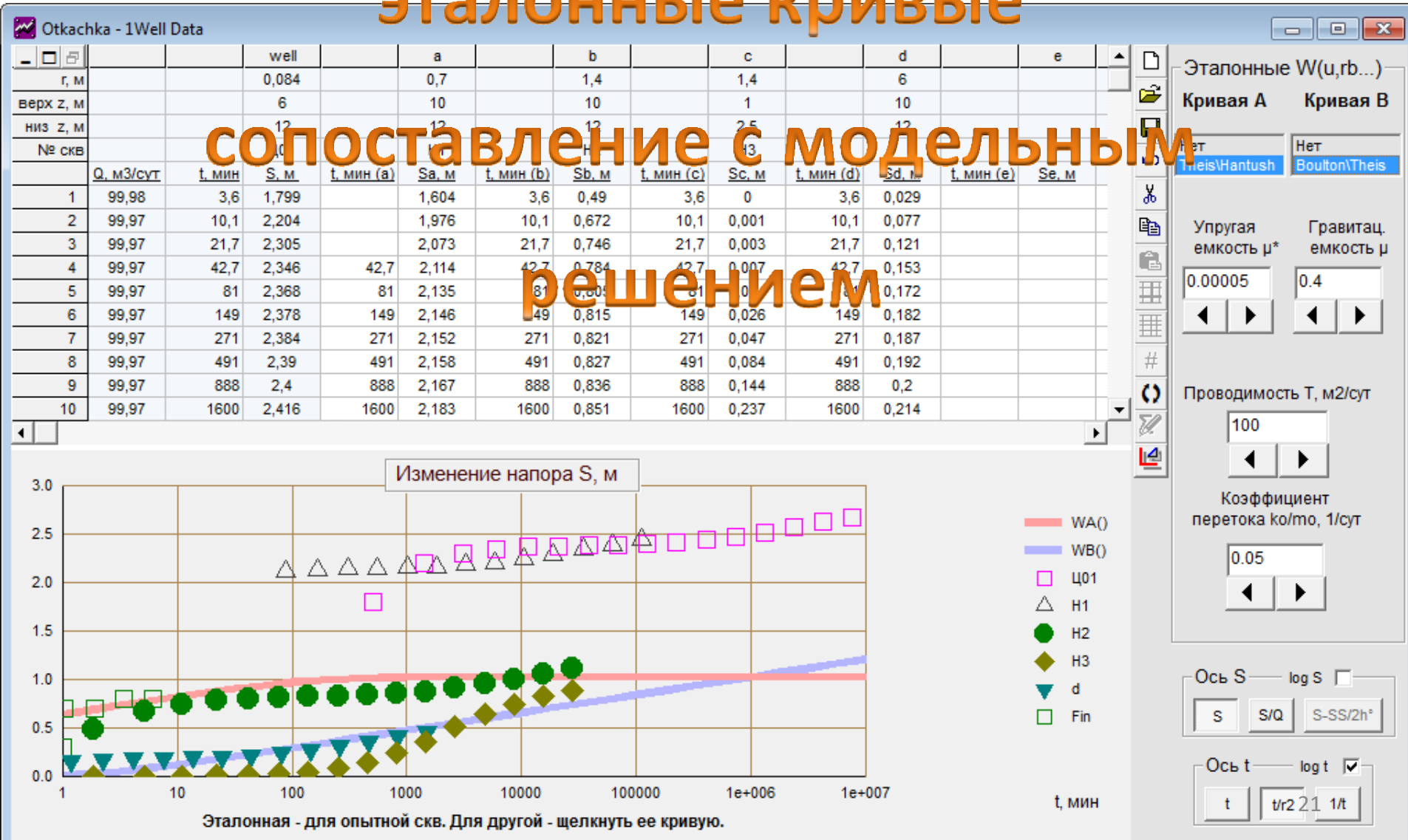
20 сутки  log t

# 1WELL – обработка данных

## эталонные кривые

сопоставление с модельным

решением



Прогноз  
водопонижения,  
осадочных деформаций  
фильтрационной консолидации

# PRITOK

программа аналитического моделирования

линейного, контурного дренажа,

группы скважин

Используется с 1993 г.

МосИнжПроект

МосводоканалНИИпроект

КаналСтройПроект и др.

Автор М.В. Лехов

# Линейный ряд

Расчет вертикального дренажа PRITOK\_2 LineD.ptk

Файл Расчет

[Характеристика варианта]

**Параметры потока**

Напор потока  $H$ , м

Мощность потока  $m$ , м

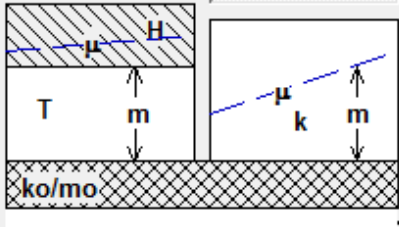
Проводимость  $T$ , м<sup>2</sup>/сут

Коэффициент фильтрации  $k$ , м/сут

Водоотдача  $\mu$

**Проводимость**

задана  $T = \text{const}$   зависит от мощности  $T = km$



**Перетекание**

Параметр перетока  $ko/mo$ , 1/сут

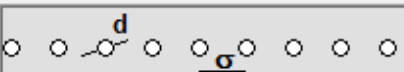
Напор в соседнем пласте  $H_o$ , м

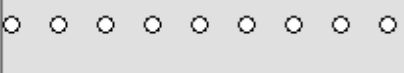
**Линейный** **Контурный** **Скважины**

**Расчет графиков**

**Неограниченный ряд**

Количество рядов

1  

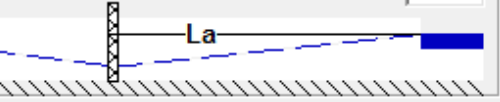
2  

**Граница**  Нет  ГУ I (III)  ГУ II

**Водная граница ГУ I (III)**

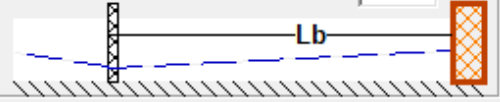
Расстояние до границы  $L_a$ , м

Параметр ГУ III рода  $\Delta L$ , м



**Непроницаемая граница ГУ II**

Расстояние до границы  $L_b$ , м



**Характеристики скважин**

Напор в скважине  $H_c$ , м

Шаг скважин  $\sigma$ , м

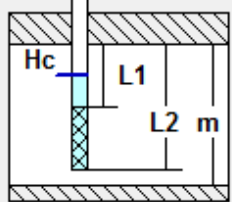
Диаметр фильтра  $d$ , мм

**Несовершенство скважин**

Приведенная глубина

верха фильтра  $L_1/m$

низа фильтра  $L_2/m$



Учитывать высачивание на стенке скважины

**Постоянный расход**

Дебит скважины (м<sup>3</sup>/ч)

**Временное прослеживание**

Время прослеживания, сут

от  до

Расстояния (м) до точек

1  2  3  4

Понижение (м) для оценки влияния дренажа



# Группа скважин

Расчет вертикального дренажа PRITOK\_2 SkvP.ptk

Файл Расчет

[Характеристика варианта] ролюуу

Линейный Контурный Скважины

Расчет графиков

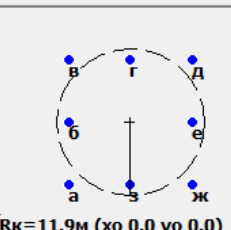
Группа  Таблица координат

Граница

Нет

ГУ I (III)

ГУ II



$R_k = 11.9 \text{ м (хо } 0.0 \text{ уо } 0.0)$

Характеристики скважин

Напор в скважине  $H_c$ , м 112

Диаметр фильтра  $d$ , мм 76

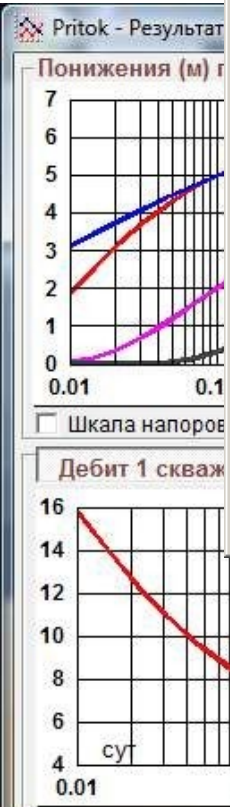
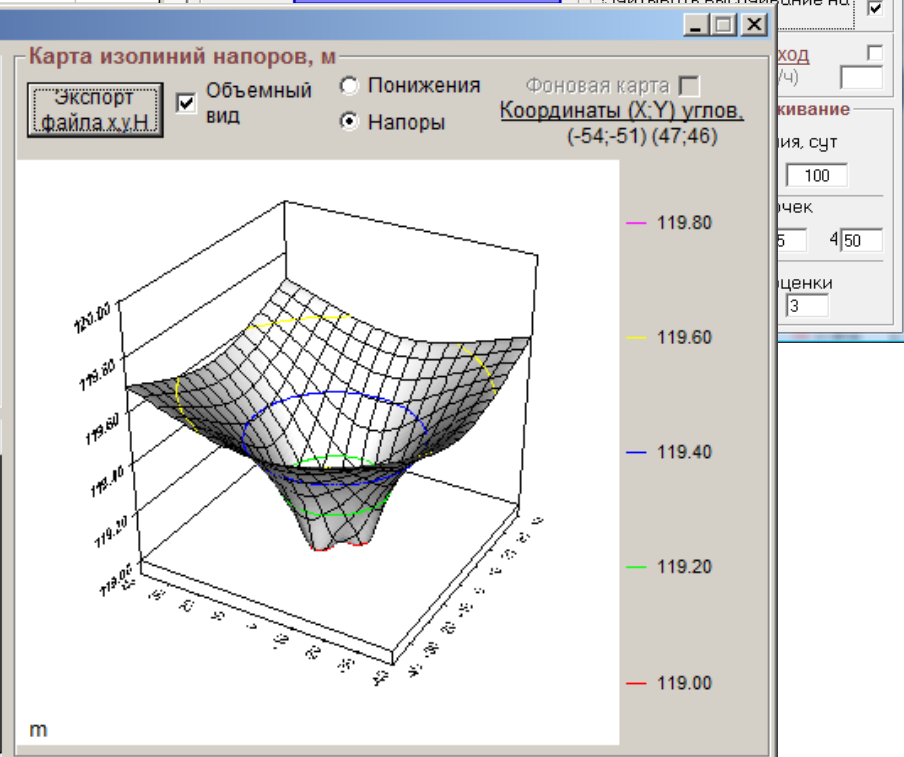
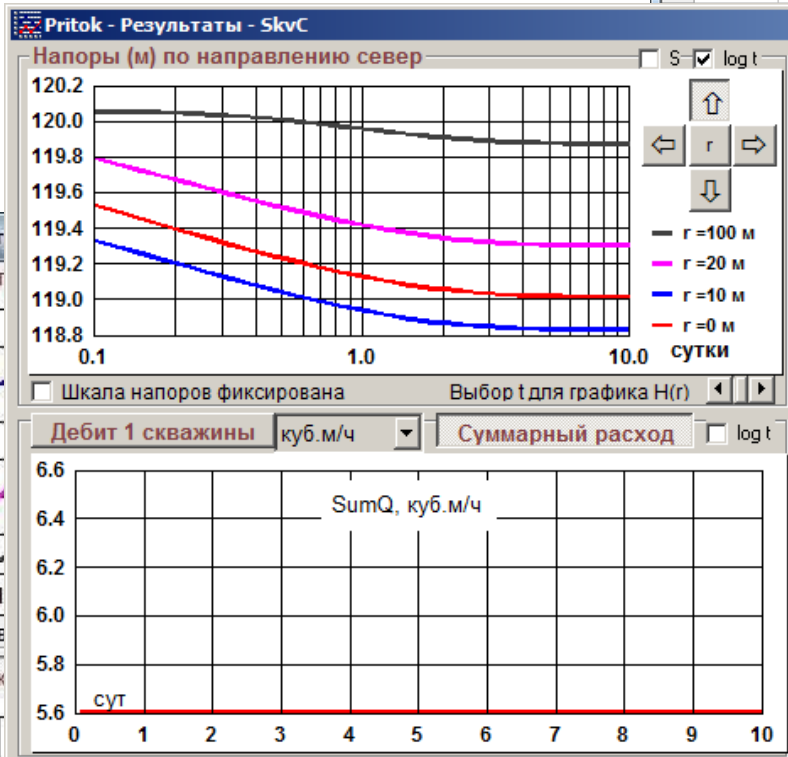
Несовершенство скважин

Приведенная глубина

верха фильтра  $L1/m$  0.2

низа фильтра  $L2/m$  0.9

Читать высачивание на



- Ряды, контуры, группа, одиночная скважина
- Схема Дюпюи  $T=kt$  или фиксированная  $T$ . Перетекание.
- Граница непроницаемая. Водная граница с сопротивлением
- Заданное понижение, заданный расход или назначенное понижение при постоянстве расхода
- Несовершенство скважин по степени вскрытия
- Высачивание на стенке фильтра скважин
- Автоматизация, многовариантность и экспорт результатов

# PRITOK – расчет вертикального строительного дренажа

- Простота задания параметров и пользования
- Ревизия, программирование решений 50-70 г.г.
- Тестирование всех функций и интегралов.
- Новые решения для трудных случаев.

# SINK - Численная Модель КОНСОЛИДАЦИИ

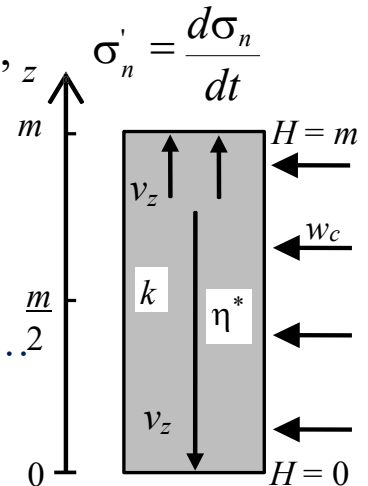
Уравнение нелинейной упругой фильтрации [В. Н. Щелкачев 1948, В. М. Шестаков 1963 - 2010]

$$\eta^* \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) + w_c \quad \eta^* = \frac{\gamma(a_c + e\beta)}{1+e}, \quad w_c = \alpha \sigma'_n, \quad \alpha = \frac{a_c}{1+e}, \quad \sigma'_n = \frac{d\sigma_n}{dt}$$

Нелинейность:

- переменный по  $z$  и  $t$  источник  $w_c(a_c, e)$ ,
- взаимозависимые параметры  $k(\gamma_n, e), e(\sigma), a_c(\sigma), \gamma_n(e), \sigma(m, H, \gamma_n) \dots$
- подвижная граница  $z_m(t)$

$$k(\gamma_n, e), e(\sigma), a_c(\sigma), \gamma_n(e), \sigma(m, H, \gamma_n) \dots$$



- $e$  - коэффициент пористости
- $\sigma$  - эффективное напряжение в скелете, кг/см<sup>2</sup>
- $p$  - нейтральное давление воды, кг/см<sup>2</sup>
- $\sigma'_n$  - скорость роста нагрузки, кг/см<sup>2</sup>/сут
- $\beta$  - коэффициент объемного сжатия воды, 1/атм

- $a_c$  - коэффициент сжимаемости, см<sup>2</sup>/кг
- $\sigma_n$  - полное давление, кг/см<sup>2</sup>
- $k$  - коэффициент фильтрации, м/сут
- $\eta^*$  - коэффициент упругоёмкости, 1/м
- $\gamma$  - плотность воды, г/см<sup>3</sup>

Расход (скорость) на границах вверх и вниз

$$v_z = -k \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=0, z=m}$$

Суммарная осадочная деформация

$$S_m = \int_0^m \varepsilon(z) dz$$

# Вертикальная фильтрация при консолидации слоя осадка

File Run

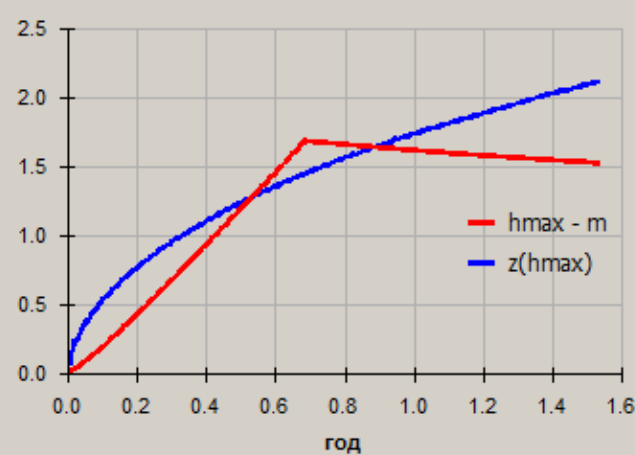
dt> dt<

Время 1.5 год      Осадка 0.59 м      Отжим вниз = 5.8 %

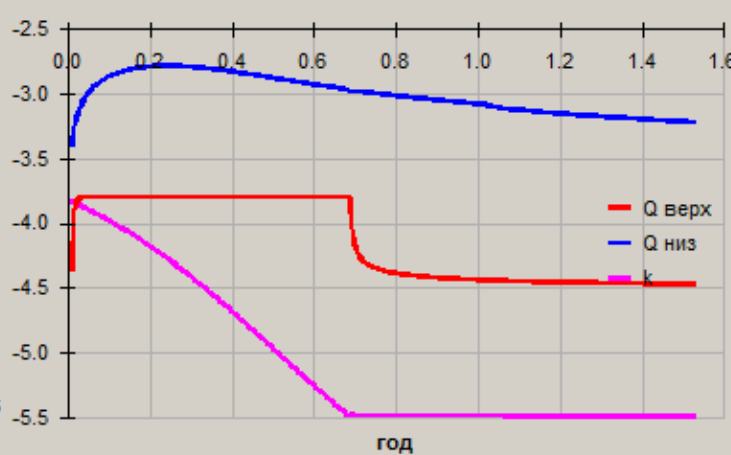
## Параметры моделирования консолидации

Мощность толщи [м]	m=	10
Об. вес осадка [Т/м3]	gm=	1.2
Козф. пористости [-]	e=	6
Козф. фильтрации [м/сут]	k=	0.00015
$d(\ln e) = -ae \cdot d(p)$ [см2/кг]	ae=	2
$d(\ln k) = -d(gm) \cdot Ck$	Ck=	5.4
Время укладки [сут], tk		250
Шаг по времени [сут], dt		5
Элементов за шаг, dn		10

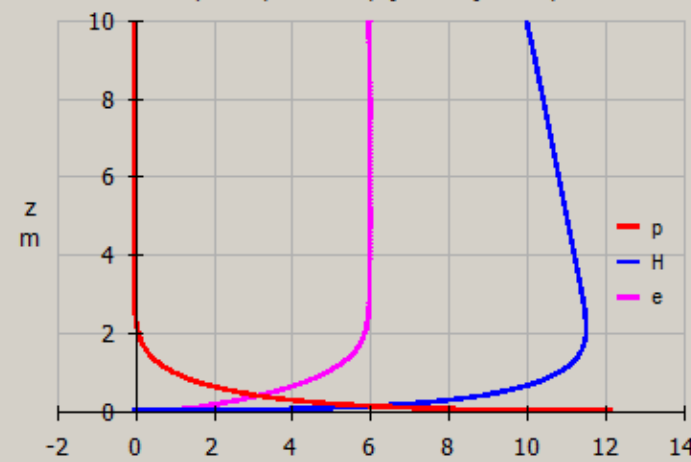
Превышение max напора над кровлей h [м] и координата z [м] max h



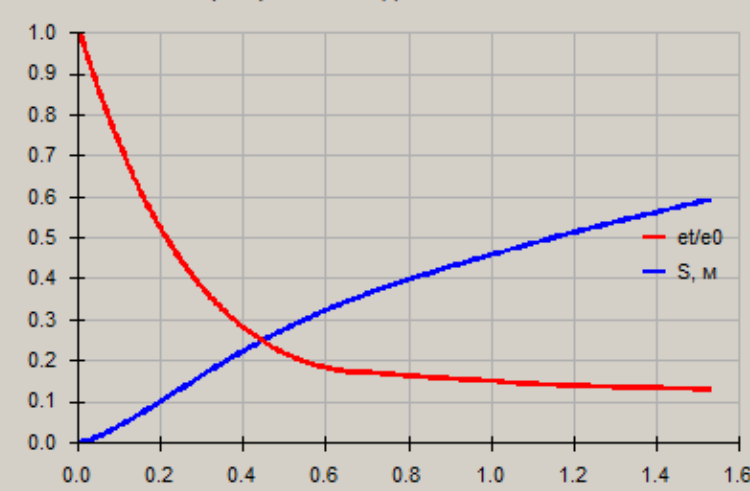
Логарифмы расхода Q на верхней и нижней границах, коэффициента фильтрации k в подошве [м/сут]



Эпюра коэф. пористости e и напоров H [м] и эф. напряжений p [м в.ст.] по вертикали z

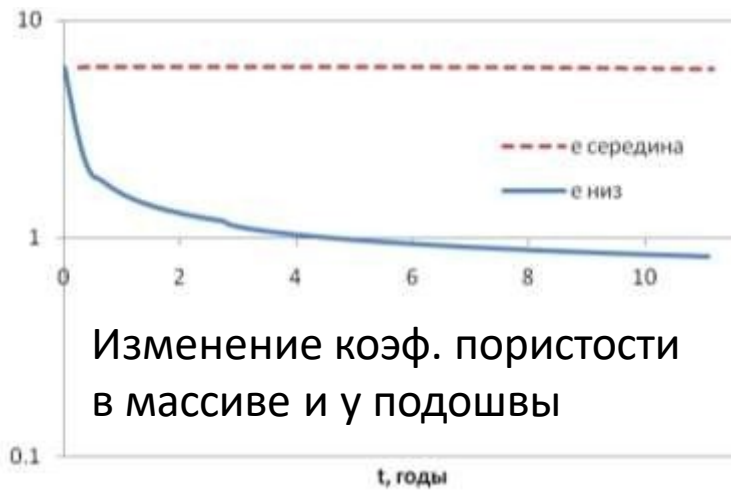
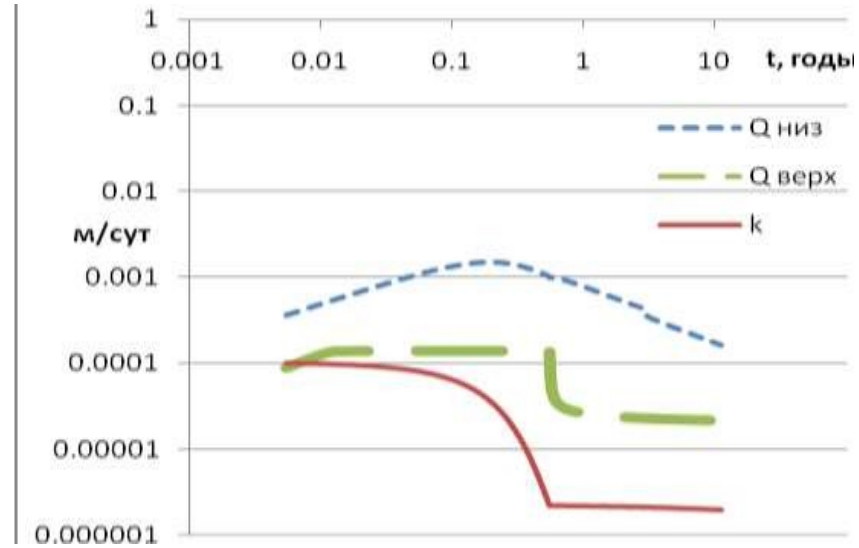
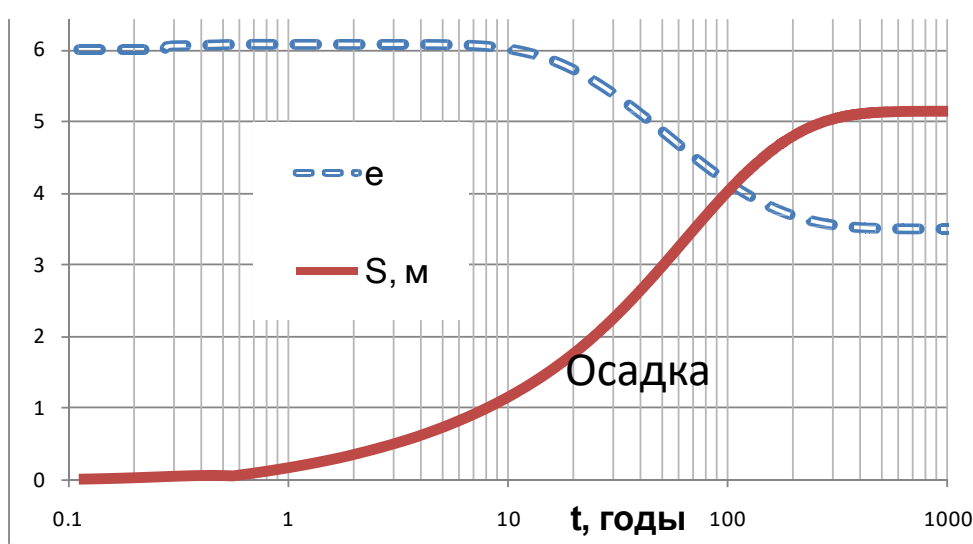


Осадка поверхности S [м] и уменьшение коэф. пористости e(t)/e0 на подошве

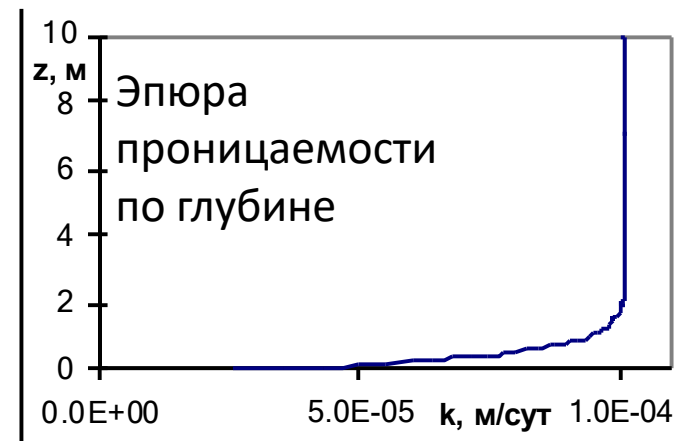
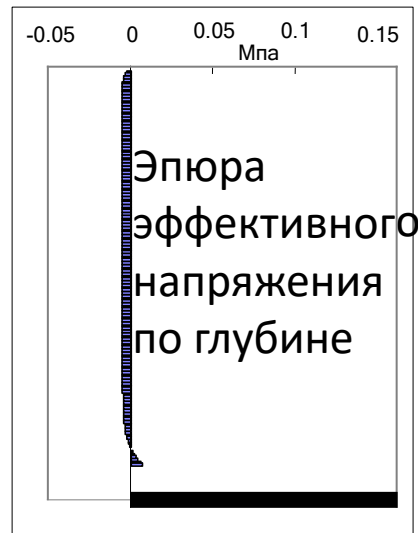


Интерфейс  
программы  
SINK  
результаты  
- графики

# Прогноз фильтрационного отжима, проницаемости и осадки поверхности



Изменение коэф. пористости в массиве и у подошвы



PERFIL –

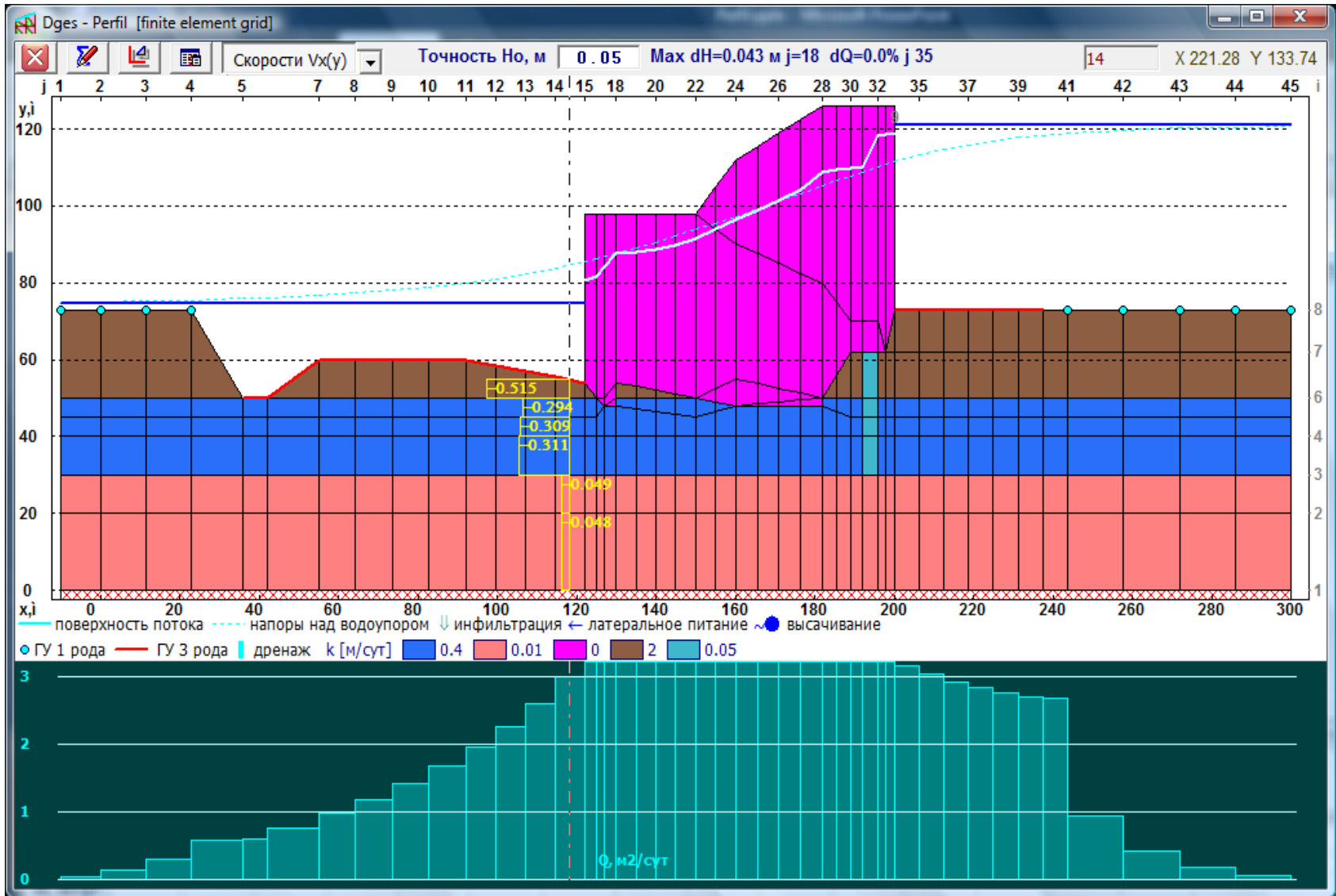
Моделирование (МКЭ)

профильной геофльтрации со

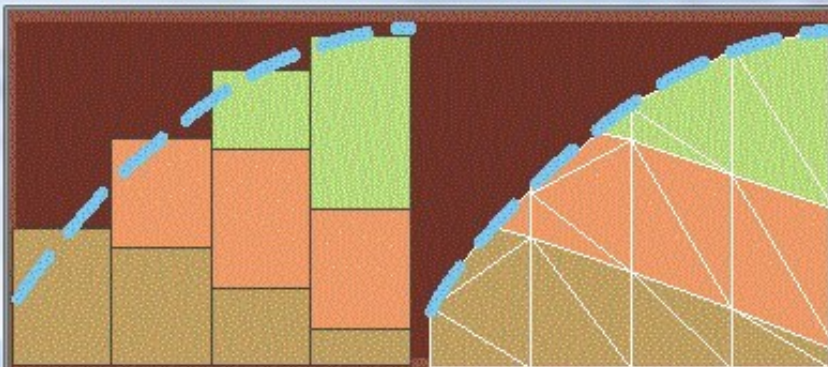
свободной поверхностью

# Программа PERFIL

– фильтрация в основании Днестровской ГЭС







*Конечные элементы воспроизводят криволинейную поверхность фильтрационного потока и обеспечивают "гладкое" решение, - в отличие конечных разностей, со ступенчатой аппроксимацией.*

**Программа PERFIL - МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**  
при решении задач гидрогеологических изысканий, проектирования сооружений и экологической экспертизы:

- прогноз фильтрационных потерь и гидрогеологических явлений на участках водохранилищ, хвостохранилищ, золоотвалов, свалок;
- фильтрационные расчеты устойчивости сооружений, откосов, оползневых склонов;
- расчеты подпора и подтопления территорий и сооружений, переработки берегов;
- проектирование дренажей и мелиоративных комплексов, противофильтрационных завес, экранов и других защитных мероприятий;
- решение задач идентификации гидрогеологических параметров...

Автоматизированная трансформация элементов. Включение-выключение граничных условий при обнаружении высачивания на поверхности земли, отрыве и подтоплении контура здания и ложа водоема, осушении дренажа.

#### Моделируемые факторы

- свободная поверхность потока подземных вод;
- криволинейный характер водоупора, слоев и контуров сооружений;
- неоднородность водопроницаемости пород в разрезе и плане;
- инфильтрация (естественная и техногенная) с поверхности земли;
- подпор и отрыв свободной поверхности от дна висячего водоема;
- высачивание подземных вод на поверхности земли, стенке дренажа;
- латеральный питающий поток подземных вод;
- перетекание из нижележащего пласта;
- контур ложа водоема как граница 1 или 3 рода;
- горизонтальные и вертикальные противофильтрационные экраны;
- горизонтальные и вертикальные дренажи как граница 1 или 3 рода.

М. В. Лехов  
M. V. Lekhov  
© 2004 Version 2.2.33  
© 1992 DOS Vers. 1  
mvlekhov@geol.msu.ru

Геологический факультет  
МГУ им. М. В. Ломоносова



Закреть <sup>33</sup>

✕ 🔍 📄 📊 📅 Скорости Vx(y) ▼ Точность Но, м **0.05** Max dH=0.021 м j=34 dQ=18.31% j 28 📏 j 27 i 13 X 181.97 Y 38.04

j 1 3 4 5 6 7 8 9 11 14 16 17 18 19 21 23 24 26 27 28 29 30 32 33 34 35 36 37 i

y,i 35

File Edit Conditions Compute Result Help

Таблица 1. Координаты y [м] узлов i, j

Точность поиска УГВ, м **0.05**

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
20																	
19																	
18																	
17																	
16																	
15																	
14																	
13																	
12												24.80	24.80	22.00	22.00	22.00	22.00
11											22.40	24.80	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40
10										20.00	22.40	20.50	20.50	20.50	20.50	20.50	20.50
9							19.60	19.80	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
8						18.50	19.60	19.30	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
7		16.50	17.00	17.80	18.00	18.50	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
6	16.00	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50
5	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
4	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00
3	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.13	11.25	11.50
2	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
1	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.07	4.15	4.50

Таблица 2. Координаты x вертикалей. Граничные напоры Hd. Параметр дренажа Ld. Инфильтрация w. Сопротивление ложа водоема m/k

x, м	0.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	57.5	65.0	70.0	72.5	75.0	78.0	83.0	87.75	92.5	102.0
Hd, м	17.0	17.0	17.0				17.0							22.5	22.5	22.5	22.5
Ld							11							0.05	0.05	0.05	0.05
w, м/сут																	
m/k, сут																	

Таблица 3. Коэффициенты фильтрации k слоев

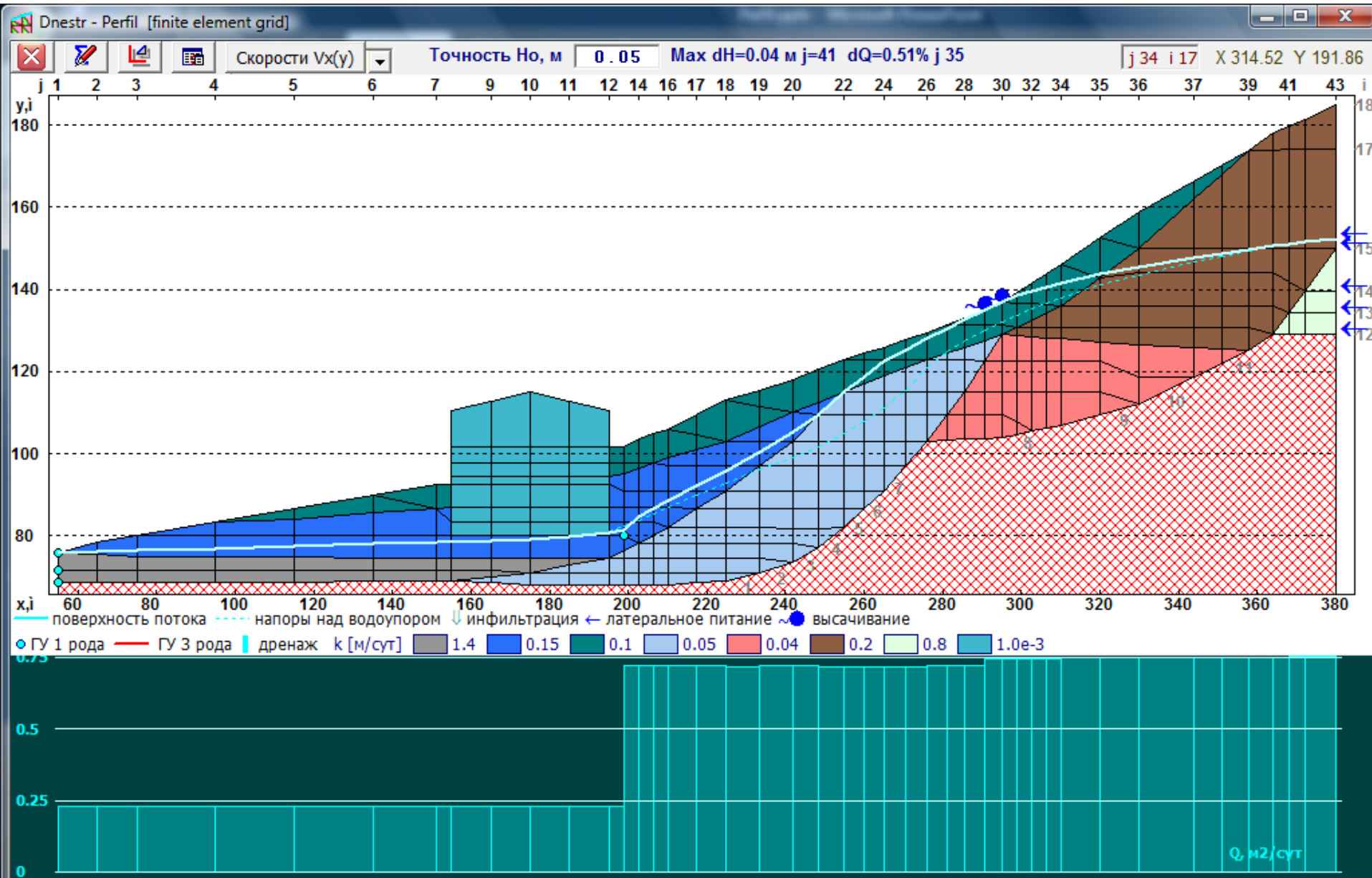
Расход на правой границе, м<sup>2</sup>/сут **0.6**

№ слоя	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-
k, м/сут	11	1	1	0.5	0.21	0.01			5.1	0	не задан
μ											не задан

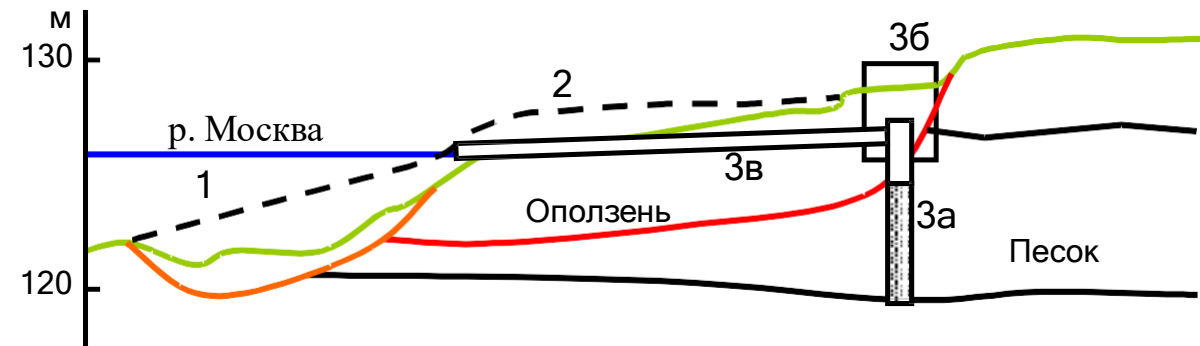
ПЕРЕТЕКАНИЕ снизу  
 напор слева   
 напор справа   
 k/m водоупора   
 1/сут



# Фильтрация в оползневом склоне ГАЭС



# Противооползневой дренаж на Рублевской ВС



SLUMP –

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ  
ОПОЛЗНЕВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА  
С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА  
И ЗАТОПЛЕННОГО ОСНОВАНИЯ

# Основные позиции разработки

Slump



Доказана возможность и допустимость в пределах обычной точности решения оползневых задач использовать с практически равным успехом любые из известных расчетных методов как более или менее "приближенные", так и теоретически более "точные".  
Н. Н. Маслов "Механика грунтов в практике..."

Программа расчета устойчивости и поиска поверхности оползания склона

Запас устойчивости склона  $K = \Sigma U / \Sigma S$  оценивается по соотношению удерживающих  $U$  и сдвигающих  $S$  сил, действующих вдоль поверхности скольжения - заданной или имитируемой цилиндрической.

Учитывается:

- ✓ затопленный откос
- ✓ вес сооружения
- ✓ неоднородность разреза
- ✓ воздействие потока грунтовых вод
- ✓ сейсмический (динамический) фактор

Поиск слабой поверхности ведется вручную и автоматически.

Рассчитывается кумулятивная эпюра избыточной сдвигающей силы  $\Sigma (s - u)$ .

Разрез ориентируется против падения склона и разбивается вертикалями на отсеки. По вертикалям задаются:

- поверхность земли  $Z_s$  или фундамента
- известная поверхность смещения  $Z_s$
- поверхность грунтовых вод  $H$ , водоема  $H_a$
- подошвы слоев  $Z_a, Z_b, Z_c \dots$
- удельная нагрузка сооружения  $p$

Параметры сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\phi$  и объемный вес  $g$  задаются по слоям.

М. В. Лехов  
lehov@mail.ru

Геологический факультет  
МГУ им. М. В. Ломоносова

Version 3.2.24 ©2004-2011  
Vers. 1 «SLOPE» ©1992

ekhov

ikhail

Заккрыть



# Однооконный интерфейс SLUMP

Демонстрационный пример - Slump

Файл Таблицы Разрез Расчет Помощь

Уровень водоема, м 120.1 Шаг, м 0.5 Двигать цилиндр стрелками - с Shift и без, колесиком

Коэффициент запаса устойчивости

Цилиндрическая поверхность 1.23

Заданная поверхность 1.70

нет эпюры  Эпюра избыточной силы сдвига S-U

Таблица характеристик вертикалей

j	X, м	Zs, м	Zs, м	Hв, м	Za, м	Zb, м	Zc, м	Zd, м	Ze, м	Zf, м
2	-30	110.2		122.42	107.8					
3	-25	110.4	110.4	122.44	107.6					
4	-16.18	112.65	110.23	122.48	108					
5	-7.35	114.9	110.05	122.52	108.4					
6	1.48	117.15	109.87	122.56	109.00					
7	10.3	119.4	109.7	122.6	110.50					
8	20.1	122.15	111.25	123.3	114.05					
9	29.9	124.9	112.8	124	118.9		118.9			
10	38.35	127.7	114.15	125.3	123.2		118.9			
11	46.8	130.5	115.5	126.6	127.5		118.9			
12	51.9	129	116.4	127.1	130.5		119			
13	59.3	129	117.65	127.7			119			
14	66.7	129	118.9	128.3			119.1			
15	73.85	137.00	123.1	129.1		132.5	119.2			
16	81	137.00	127.3	129.9		132.3	119.3			
17	87.2	140.96	131.2	130.7		131.9	119.1			

Графическая редакция

Таблица параметров слоев

Сейсмичность, баллы

N	с, МПа	Fi, °	g, Г/смЗ	c*, МПа	Fi*, °	g*, Г/смЗ	к, м/сут	Слой
a	0.01	19	2			2.3		aQ
b	0.03	26	1.8			2		fglQ
c	0.03	14	1.7			1.9		K2
d	0.05	14	1.7			2		K1
e								
f								
g								
h								

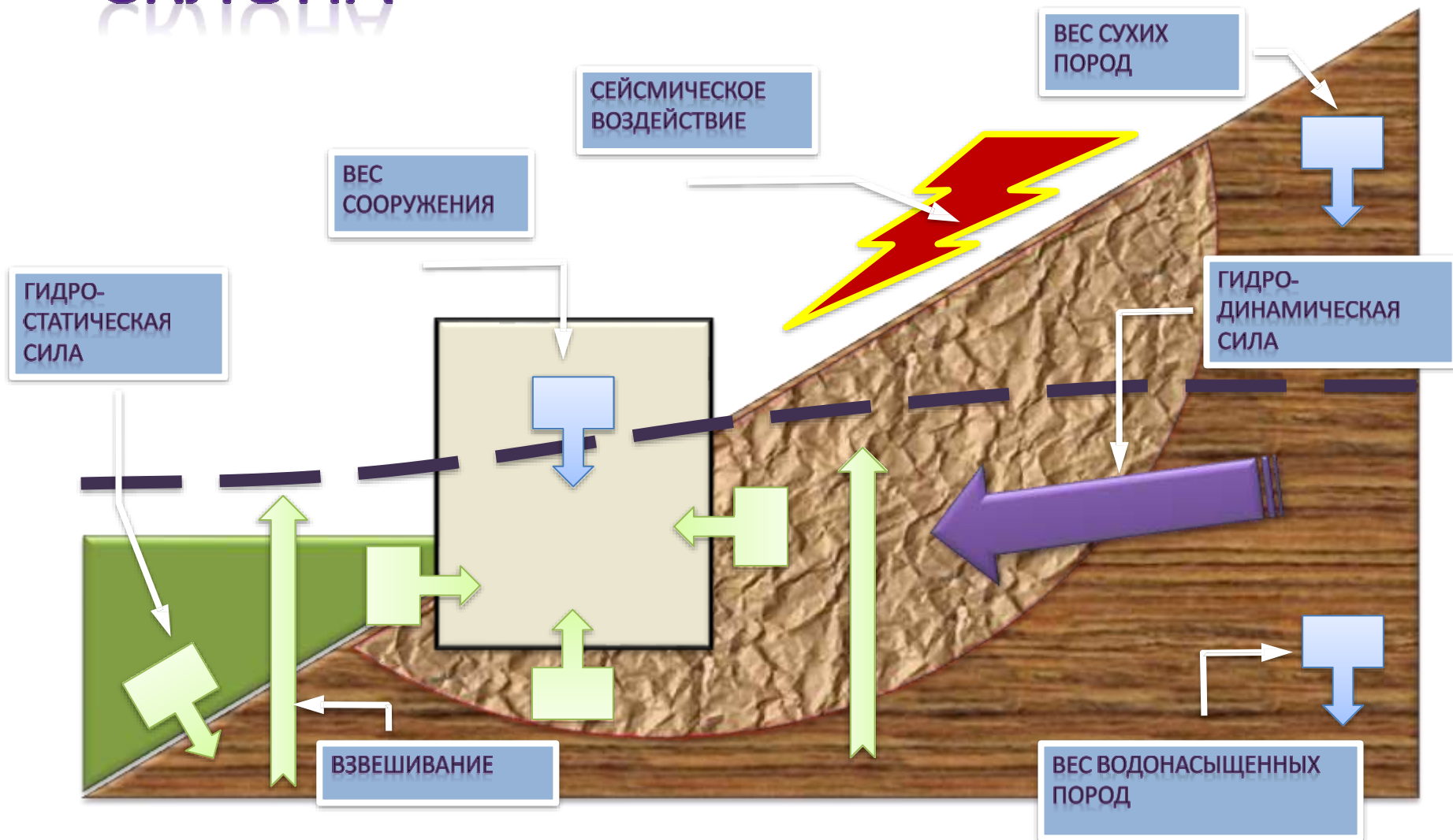
Х = -41.7 м Z = 132.94 Исажение масштаба 1.00 Для поиска и расчета слабой поверхности выделить область мышью.

Таблица расчета сил по блокам цилиндра и их суммирование (справа налево)

j	dx, м	Угол °	α~ T/m2	Вес, Т/м	Сдвиг S, Т/м	Сумма S, Т/м	Ф. сила, Т/м	Норм. N, Т/м	Удерж. U, Т/м	Сумма U, Т/м
7	9.8	-34.6	33.5	328.1	-186.2	1377.0	210.0	270.1	74.5	1577.6
8	9.8	-25.9	50.1	490.5	-214.1	1563.2	262.4	441.4	99.1	1503.1
9	8.4	-18.3	61.9	523.1	-164.4	1777.3	257.0	496.6	104.3	1404.0
10	8.5	-11.6	70.7	597.5	-120.3	1941.6	279.8	585.2	119.3	1299.8
11	5.1	-6.4	76.5	390.3	-43.2	2061.9	177.0	387.9	78.2	1180.5
12	7.4	-1.6	74.7	553.0	-15.2	2105.2	262.2	552.8	109.5	1102.2
13	7.4	4.1	74.5	551.5	39.3	2120.4	266.1	550.1	107.9	992.8
14	7.2	9.7	72.9	521.4	87.8	2081.1	258.9	514.0	99.9	884.9
15	7.2	15.3	82.0	586.2	154.6	1993.3	258.7	565.4	113.5	785.0
16	6.2	20.7	81.4	504.9	178.1	1838.6	222.3	472.5	95.5	671.5
17	6.1	25.8	83.4	508.5	221.1	1660.5	212.8	457.9	95.0	576.0
18	6.1	31.1	82.3	501.7	259.0	1439.4	201.6	429.7	92.5	481.0
19	5.8	36.6	78.2	453.8	270.3	1180.4	176.3	364.5	83.0	388.5

# SLUMP

## СИЛОВЫЕ ФАКТОРЫ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА





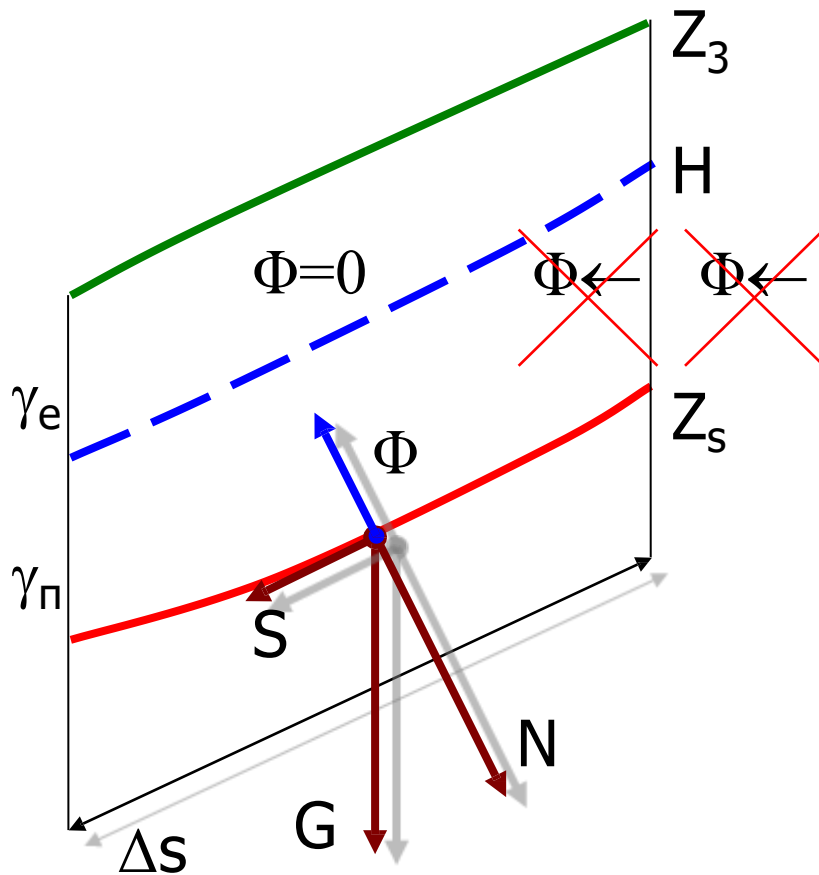
# УЧЕТ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА В ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДАХ

- суммирование сил по расчетным блокам

Два способа:

- (Чугаев) объемное интегрирование по блоку  $\omega$ :
  - гидростатической силы - через объемный вес пород с учетом взвешивания  $(\delta - \gamma)(1 - n)$ ,  $\delta$  - уд. вес скелета и
  - гидродинамической силы - через напоры и градиенты напоров  $\int \text{grad} H d\omega$ ,
- (Иванов, Герсеванов) замена объемных сил контурными и интегрирование по границам блоков

# Расчетная схема контурного учета фильтрационной силы



## Направление векторов сил

- $G$  – вес
- $S$  – тангенциальная проекция веса (сдвигающая сила)
- $N$  – нормальная проекция веса
- $\Phi$  – фильтрационная сила по поверхности скольжения
- $\Phi\leftarrow$  - сила гидродинамического давления на вертикальную границу блока

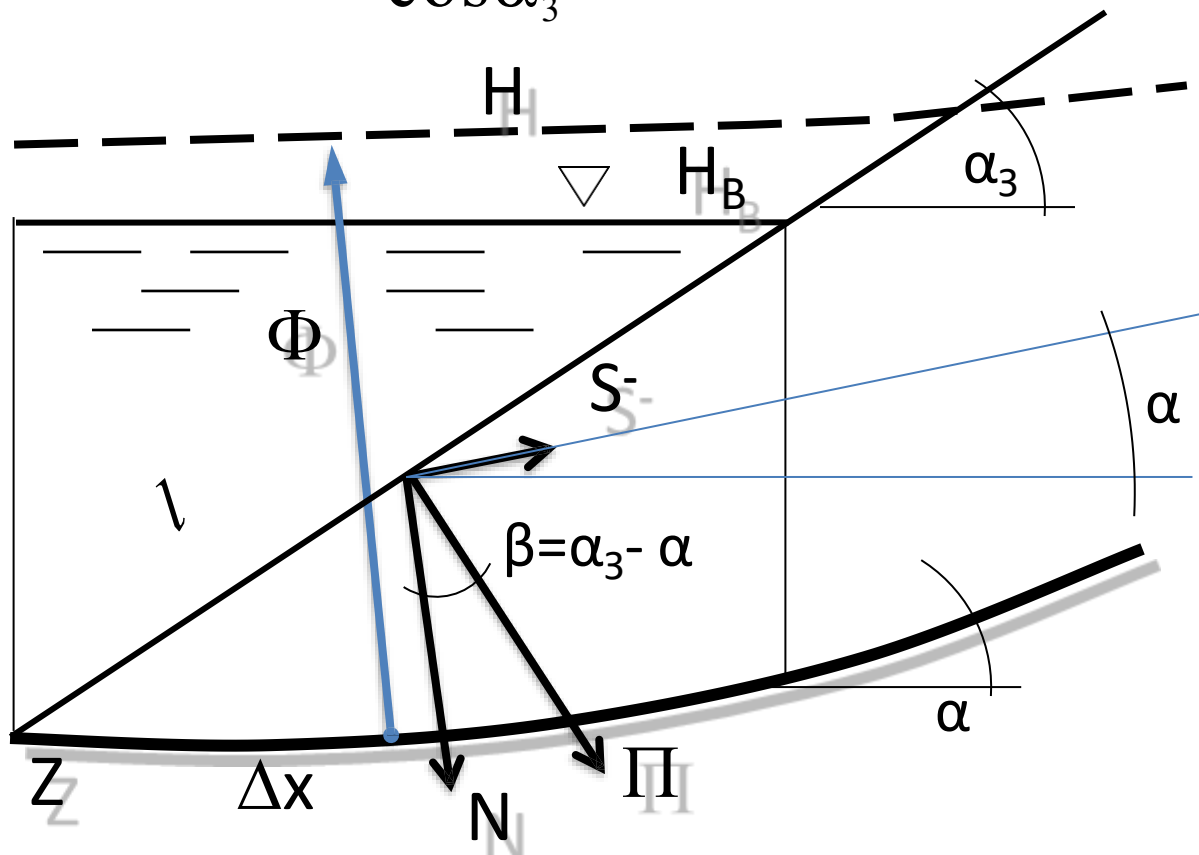
# ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ЗАТОПЛЕННЫЙ ОТКОС

$$\Pi = p \times l = \gamma \frac{(H_B - Z)}{2} l,$$

$$l = \frac{\Delta x}{\cos \alpha_3}$$

# ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ В ЗАТОПЛЕННОМ ОТКОСЕ

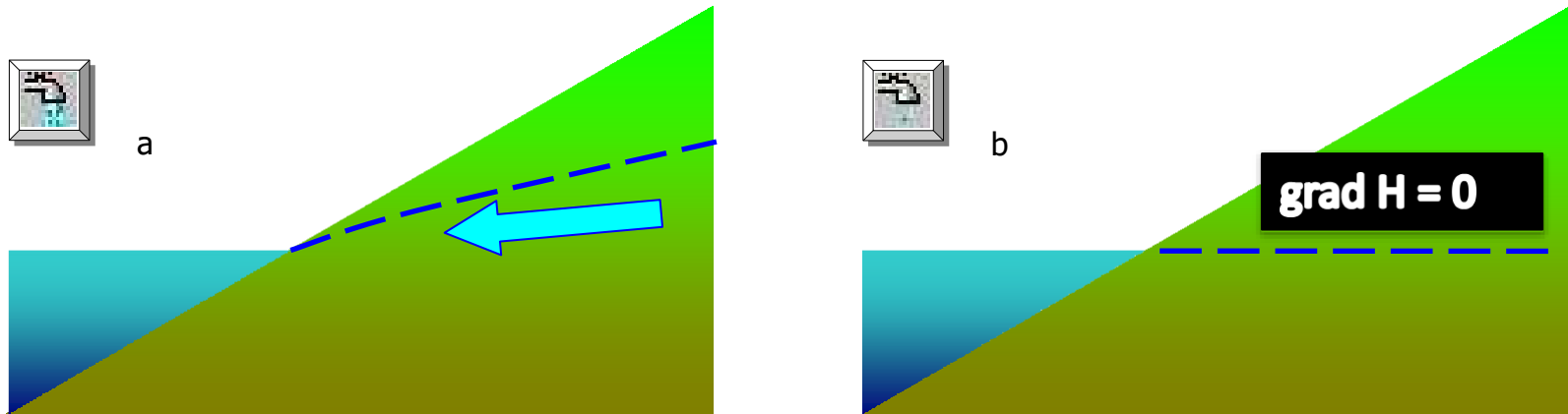
$$\Phi = \gamma (H - Z_{cp}) \times l$$



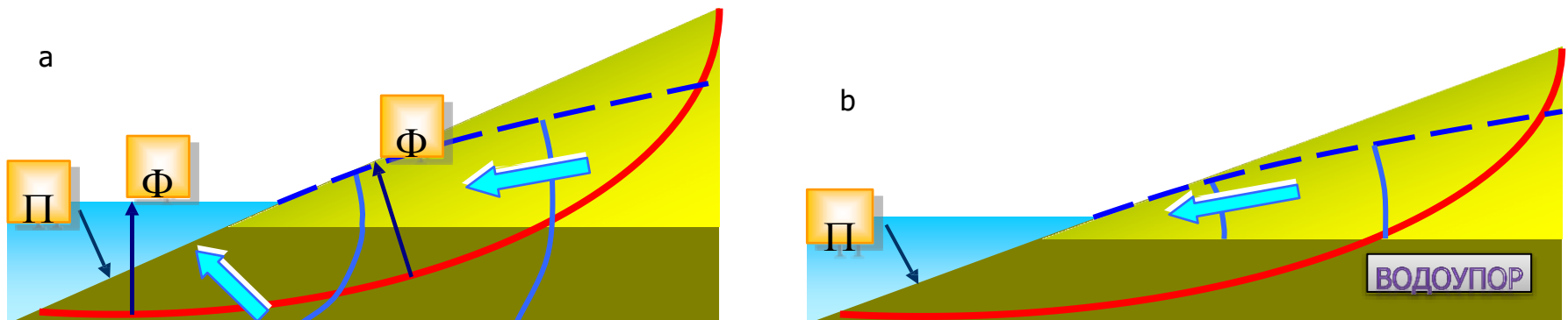
Проверка  $N > \Phi$   
для учета  
сопротивления  
сдвигу

# Оценка влияния подземных вод

## Градиент H



## Водоупор



# Фундамент сооружения Давление и противодействие

Гидростатическое  
давление **слева**

$$\sum S = \Delta S - S_{\text{л}} \quad S_{\text{л}} = P_{\text{л}} \cos \alpha$$

$$P_{\text{л}} = \int_{Z_{\phi}}^{H_{\epsilon}} p dz \cong \gamma \frac{(H_{\epsilon} - Z_{\epsilon})^2}{2} + \gamma \left[ H - \frac{(Z_{\epsilon} + Z_{\phi})}{2} \right] (Z_{\epsilon} - Z_{\phi})$$

Гидростатическое  
давление **справа**

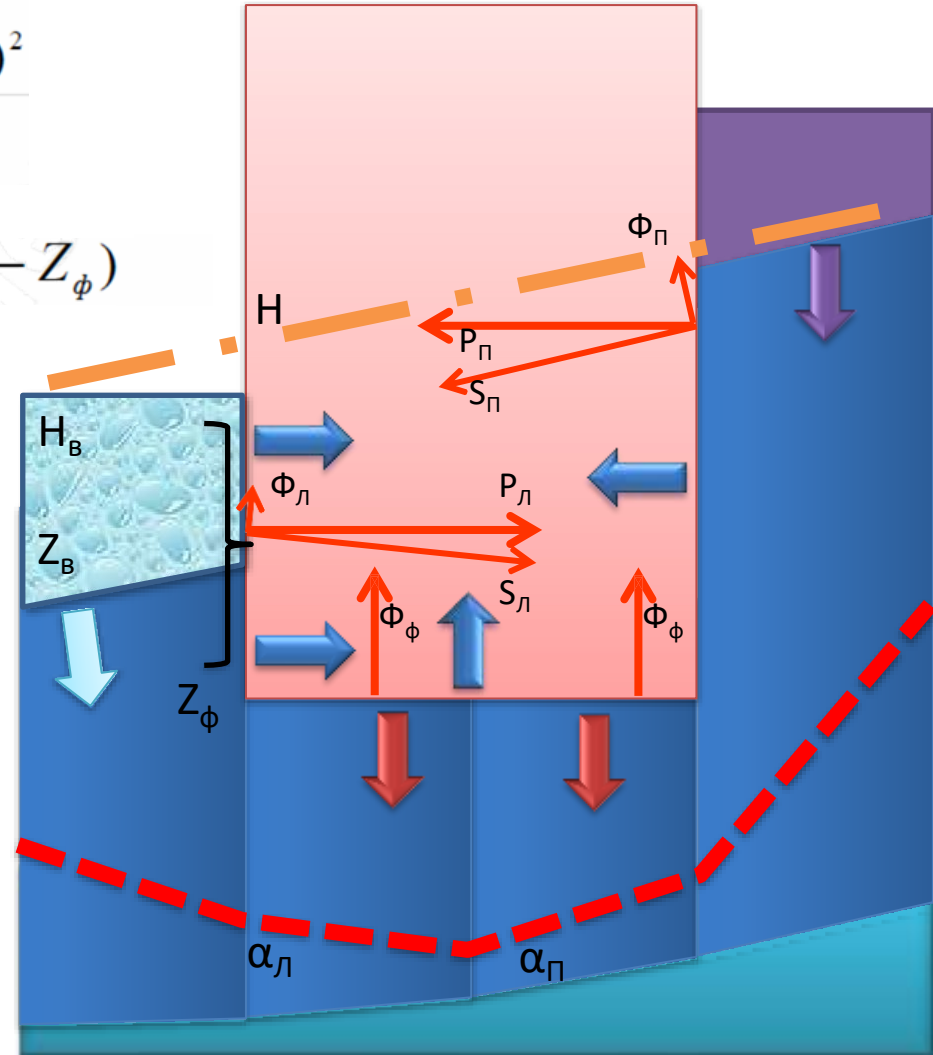
$$\sum S = \Delta S + S_{\text{п}}$$

$$S_{\text{п}} = P_{\text{п}} \cos \alpha, \quad P_{\text{п}} = \int_{Z_{\phi}}^H p dz \cong \gamma \frac{(H - Z_{\phi})^2}{2}$$

Гидростатическое  
давление **снизу**

$$G = G_{\phi} - \Phi_{\phi}$$

$$\Phi_{\phi} = \gamma (H - Z_{\phi}) \Delta x$$



# SLUMP: ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА НА СДВИГАЮЩИЕ СИЛЫ

## КОЭФФИЦИЕНТ СЕЙСМИЧНОСТИ $K_s$

7	8	9
0,025	0,05	0,1

**СИЛА  $\Rightarrow$  СИЛА  $\times (1 + K_s)$**

$$K_s = 0.0002 * \text{EXP}(0,7 \times B)$$

**Б – БАЛЛ ПО ШКАЛЕ 12-БАЛЬНОЙ MSK-64**

**СНИП II-7-81**

**9 БАЛЛОВ  $\Rightarrow$  УВЕЛИЧЕНИЕ СИЛЫ НА 10%**

## Другие задачи гидрогеомеханики в инженерной гидрогеологии

- Явления, связанные с упругим режимом фильтрации
- Выпор при проходке котлованов, горных выработок
- Локальная фильтрационная устойчивость откосов
- Суффозия
- ...
- ...