

# **ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ И ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В НЕДРАХ ЗЕМЛИ**

1

**Лектор**

**к.г.-м.н., доцент отделения геологии ИШПР**

**Токаренко Ольга Григорьевна**

**ФИЛЬТРАЦИЯ** – движение одно- или многофазных капельно-жидких подземных флюидов через горные породы, обусловленное наличием перепада напоров.

**ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ПОТОК** - водоносный горизонт, через который идет фильтрация воды

**Виды движения жидкости:**

**1. Установившееся (стационарное) движение** – это движение, при котором характеристики потока (скорость воды  $v$ , расход  $Q$ , гидравлический уклон  $I$ , гидродинамический напор  $H$ ) не изменяются.

**2. Неустановившееся (нестационарное) движение** характеризуется изменением во времени указанных выше характеристик потока.

## **ФАКТОРЫ,**

**определяющие условия движения подземных вод в пористой среде:**

- 1. Условия залегания природных вод в водоносных горизонтах**
- 2. Литологический состав пород и их мощность**
- 3. Пористость (динамическая пористость – определяется площадью пор, через которые может передвигаться свободная гравитационная вода под действием разных гидростатических напоров)**
- 4. Наличие связи водоносного горизонта с поверхностными водами**

## Основные формы движения вод:

- **В зоне аэрации** – свободное просачивание под действием гравитационных сил
- **В зоне насыщения** – инфильтрация под действием гидростатического давления

# ОСНОВНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

1. Пьезометрический напор
2. Напорный градиент
3. Линии тока
4. Линии равных напоров

# 1. Пьезометрический (гидродинамический) напор

$$H = P/\gamma + Z + v^2/2g$$

## *Формула Д.Бернулли*

где  $P$  — гидростатическое давление в исследуемой точке потока, атм.;  $\gamma$  — объемная масса воды;  $Z$  — высота исследуемой точки потока над выбранной плоскостью сравнения напоров, м;  $v^2/2g$  — высота скоростного напора, которая в потоке подземных вод весьма мала и обычно приравнивается к нулю.

Тогда

$$H = P/\gamma + Z$$

# ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ – вес вышележащего столба воды

$$P = \rho_v H/10$$

Единицы измерения *кг/см<sup>2</sup> или Атм. = 10<sup>4</sup> Па*

$\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup> (1 для пресной воды, для соленых вод до 1,2);

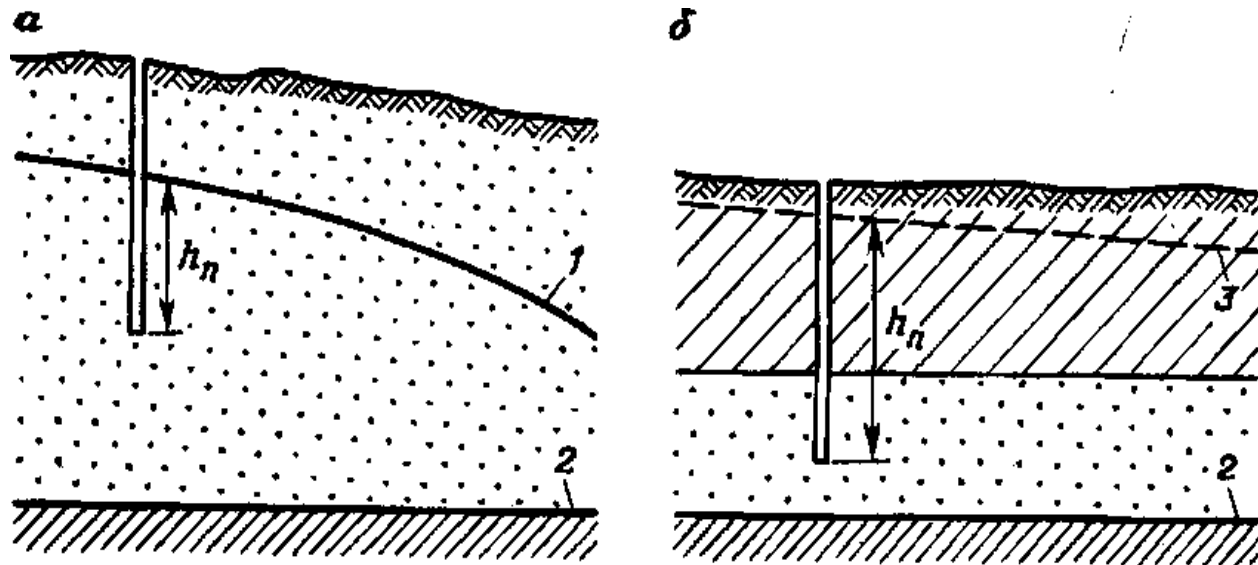
H – глубина залегания измеряемой точки от уровня первого от поверхности земли водоносного горизонта, м.

**С глубины первых километров  
пластовые давления в водоносных  
горизонтах становятся выше  
расчетных гидростатических в 1,3-  
1,6 раза (аномально высокие  
давления)**



**ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКАЯ ВЫСОТА** - высота, на которую должна подниматься вода над выбранной точкой потока под влиянием гидростатического давления  $P$  в этой же точке.

$$P/\gamma = h_n$$



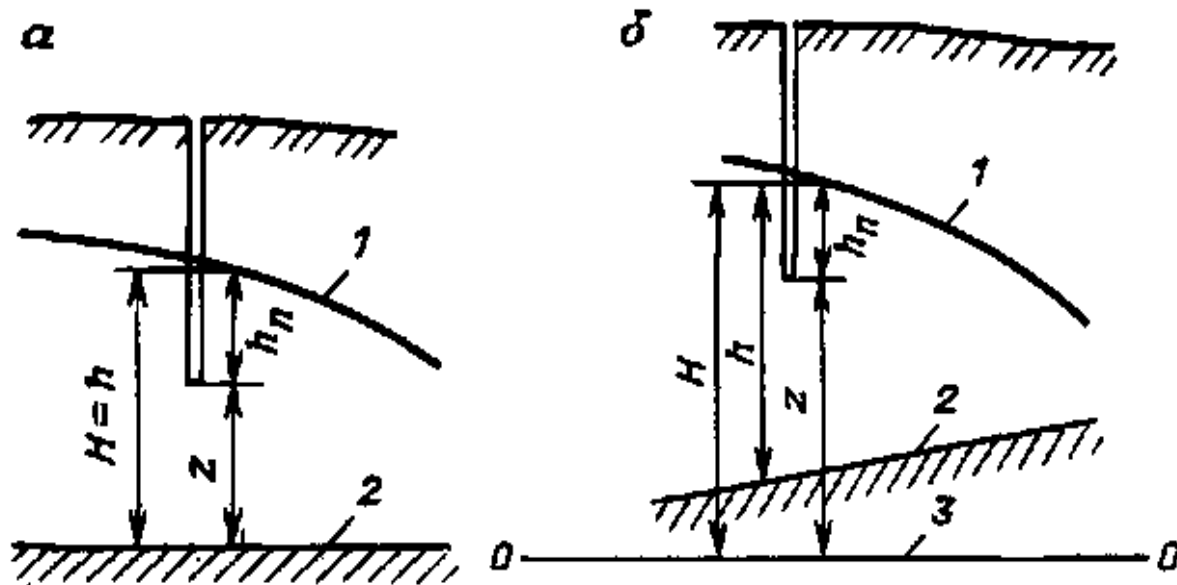
Графическое изображение **пьезометрической высоты** в скважине для безнапорных (а) и напорных (б) вод:

1 — зеркало грунтовых вод; 2 — водоупор; 3 — пьезометрическая поверхность

**Безнапорный поток — ПВ равна глубине погружения данной точки от зеркала грунтовых вод**

**Напорный поток — ПВ равна глубине погружения точки от **пьезометрической поверхности** этих вод**

$$H = h_n + Z$$



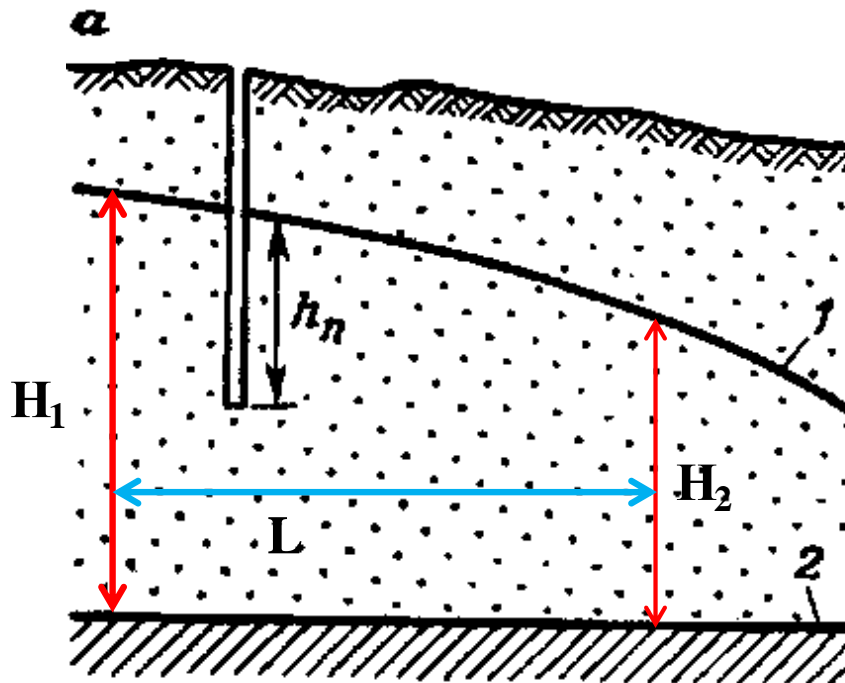
Графическое изображение **пьезометрического напора (H)** подземных вод с горизонтальным (а) и наклонным (б) залеганием водоупорного основания:

1 — зеркало грунтовых вод; 2 — водоупор; 3 — плоскость сравнения напоров

## 2. НАПОРНЫЙ ГРАДИЕНТ

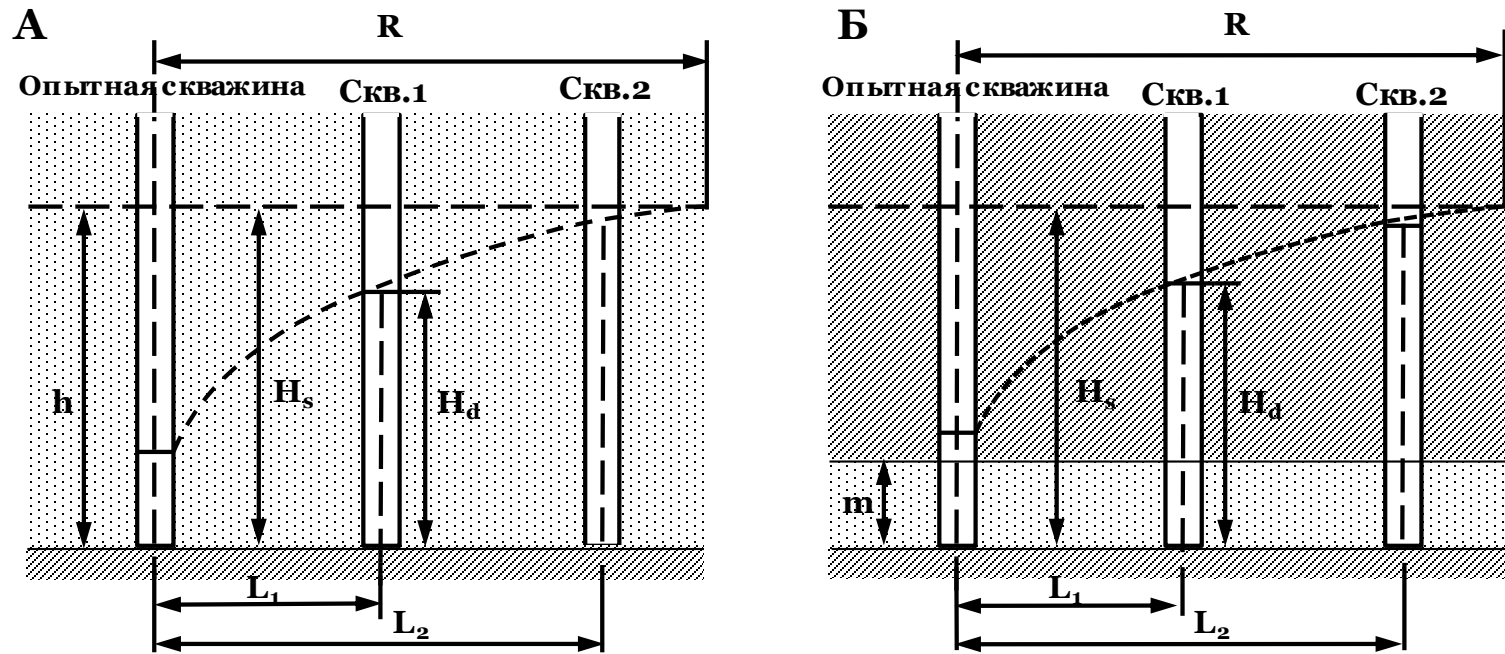
(пьезометрический уклон потока, гидравлический градиент)

$$I = (H_1 - H_2)/L = \Delta H/L$$



$H$  – напоры воды в любых двух сечениях,

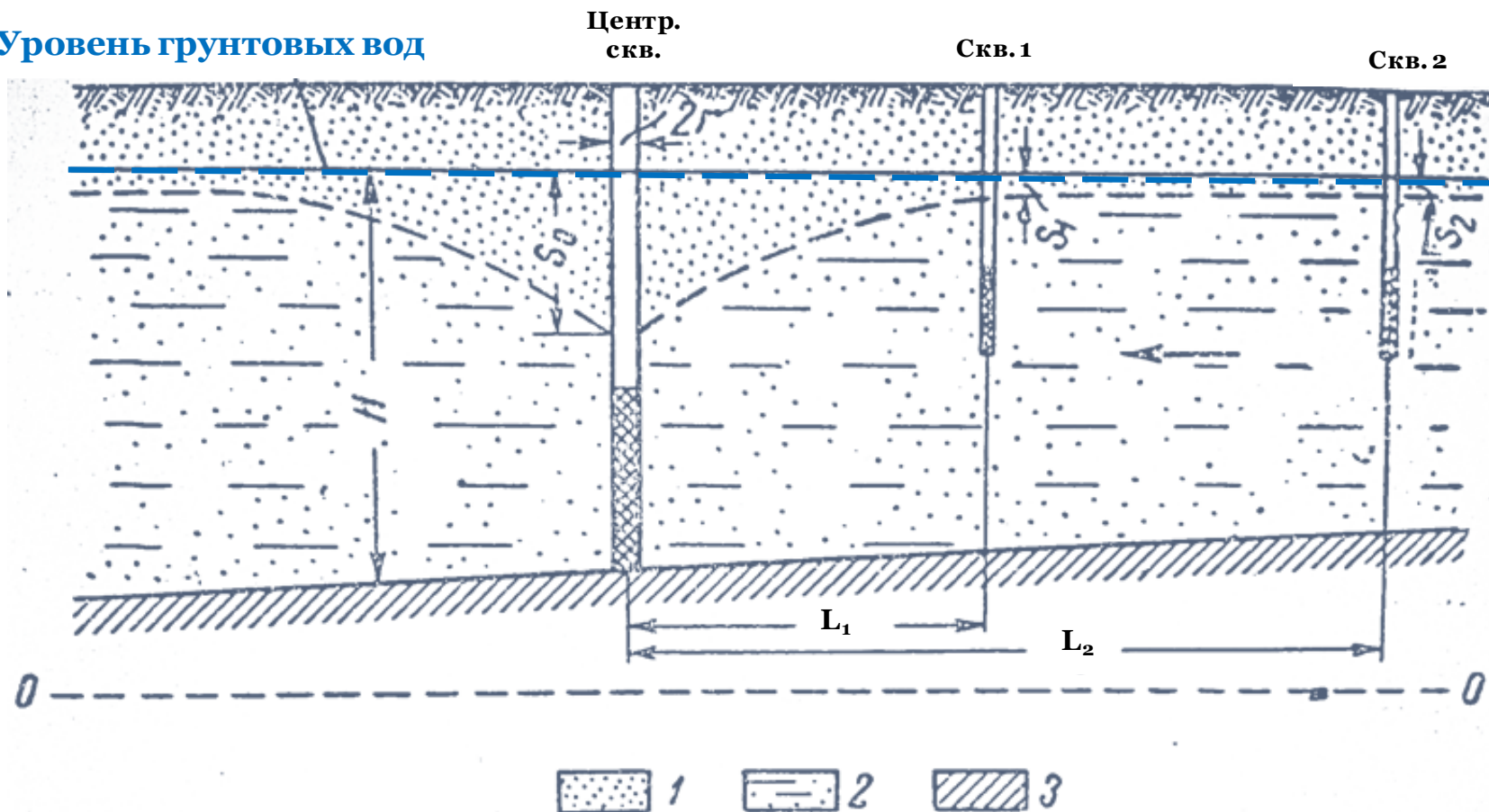
$L$  – расстояние между выбранными сечениями



**Схема куста скважин для безнапорного (А) и напорного (Б) водоносного горизонта**

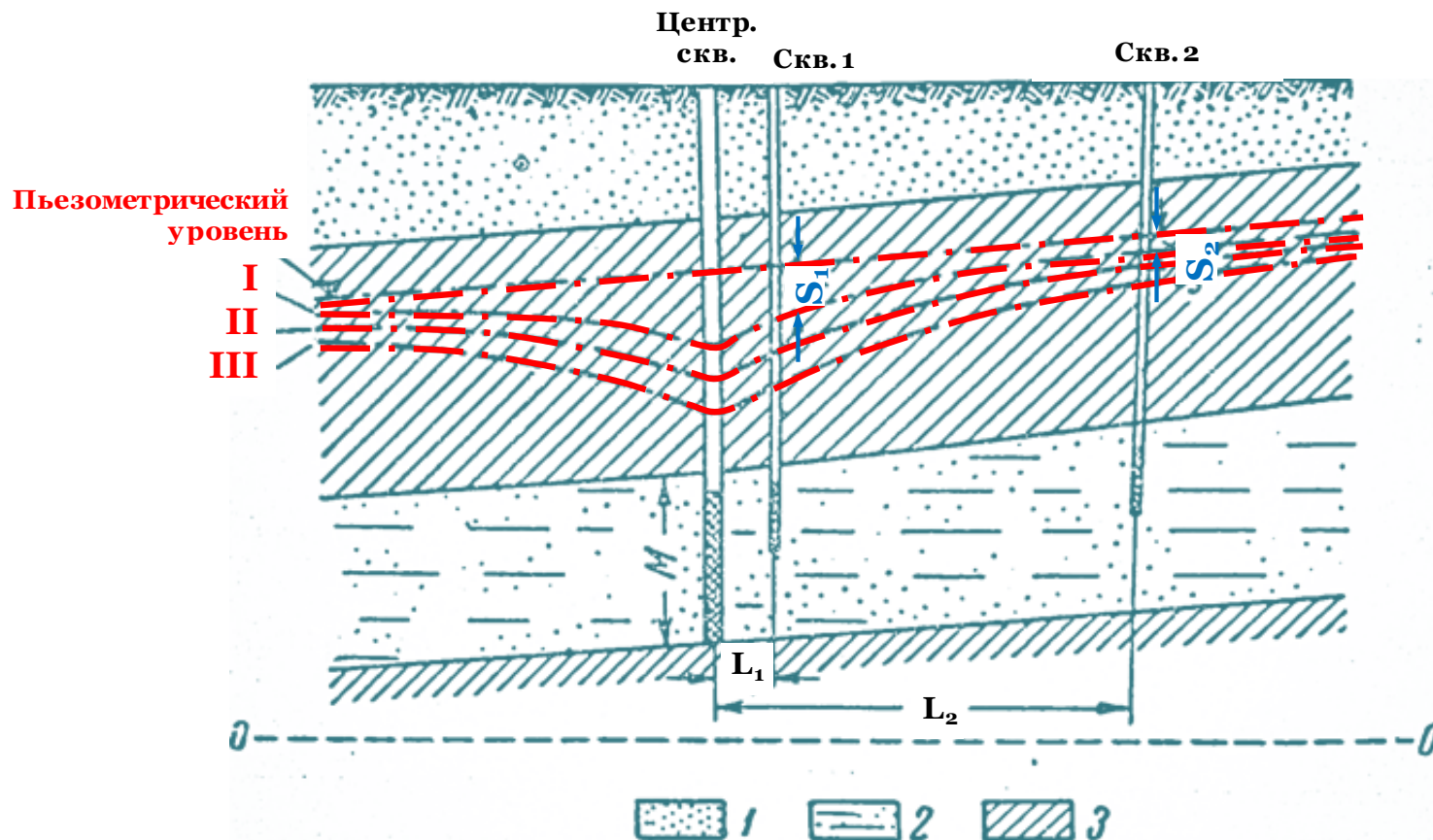
- $H_{s1-2}$  – статический уровень в 1 и 2 наблюдательных скважинах, м;
- $H_{d1-2}$  – динамический уровень в 1 и 2 наблюдательных скважинах, м;
- $R$  – радиус влияния опытной скважины, м;
- $L_1$  и  $L_2$  – расстояние от опытной скважины до наблюдательных (1 и 2), м;
- $m$  – мощность напорного водоносного горизонта, м;
- $h$  – мощность горизонта грунтовых вод, м;

## Уровень грунтовых вод



**Схема депрессионной воронки в безнапорном пласте при откачке из опытного куста скважин**

1 – песок; 2 – песок водоносный; 3 – глина.



**Схема депрессионной воронки в напорном пласте при откачке из опытного куста скважин при трех ступенях (I, II, III) понижения уровня**

1 – песок; 2 – песок водоносный; 3 – глина.

### 3. ЛИНИИ ТОКА И ЛИНИИ РАВНЫХ НАПОРОВ

**ЛИНИЯ ТОКА** - линия, которая касательна в каждой своей точке к вектору скорости частицы жидкости, находящейся в этой точке.

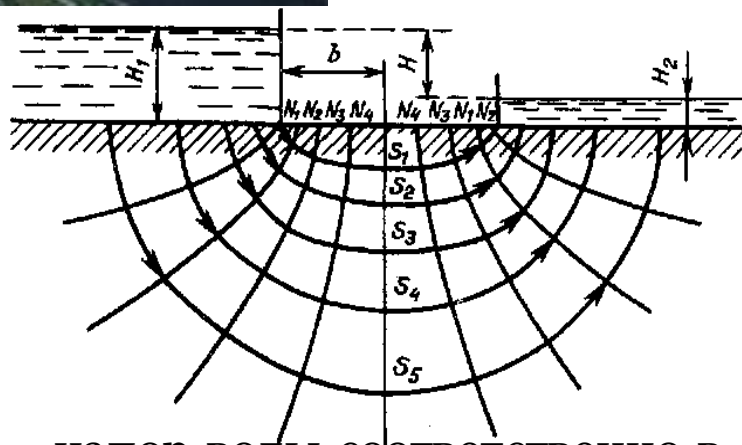
Линии, перпендикулярные к линиям токов, представляют собой **линии равных напоров** или **экипотенциали**.

Проекции линий равных напоров на горизонтальную плоскость представляют собой гидроизогипсы (для **??????????** вод) или гидроизопьезы (для **??????????** вод).





# Гидродинамическая сетка движения подземных вод под плотиной



$H_1$  и  $H_2$  — напор воды соответственно в верхнем и нижнем бьефе;  $H$  — разность напоров воды в нижнем и верхнем бьефе;  $b$  — половина ширины флютбета плотины;  $N_1, N_2, N_3, N_4$  — эквипотенциали;  $S_1, S_2, S_3, S_4$  — линии тока с указанием направления движения воды

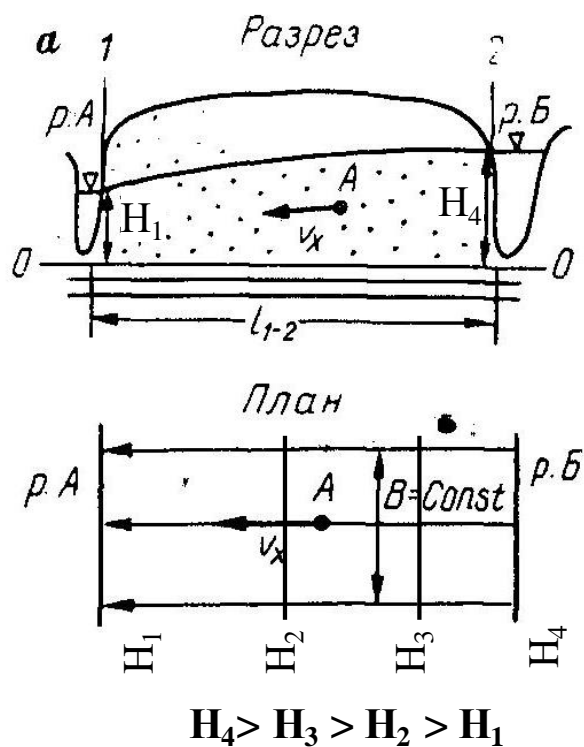
Система линий равных напоров и перпендикулярных к ним линий тока образует **гидродинамическую сетку** или, иначе говоря, **сетку движения подземных вод**.

В условиях

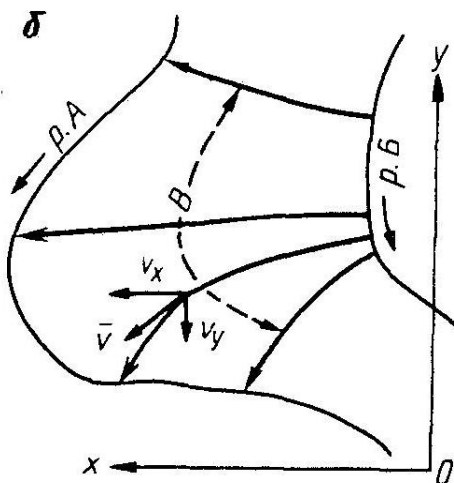
- установившегося движения гидродинамическая сетка будет постоянной во времени,
- в условиях неустановившегося движения — переменной.

# Типы потоков

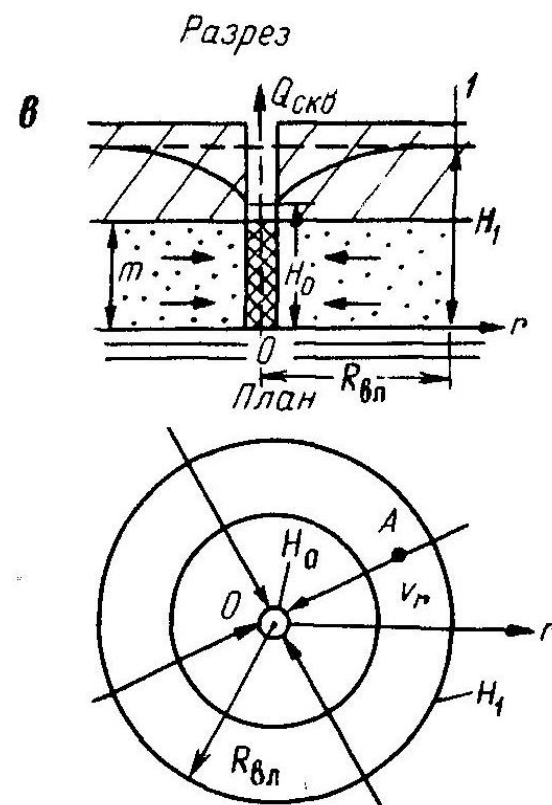
## Плоскопараллельный поток



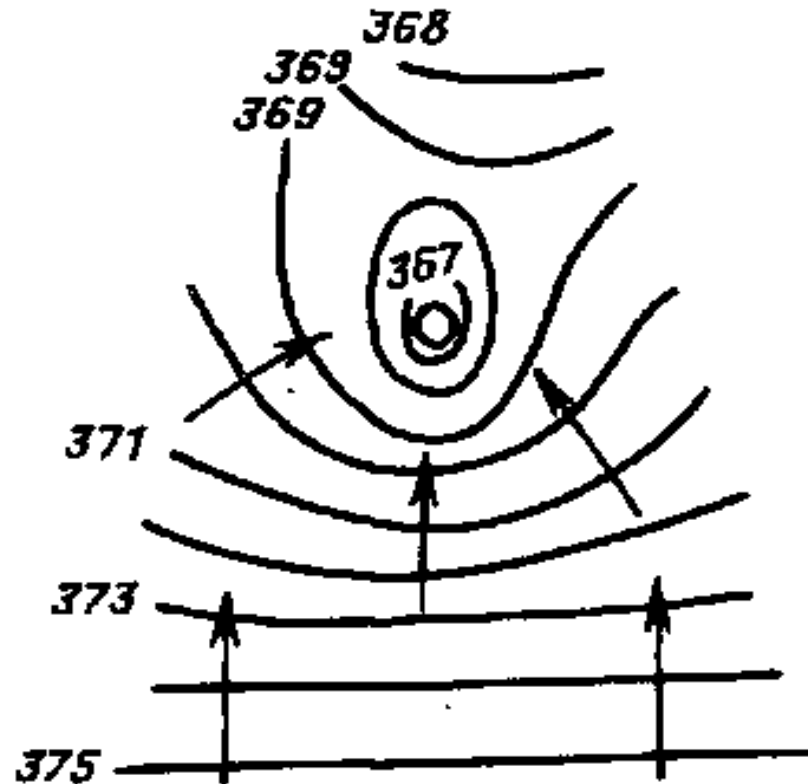
## Плоский поток



## Радиальный поток



# Радиальный сходящийся поток при откачке из скважины



*Стрелками показано направление движения воды*

# Границы фильтрационного потока

Верхняя граница - ??????

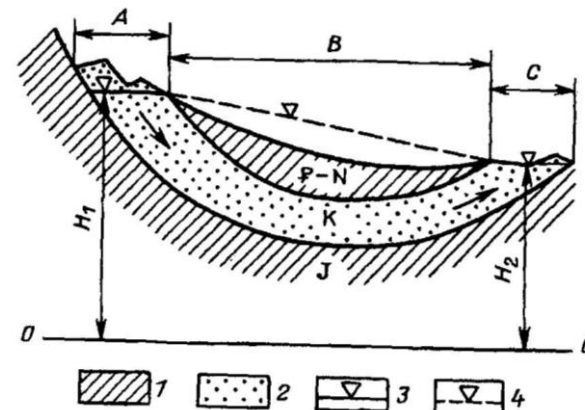
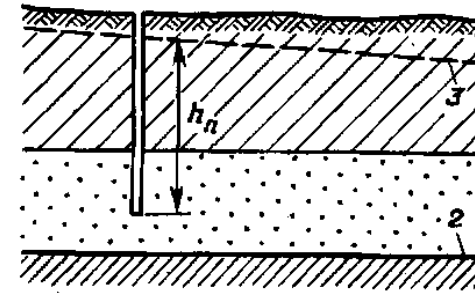
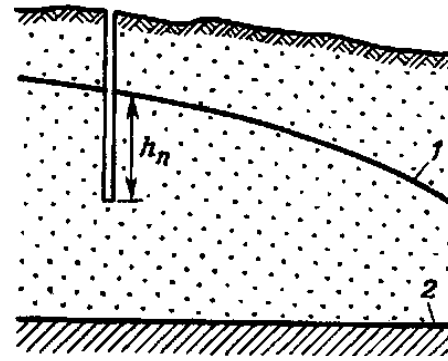
Нижняя граница - ???????

Боковые границы - ?????

Неограниченный поток

Полуограниченный поток

Ограниченный поток



**СКОРОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ** – это количество воды, которое протекает в единицу времени через единицу площади поперечного сечения пористой среды (м/сут, см/сут).

$$v = Q/F \text{ (теоретическая)}$$

Динамическая пористость (активная)

$$n_d = F_1/F$$

$$v_d = Q/F_1$$

$F_1$  – действительная площадь пористой среды

$F$  – общая площадь сечения пористой среды

$$V_{\partial} = Q/F_1 = Q/(n_{\partial}F) = v/n_{\partial}$$

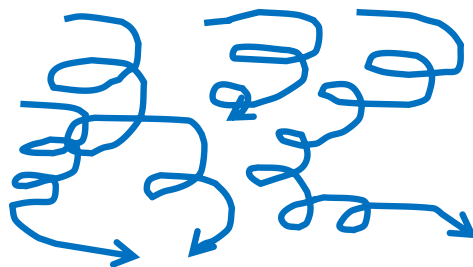
Таким образом, средняя действительная скорость движения воды  $V_{\partial}$  в пористой среде **всегда значительно выше** средней скорости фильтрации  $V$ , так как величина динамической пористости  $n_{\partial}$  всегда меньше 1.

Движение подземных вод по своему характеру может быть:

- Ламинарным



- Турбулентным



# **ЛИНЕЙНЫЙ ЗАКОН ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

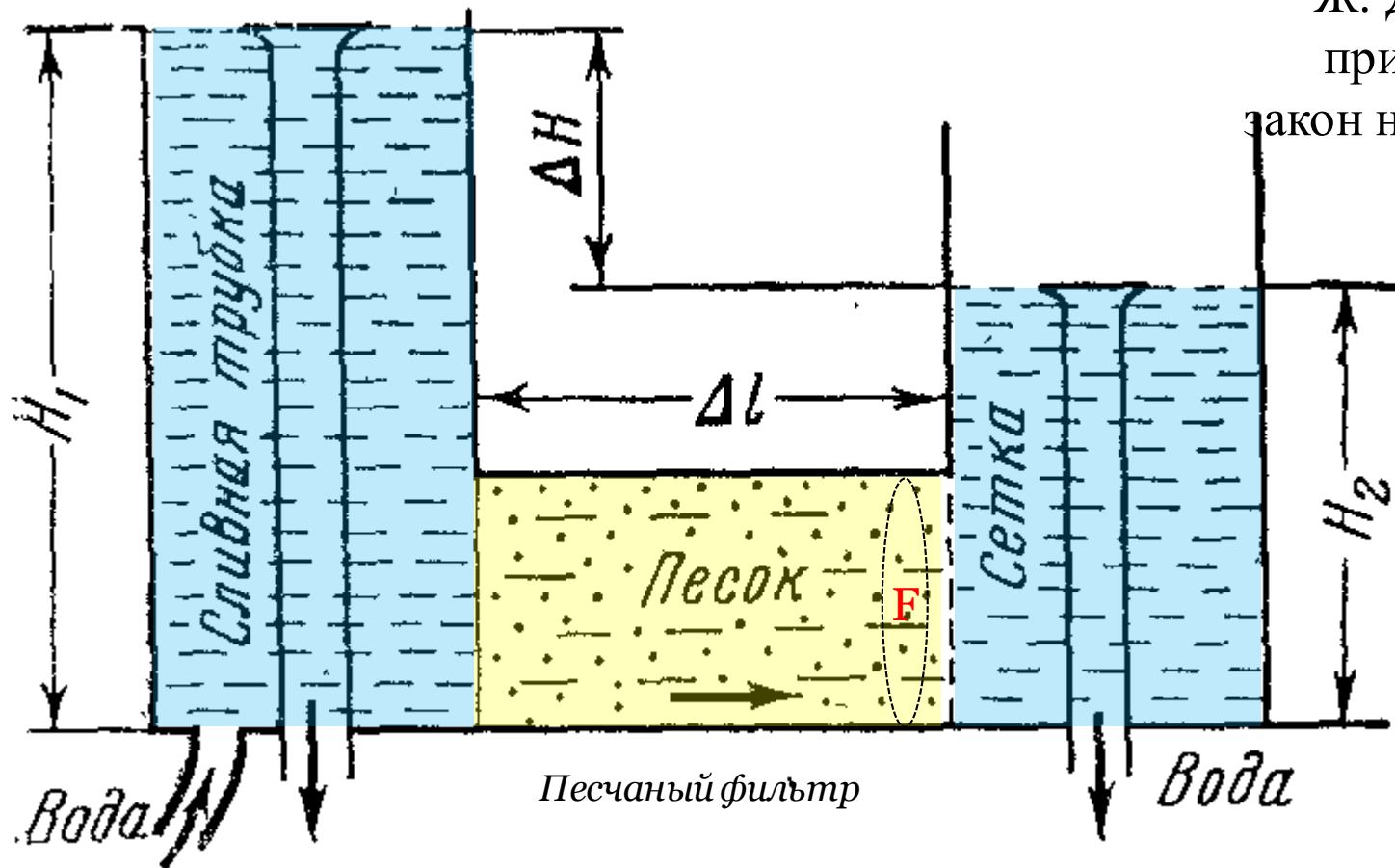
# **ЗАКОН ДАРСИ**



# СХЕМА ОПЫТА

1856 г.  
французский ученый  
**Анри Дарси**

Ж. Дюпюи  
применил  
закон на практике



**Количество воды  $Q$ , фильтрующейся через горную породу в единицу времени, прямо пропорционально площади поперечного сечения  $F$ , разности уровней  $\Delta H$ , под действием которой происходит фильтрация, и обратно пропорционально длине пути фильтрации  $L$**

$$Q = k \frac{(H_1 - H_2)}{L} F = k \frac{\Delta H}{L} F$$

???

$k$  – коэффициент фильтрации, зависящий от физических свойств породы и фильтрующейся жидкости, см/с, м/сут

## Ориентировочные значения коэффициента фильтрации для основных литологических разностей горных пород

Порода	Коэффициент фильтрации $k^*$ , м/сут	Порода	Коэффициент фильтрации $k^*$ , м/сут
Глины	0,001-0,01	Песок среднезернистый	5-15
Суглинки	0,01-0,1	Песок крупнозернистый	15-50
Супеси	0,1-0,5	Песок с галькой	50-100
Песок глинистый	0,5-1,0	Галечники	100-200
Песок мелкозернистый	1-5		

\* для пресных вод при температуре 25 °С

$$Q = k I F$$

$$Q/F = v = kI$$

$$\text{При } I = 1 \quad v = k$$

Таким образом, закон Дарси выражает линейную зависимость между скоростью фильтрации  $V$  и напорным градиентом  $I$

**Коэффициент фильтрации** характеризует водопроницаемость горных пород, величина которой зависит от размеров межпоровых промежутков в зернистых породах и ширины трещин в скальных горных породах.

$$\text{При } I = 1 \quad v = k$$

*м/сут, м/ч, м/с, см/с*

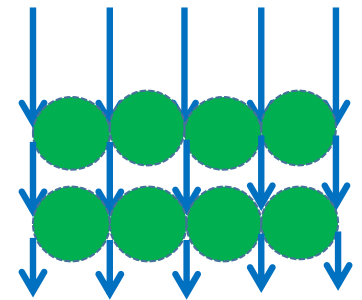
Коэффициент фильтрации зависит не только от свойств пористой среды, но и от свойств фильтрующейся жидкости.

$$v = -k (dH/dL)$$

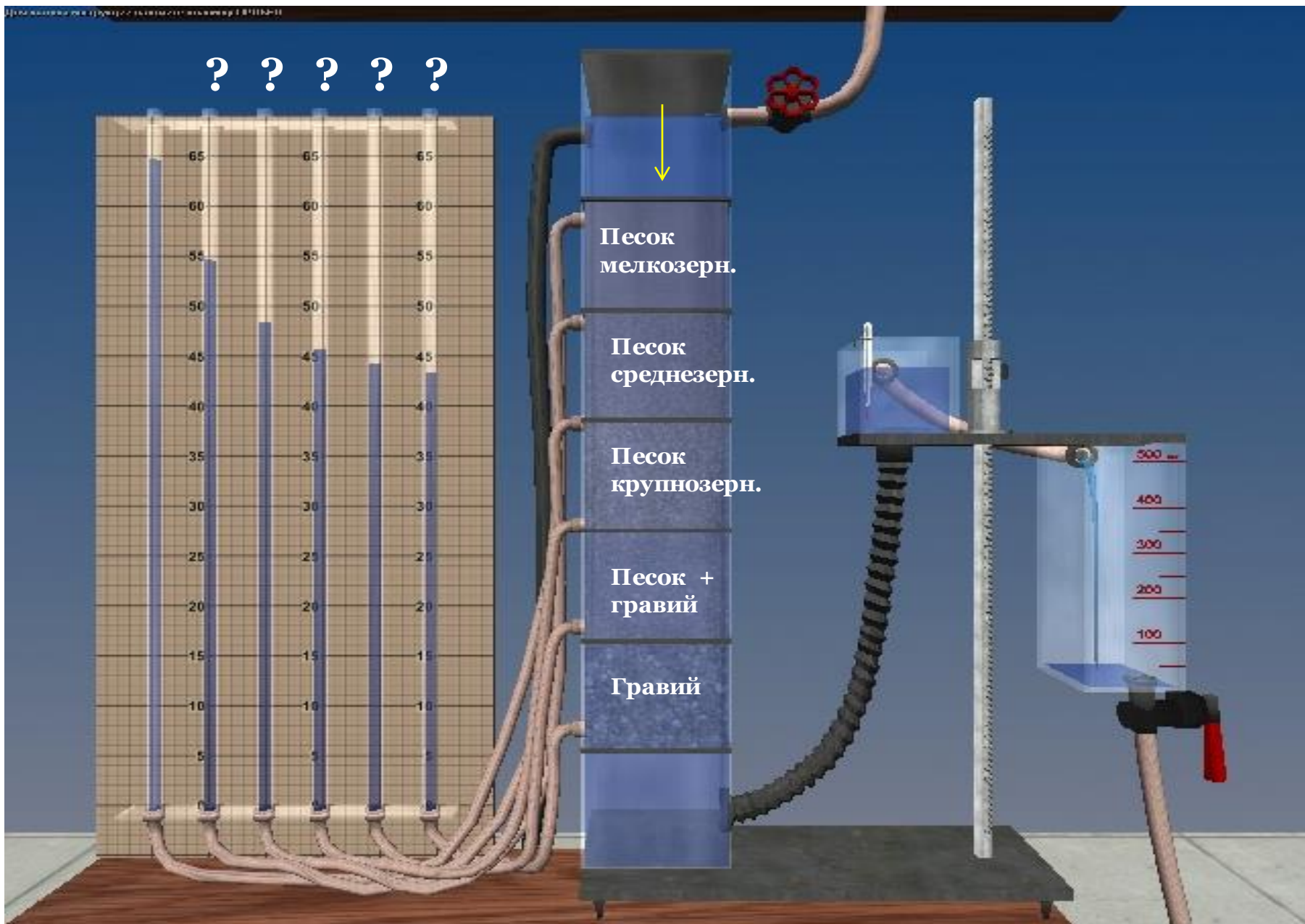
Знак минус показывает, что по пути фильтрации значение напора  $H$  уменьшается.

Потеря напора ( $I$ ) при фильтрации в пористой среде обусловлена **силами сопротивления**, которые возникают при обтекании водой горной породы за счет трения.

$$I = v/k = av, \text{ где } a = 1/k$$



?? ? ? ?



# **ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА ДАРСИ**



## ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА

Нарушение прямой зависимости между  $v$  и  $I$  в случае больших скоростей движения подземных вод - **критическая скорость фильтрации.**

В.Н. Щелкачев предложил определять границу между ламинарным и турбулентным движением подземных вод через число Рейнольдса

$$Re_{кр} = 10/n * (v\sqrt{k_n})/\nu$$

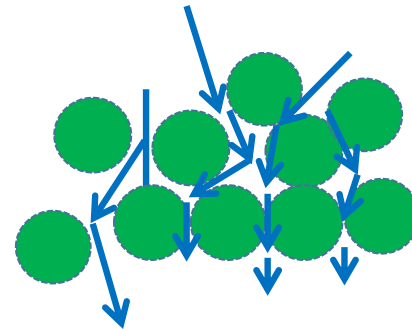
$$v_{кр} = (nRe_{кр}\nu)/10\sqrt{k_n}$$

$n$  - ????,  $\nu$  - ????,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $k_{II}$  - коэффициент проницаемости горных пород

Отклонение от линейного закона фильтрации происходит из-за **увеличения скорости движения** воды в пористой среде **при увеличении сил инерции**.

При большой скорости величины и направления скоростей жидких частиц **сильно изменяются** по причине извилистости каналов и непостоянства их поперечных размеров.

**Критическая скорость колеблется от 300 до 800 м/сут**



В случае высокой фильтрационной неоднородности (смешанный режим) наиболее достоверной формой закона фильтрации является

## Уравнение Прони

$$I = av + bv^2$$

$a$  и  $b$  – некоторые постоянные, зависящие от свойств пористой среды и фильтрующейся жидкости (определяются экспериментально).

При малых скоростях фильтрации  $bv^2$  можно пренебречь = закону Дарси.

При больших скоростях  $av$  можно пренебречь

Нелинейный закон фильтрации (**для турбулентного движения**)

**Формула Шези-Краснопольского**

$$v = \sqrt{I/b} = kv\sqrt{I}$$

**!!!! Отклонение от закона Дарси не всегда указывает на переход ламинарного движения подземных вод в турбулентное !!!!**

# НИЖНИЙ ПРЕДЕЛ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА

При очень малых значениях скоростей и градиентов  
( $I=0,00003-0,00004$ )

## Фильтрация в глинистых породах

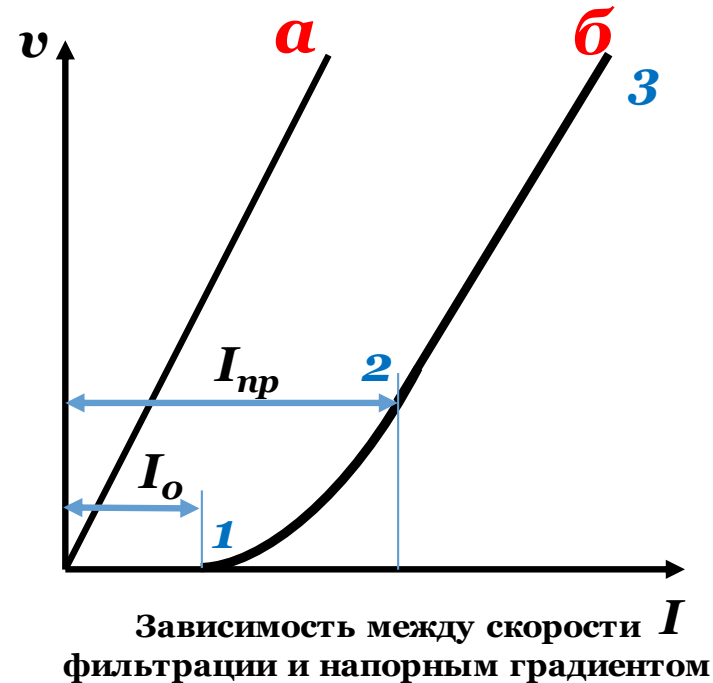
**а** – фильтрация в песчаных породах

**б** – фильтрация в глинистых породах

$I_0$  – начальный напорный градиент

$I_{пр}$  – предельный напорный градиент

$$v = k (I - I_{пр}) = k (I - 4/3 I_0)$$



При превышении значений начального градиента начинается фильтрация воды (нелинейный характер зависимости  $v$  от  $I$  (1-2)), и после превышения значения  $I_{пр}$  начинает действовать закон Дарси (линейный характер (2-3))

## **КОЭФФИЦИЕНТ ВОДОПРОВОДИМОСТИ** –

выражает способность водоносного горизонта (комплекса) мощностью  $m$  или  $h$  и шириной 1 м фильтровать воду в единицу времени при напорном градиенте, равном 1.

$$T = km \text{ или } T = kh, \text{ м}^2/\text{сут}$$

$m$  и  $h$  – средняя мощность напорного и безнапорного водоносного горизонта