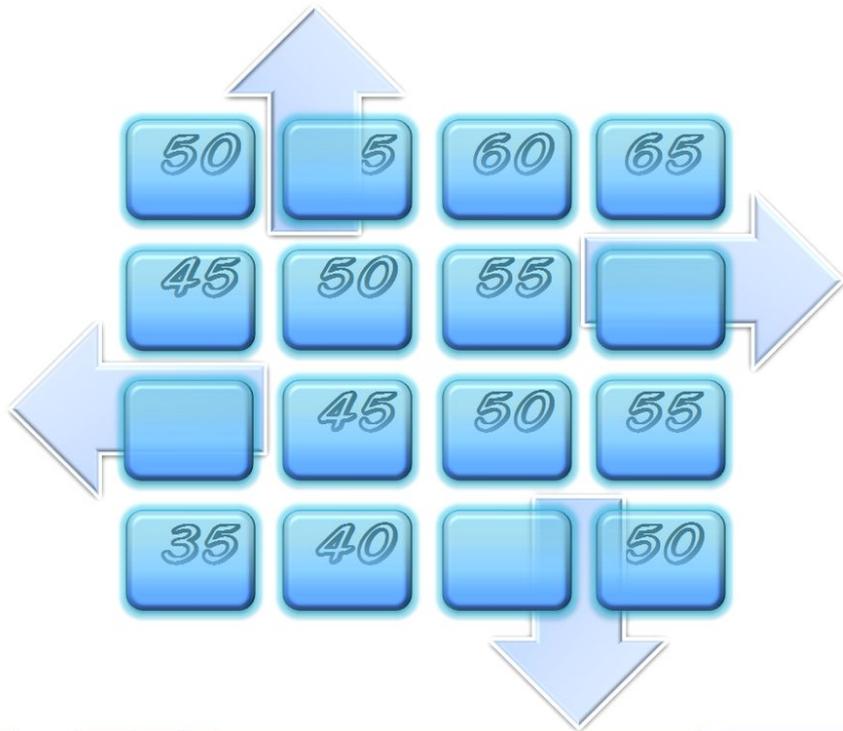


Гидродинамика флюидных систем и моделирование гидродинамических процессов



Лекция № 2
Основной закон фильтрации
Напорный водоносный горизонт

Кафедра гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии ИПР ТПУ
доцент Кузеванов К.И.

Условия залегания подземных вод

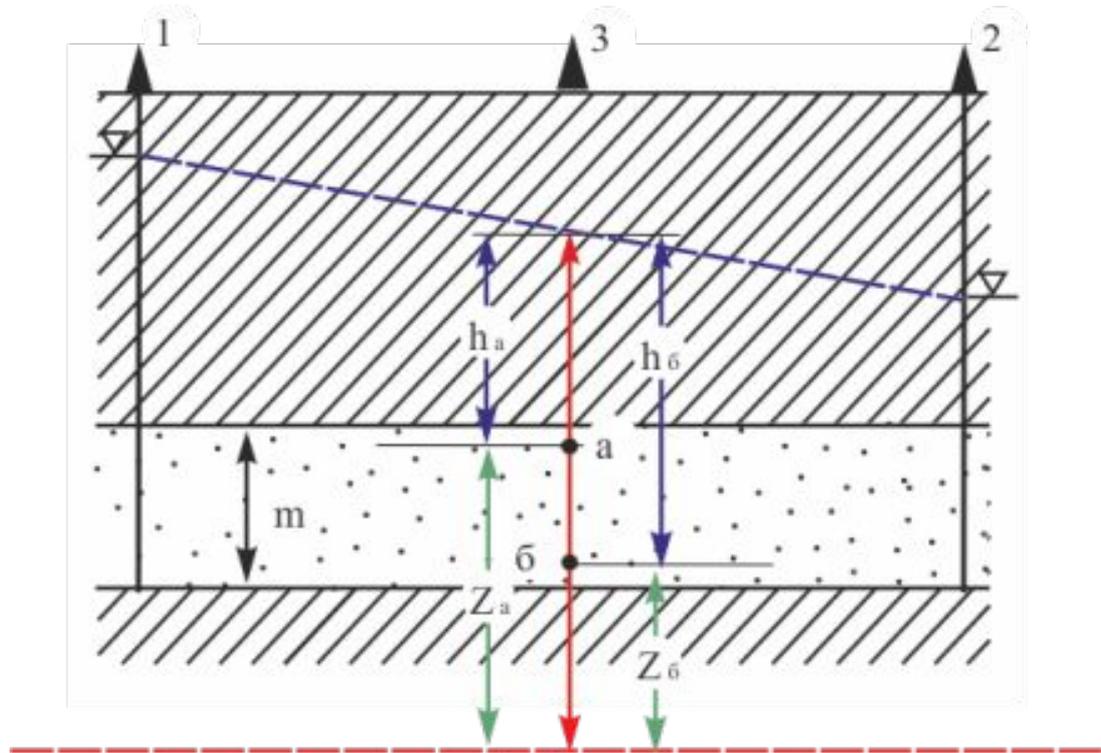
- Определение водоносного горизонта
- Напорный водоносный горизонт
- Безнапорный водоносный горизонт
- Верховодка

Элементы естественных фильтрационных потоков

- Кровля водоносного горизонта
- Подошва водоносного горизонта
- Мощность водоносного горизонта
- Зеркало подземных вод (уровень грунтовых вод)
- Пьезометрическая поверхность
- Гидроизогипсы
- Гидроизопьезы
- Область питания подземных вод (водоносного горизонта)
- Область разгрузки подземных вод (водоносного горизонта)
- Область распространения подземных вод (водоносного горизонта)

Напор как важнейшее понятие гидрогеодинамики

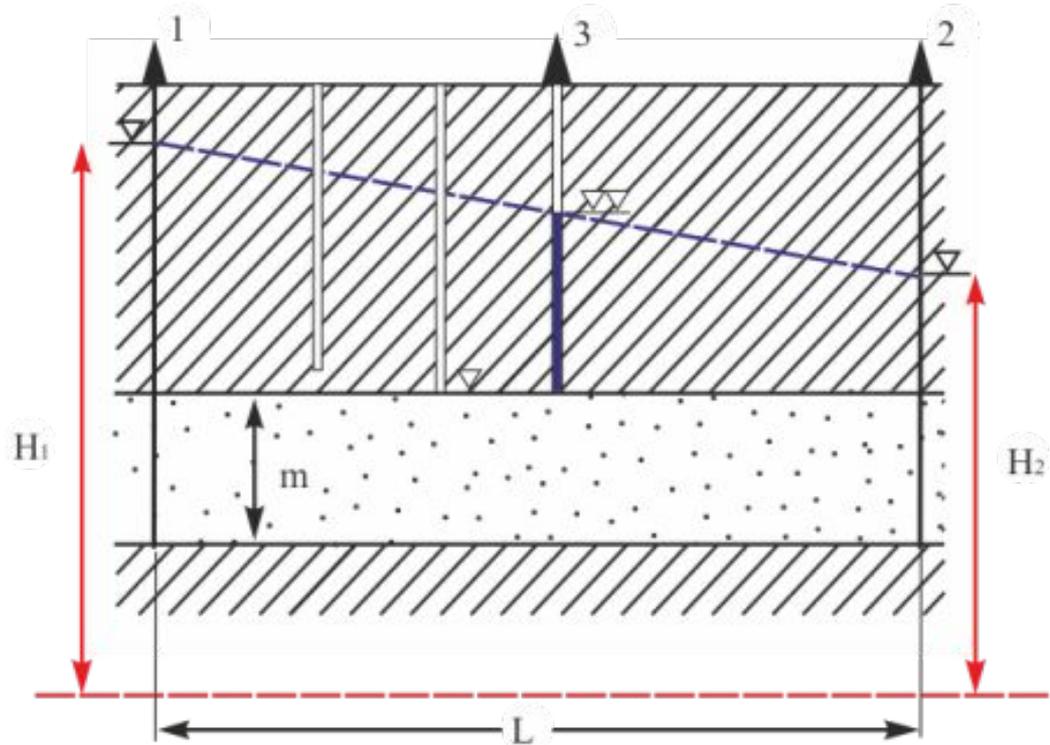
- Напор как пьезометрическая высота над кровлей напорного водоносного горизонта (общая гидрогеология)
- Напор как мера потенциальной энергии фильтрационного потока (гидрогеодинамика)
- Напор как инструмент определения направления фильтрации подземных вод в напорных и безнапорных водоносных горизонтах



$$H_a = h_a + z_a; H_б = h_б + z_б;$$

$$H_a = H_б = H_3;$$

Напор не изменяется с глубиной
потока



Появившийся и установившийся уровень подземных вод в скважине,
вскрывшей

напорный водоносный горизонт

Основным законом фильтрации является закон Дарси, устанавливающий количественную связь между скоростью фильтрационного потока и затратами энергии на преодоление фильтрационного сопротивления водовмещающих пород.

Применение закона Дарси для анализа гидрогеологических условий даёт возможность расчётным путём вычислить скорость фильтрационного потока в толще водовмещающих пород, безошибочно оценивать направление фильтрационного потока, косвенным расчётным способом оценить расход фильтрационного потока, рассчитать положение уровней подземных вод на произвольно выбранном расстоянии между двумя гидрогеологическими скважинами и т.д.

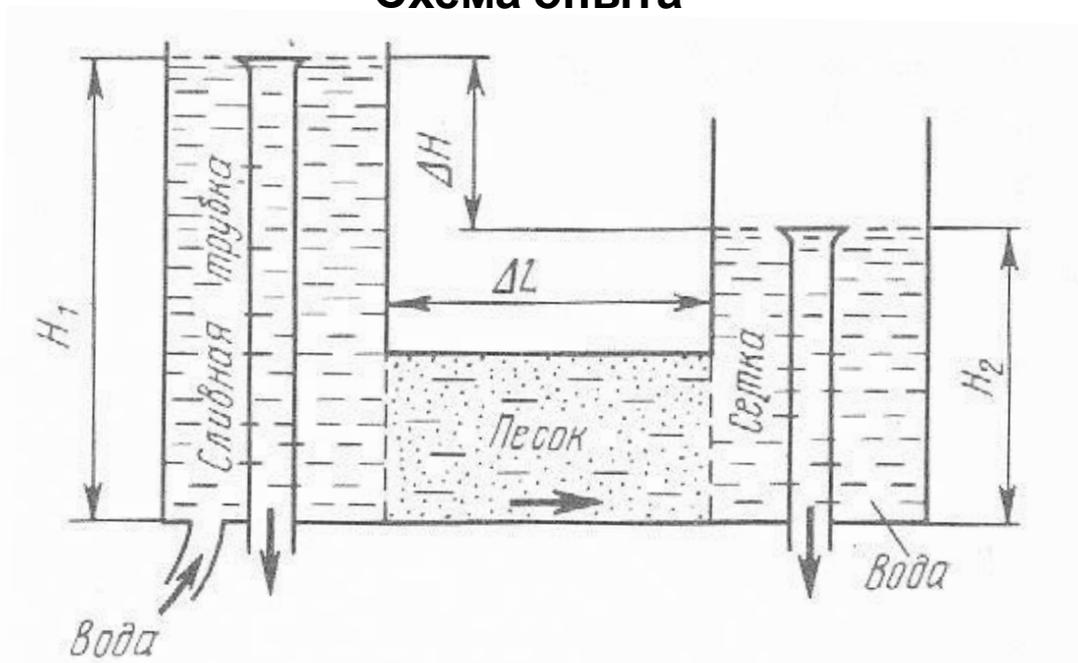


Анри Филибер Гаспар Дарси (фр. Henry Philibert Gaspard Darcy, 10 июня 1803, Дижон, — 2 января 1858, Париж) — французский инженер-гидравлик, обосновавший закон Дарси (1856), связывающий скорость фильтрации жидкости в пористой среде с градиентом давления:

«По-видимому, для песка одного качества, пропускаемый им расход прямо пропорционален напору и обратно пропорционален толщине фильтрующего слоя (грунта)».

Именем Дарси названа единица измерения проницаемости пористой среды.

Схема опыта

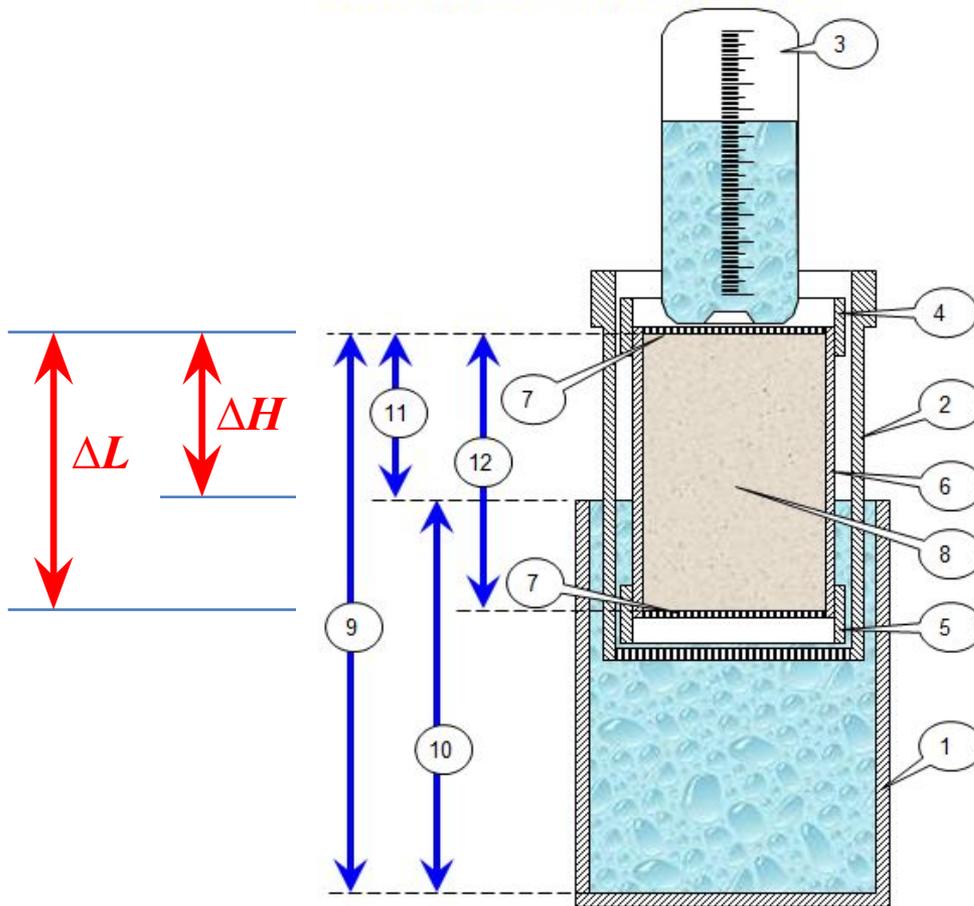


На торцах образца поддерживаются постоянные напоры (уровни воды H_1 и H_2) при помощи водосливных трубок (водосливов).

Установлено, что количество воды Q , фильтрующейся через песчаный фильтр (образец горной породы) прямо пропорционально площади поперечного сечения F ,

разности уровней $\Delta H = H_1 - H_2$, под действием которой происходит фильтрация и обратно пропорционально пути фильтрации ΔL , измеряемой по направлению движения воды.

Конструкция прибора КФЗ



- 1 Внешний стакан с внутренней резьбой (корпус)
- 2 Внутренний подвижный стакан с внешней резьбой и перфорированным дном
- 3 Сосуд Мариотта со шкалой объемов в см³
- 4 Верхняя крышка режущего кольца с зажимами для крепления сосуда Мариотта
- 5 Нижняя крышка режущего кольца
- 6 Режущее кольцо
- 7 Сетки на торцах режущего кольца против размывания образца
- 8 Испытуемый образец грунта
- 9 Максимальный напор на верхнем торце образца
- 10 Минимальный напор на нижнем торце образца
- 11 Величина действующего напора
- 12 Длина пути фильтрации

$$k=Q / (F \cdot I)$$

$$K=dV / (dT \cdot F \cdot I)$$

где	dV	Объем профильтровавшейся жидкости
	dT	Время фильтрации
	F	Площадь фильтрации (25 см ²)
	I	Гидравлический уклон

Конструкция прибора обеспечивает постоянные величины напоров на противоположных торцах исследуемого образца горной породы

во время проведения опыта ($I = \text{const}$)

Процессы движения воды при полном водонасыщении горных пород называются процессами фильтрации.

Под фильтрацией следует понимать движение гравитационной воды в зоне насыщения.

Скорость фильтрации прямо пропорциональная градиенту напора:

$$V \sim I;$$

$$V = k * I;$$

Градиент – мера изменения какой-либо физической величины в пространстве.

Градиент напора для одномерного фильтрационного потока – изменение напора на один метр длины пути фильтрации или первая производная напора по расстоянию (длине пути фильтрации).

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

Коэффициент фильтрации, выступающий в лаконичной формулировке закона Дарси коэффициентом пропорциональности, характеризует фильтрационные параметры водовмещающих горных пород численно равен скорости фильтрации при градиенте напора, равном единице и зависит как от свойств фильтрующейся жидкости, так и от свойств горной породы.

Таким образом, коэффициент фильтрации образца одной и той же горной породы будет различным для нефти, газа и чистой воды, что не всегда удобно для гидродинамических расчётов в глубоких водоносных горизонтах. В этих случаях используют коэффициент проницаемости.

Коэффициент проницаемости характеризует только фильтрационную способность

пористой среды и не зависит от свойств фильтрующегося флюида.

$$\frac{k}{\gamma} = \frac{k_{\Pi}}{\mu};$$

$$k = \frac{k_{\Pi} * \gamma}{\mu};$$

$$k_{\Pi} = \frac{k * \mu}{\gamma} = \frac{k * \nu}{g};$$

$\gamma = \rho g$ – удельный вес воды (н/м³);

μ – динамический коэффициент вязкости воды (Па·с);

ν – кинематический коэффициент вязкости (м²/с);

Коэффициент проницаемости k_n имеет размерность площади и измеряется в квадратных сантиметрах.

В практике гидродинамических расчётов используют единицу проницаемости Дарси ($1,02 * 10^{-8} \text{ см}^2 = 1 \text{ мкм}^2$).

За единицу проницаемости 1 Дарси принимается проницаемость образца горной породы площадью 1 см^2 , через который при перепаде давления $\Delta P = 0,1 \text{ мПа}$ (1 атм) на длине $\Delta L = 1 \text{ см}$ и динамической вязкости $\mu = 0,001 \text{ Па/с}$ идет фильтрация со скоростью $\nu = 1 \text{ см/с}$.

Коэффициенты фильтрации

Коэффициенты фильтрации и проницаемости для различных пород и грунтов

Горные породы	Пористость, %	Кп, мкм ²	К, м/сут
Глинистый известняк	2	$1 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$
Известняк	16	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Илистый песчаник	12	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Грубый песчаник	12	1,1	$9,4 \cdot 10^{-4}$
Песчаник	29	2,4	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Мелкозернистый песок	-	9,9	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Среднезернистый песок	-	$2,6 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Крупнозернистый песок	-	$3,1 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^0$
Гравий	-	$4,3 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^1$
Монтмориллонит	-	10^{-5}	$4,7 \cdot 10^{-9}$
Каолинит	-	10^{-3}	$4,7 \cdot 10^{-7}$
Глинистый известняк	2	$1 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$

Коэффициенты фильтрации для основных литологических разностей

горных пород

Горные породы	Коэффициент фильтрации, м/сут
Галечники	200 – 100
Пески с галькой	100 – 50
Пески крупнозернистые	50 – 15
Пески среднезернистые	15 – 5
Пески глинистые	1,0 – 0,5
Супеси	0,5 – 0,1
Суглинки	0,1 – 0,001
Глины	< 0,001

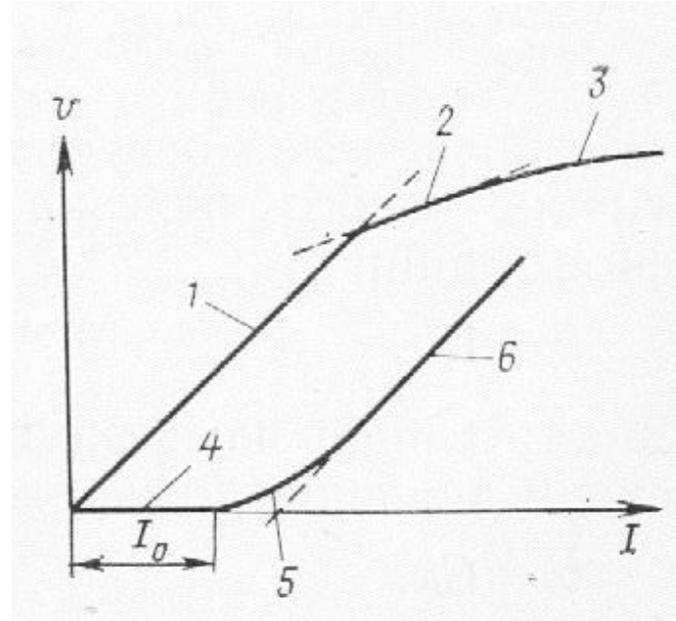
Пределы применимости закона Дарси

Закон Дарси является линейным законом фильтрации, так как показывает, что скорость фильтрации линейно связана с градиентом напора (кривая 1). Это условие равновесия силы гидростатического давления ($\Delta H/L$) и сил внутреннего сопротивления (v/k):

$$V = k * I;$$

$$V = k * \frac{\Delta H}{L};$$

$$\frac{V}{k} = \frac{\Delta H}{L};$$

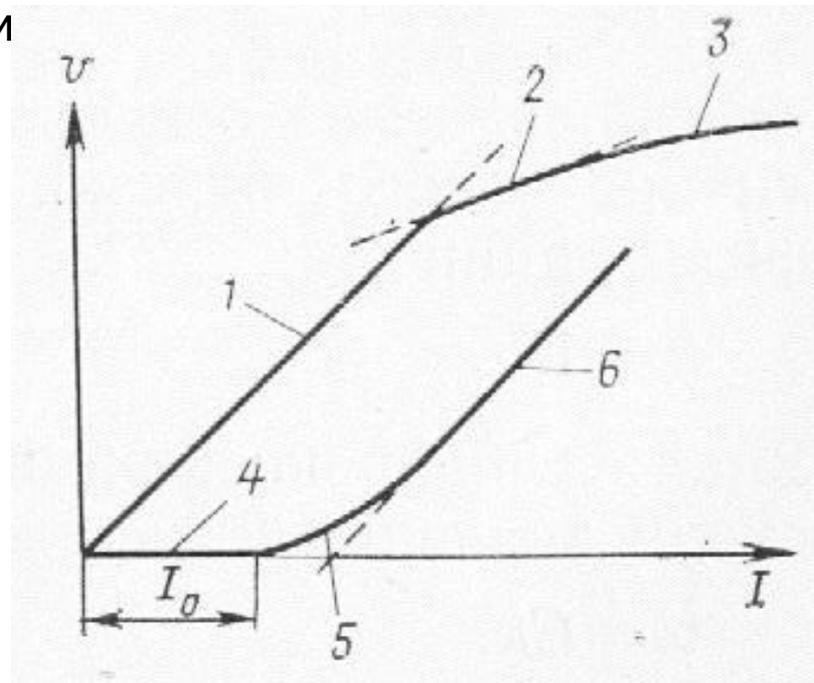


Очень часто эта зависимость справедлива, но бывают условия, в которых закон Дарси нарушается. Существуют верхний и нижний предел его применимости.

Пределы применимости закона Дарси

Верхний предел определяет справедливость использования закона Дарси при больших скоростях фильтрации в породах с высокими фильтрационными свойствами, когда ламинарный режим фильтрации переходит в турбулентный поток

(кривые 2, 3). Такие условия работы инженерных сооружений.

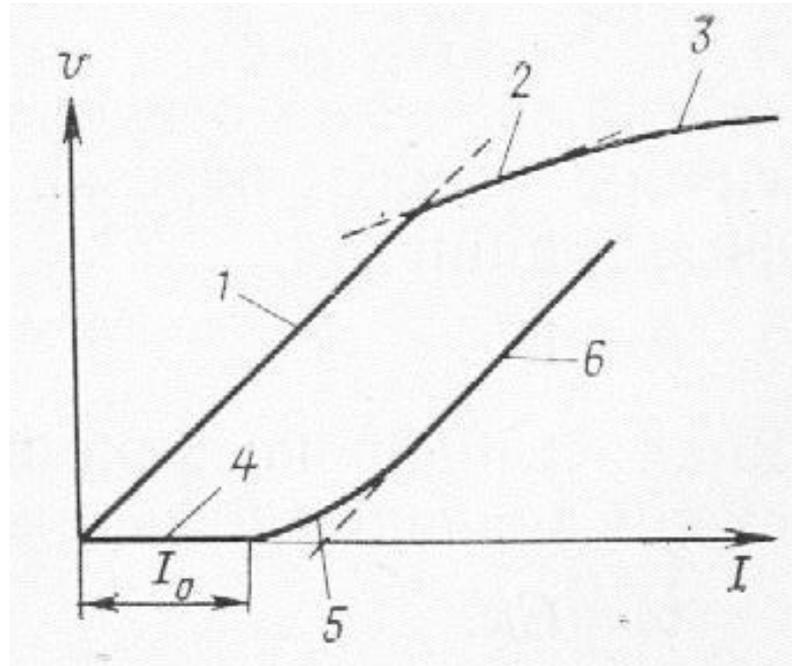


работы

Переходный режим с кажущимся коэффициентом фильтрации k' (кривая 2).
Нарушение линейной зависимости (кривая 3):
$$I = \frac{k}{\alpha} * (1 + \alpha v);$$

Пределы применимости закона Дарси

В слабопроницаемых горных породах линейная зависимость закона Дарси нарушается при проявлении нижнего проявления предела его применимости (кривые 4, 5, 6).



Возникает начальный градиент I_0 (кривая 4). С ростом градиента часть физически связанной воды переходит в свободную растёт суммарная площадь сечения потока увеличивается коэффициент фильтрации (кривая 5). Прекращение изменения количества физически связанной воды приводит к стабилизации коэффициента фильтрации (кривая 6).

Скорость фильтрации является расчётной (фиктивной) величиной и не учитывает наличие скелета горной породы. Фильтрационный поток пронизывает и поровое пространство и минеральный скелет горной породы.

Если учесть наличие скелета и выразить величину свободного порово-трещинного пространства через динамическую пористость n , то площадь сечения потока F

$$Q = v * F = k * I * F;$$

следует умножить на n и тогда будет получена формула для выражения действительной скорости движения подземной воды

где u – действительная скорость движения подземных вод, м/сут;

Q – расход фильтрационного потока, м³/сут;

n – пористость, д.е.;

F – площадь поперечного сечения фильтрационного потока, м²;

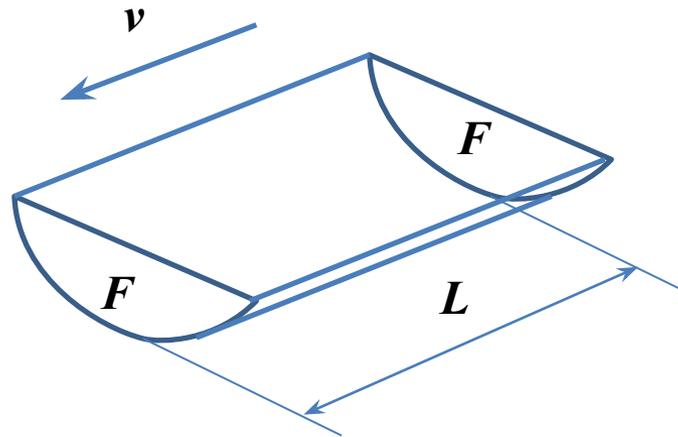
v – скорость фильтрации, м/сут.

Для любого
потока:

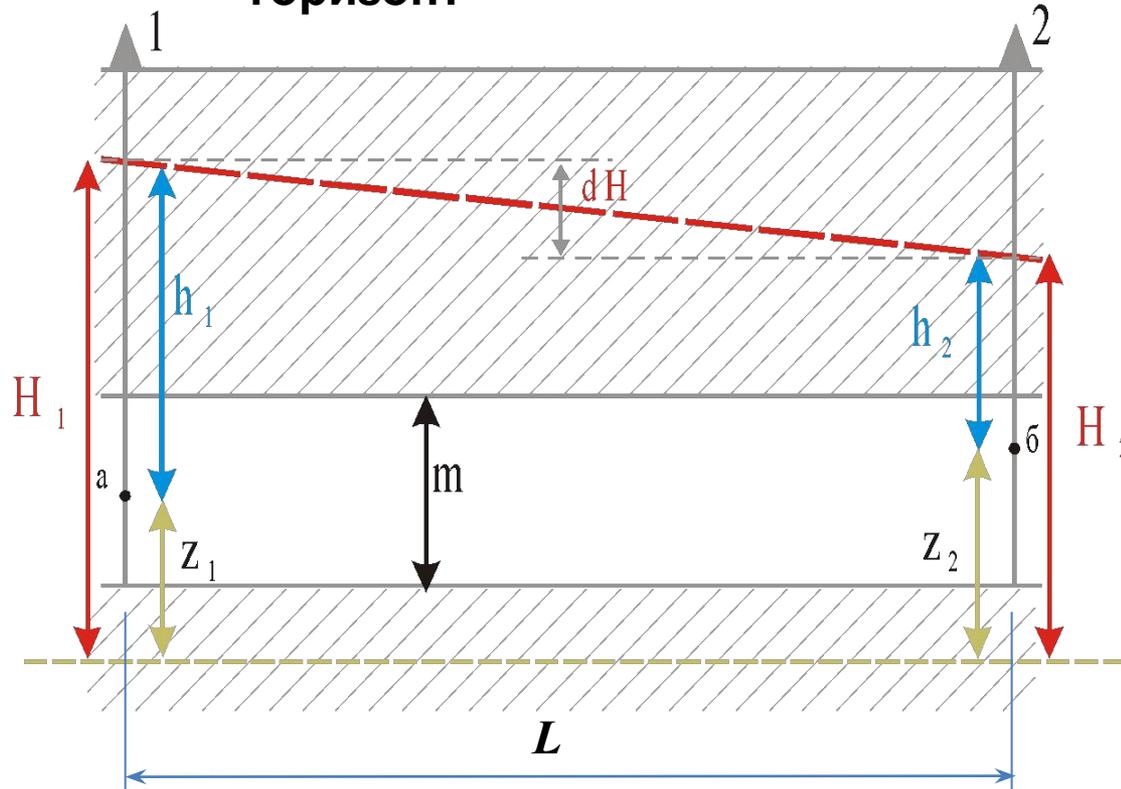
$$Q = v * F;$$

где Q – расход потока (объем в единицу времени);
 v – скорость потока;
 F – площадь поперечного сечения потока.

Схема к расчёту расхода открытого водотока



Напорный водоносный горизонт



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

H – напор, м

h – пьезометрическая высота, м

z – высотное положение точки, м

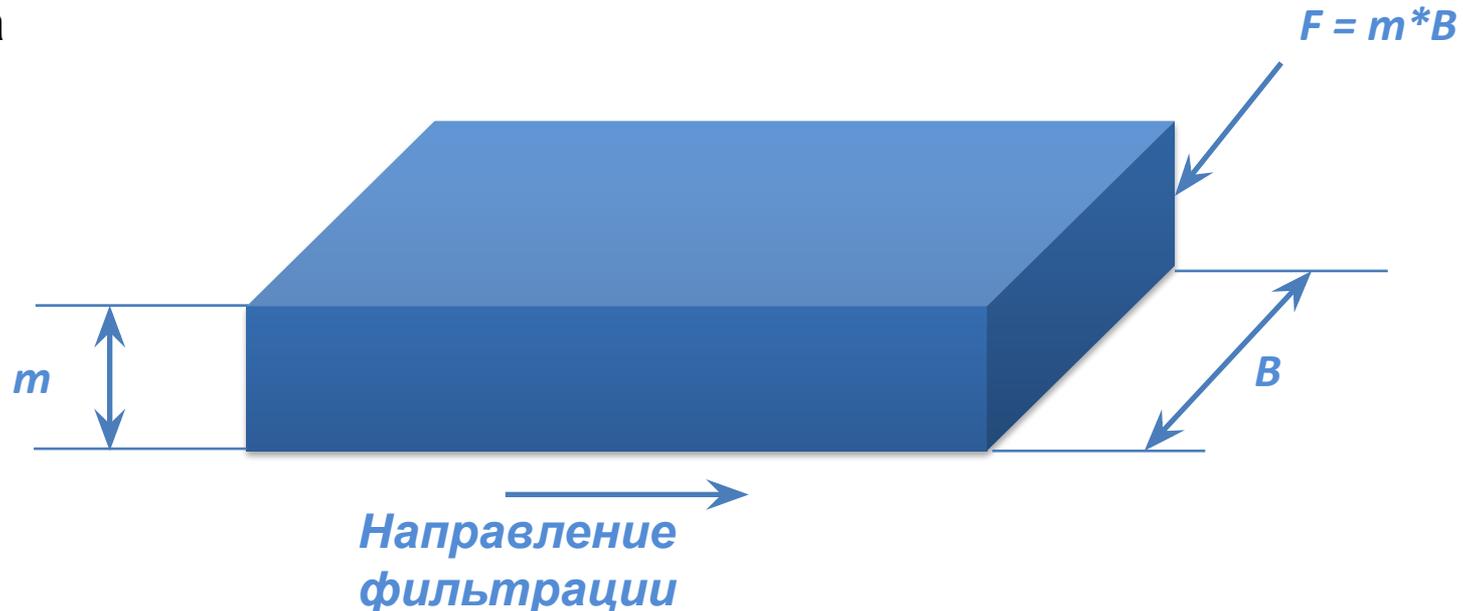
$a, б$ – точки водоносного горизонта, в которых определяется напор, м

m - мощность напорного водоносного горизонта, м

L - длина области фильтрации, м

Расход фильтрационного потока

В условиях реального геологического разреза весьма сложно определить истинные размеры водоносного горизонта (ширину фронта фильтрационного потока), что может технически сдерживать количественную оценку расхода фильтрационного потока



m – мощность водоносного горизонта, м;

B – ширина фильтрационного потока (водоносного горизонта), м;

F – площадь поперечного сечения фильтрационного потока, м²

В гидрогеологической практике для определённости расчётов введено понятие **единичного расхода** фильтрационного потока.

Под **единичным расходом** фильтрационного потока понимается расход потока шириною один метр. В этом случае рассматривается фильтрация через единичную площадку с размером:



m – мощность водоносного горизонта, м;

B – ширина фильтрационного потока (водоносного горизонта), м;

f – единичная площадка поперечного сечения фильтрационного потока, м^2

Напорный водоносный горизонт

Для расчёта единичного расхода фильтрационного потока напорного водоносного

горизонта скорость фильтрации определяется через закон Дарси ($v=k \cdot l$), а площадь поперечного сечения потока задаёт единичная площадка ($f = m \cdot 1$):

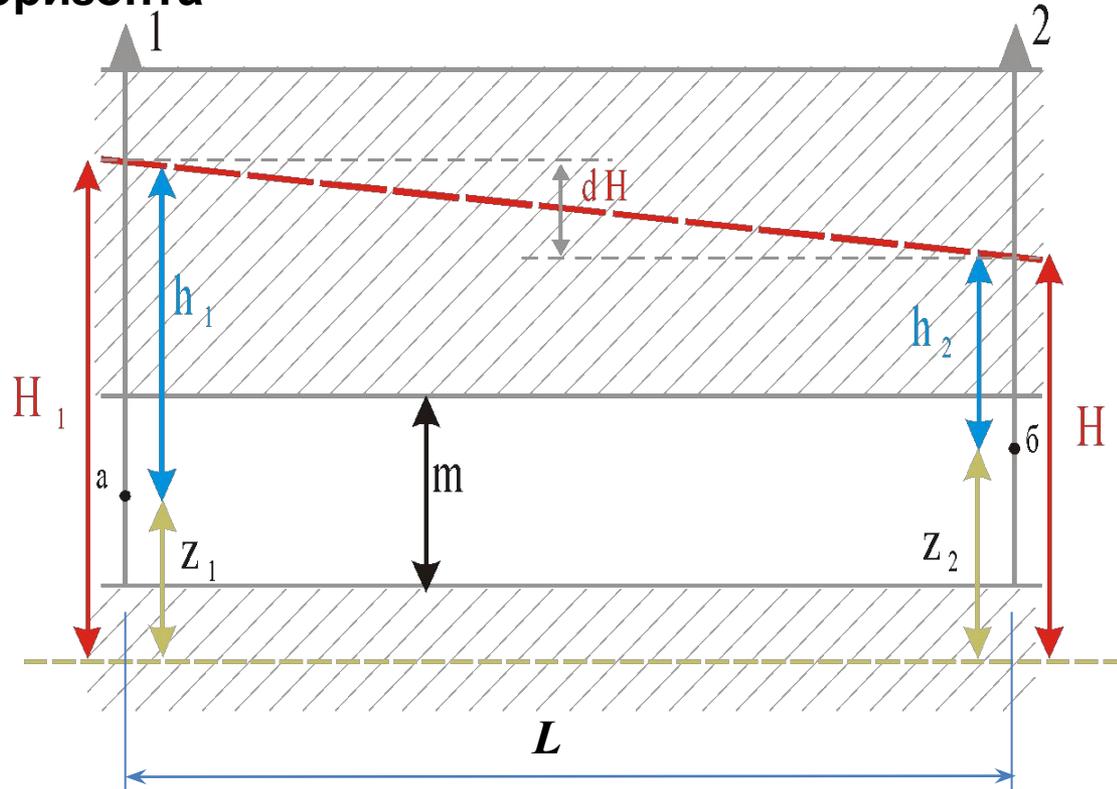
$$q = k \cdot l \cdot m \cdot 1 = k \cdot \frac{H_1 - H_2}{L} m \cdot 1;$$

или в каноническом виде:

$$q = km \frac{H_1 - H_2}{L};$$

где q – единичный расход фильтрационного потока;
 k – коэффициент фильтрации водовмещающих пород;
 m – мощность водоносного горизонта;
 H_1, H_2 – напоры на границах области фильтрации;
 L – длина области фильтрации.

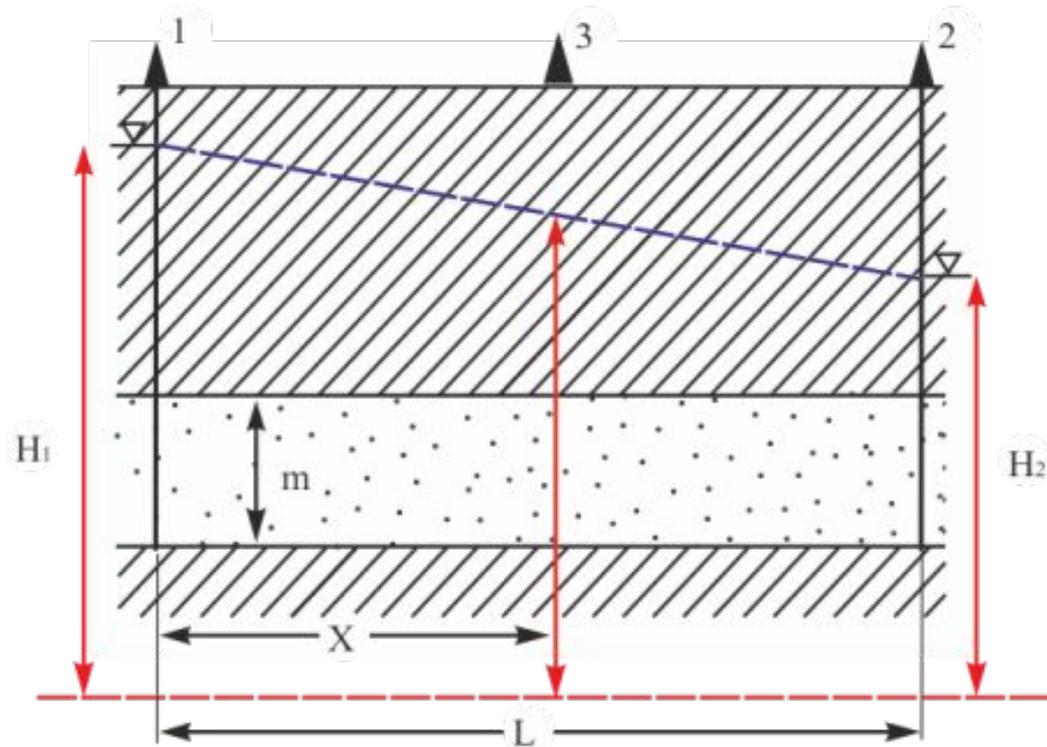
Уравнение единичного расхода напорного водоносного горизонта



$$q = km \frac{H_1 - H_2}{L};$$

Уравнение единичного расхода напорного водоносного горизонта не принято использовать без расчётной схемы (рисунка)

Уравнение депрессионной кривой напорного водоносного горизонта



Для вывода уравнения депрессионной кривой используется метод фрагментов фильтрационного потока

Метод фрагментов фильтрационного потока основан на фундаментальном принципе неразрывности фильтрационного потока

Согласно этому принципу расход фильтрационного потока остаётся постоянным во всех сечениях (скв. №№ 1, 3, 2) или:

$$q_{1-2} = q_{1-3} = q_{3-2} = q$$

Это означает, что расход попавший в водоносный горизонт со стороны области питания, без изменения движется по области распространения и покидает водоносный горизонт со стороны области разгрузки

Единичный расход напорного водоносного горизонта

На основании принципа неразрывности фильтрационного потока справедливо такое равенство:

$$q_{1-2} = q_{1-3}$$

и, следовательно, может быть составлена простая система уравнений, которая может быть решена относительно неизвестной величины H_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{1-2} = km \frac{H_1 - H_2}{L}; \\ q_{1-3} = km \frac{H_1 - H_3}{X}; \end{array} \right.$$

Депрессионная кривая напорного водоносного горизонта

Решение системы из двух линейных уравнений:

$$km \frac{H_1 - H_2}{L} = km \frac{H_1 - H_3}{X};$$

$$\frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{H_1 - H_3}{X};$$

$$\frac{X}{L} (H_1 - H_2) = H_1 - H_3;$$

Уравнение депрессионной кривой напорного водоносного горизонта:

$$H_3 = H_1 - \frac{X}{L} (H_1 - H_2);$$

Пример расчёта:

$$H_1 = 121 \text{ м}$$

$$H_2 = 120 \text{ м}$$

$$L = 300 \text{ м}$$

$$m = 10 \text{ м}$$

$$K = 5 \text{ м/сут}$$

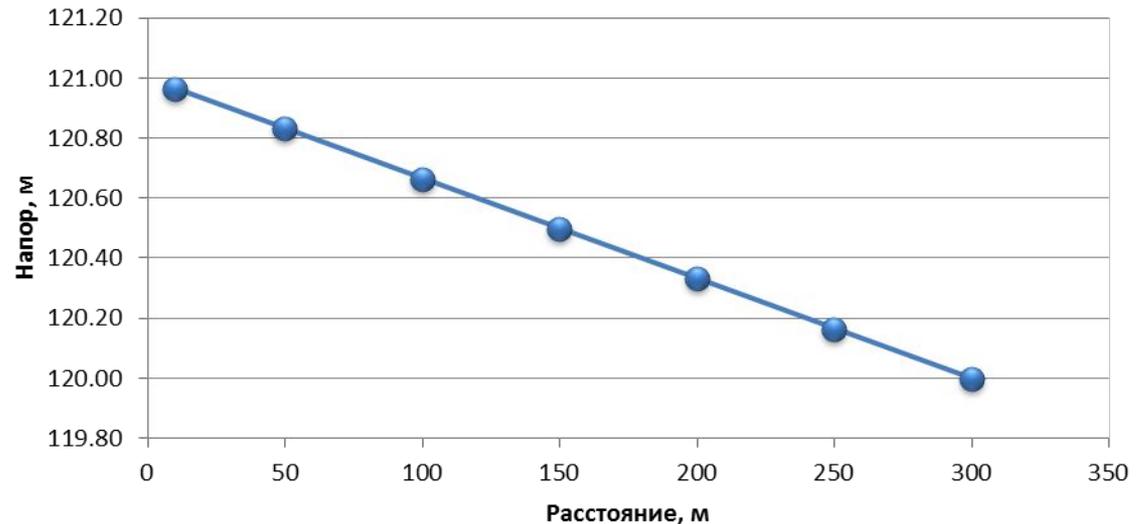
$$B = 50 \text{ м}$$

$$q = 5 * 10 \frac{121 - 120}{300} = 1,667 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$Q = B * q = 50 * 1,667 = 8.33 \text{ м}^3/\text{сут};$$

График депрессионной кривой напорного водоносного горизонта

№	X, м	H, м
1	10	120.97
2	50	120.83
3	100	120.67
4	150	120.50
5	200	120.33
6	250	120.17
7	300	120.00



Напорный водоносный горизонт

Уравнения единичного расхода и депрессионной кривой напорного водоносного горизонта позволяют:

определять расход подземных вод в условиях напорного водоносного горизонта (непосредственные методы измерения расхода отсутствуют);

определять напоры в области фильтрации между пробуренными скважинами

и, следовательно, выполнять оценку естественных ресурсов подземных вод

положение пьезометрической поверхности на границах фильтрационного потока не может быть определено никакими физическими приборами, кроме гидрогеологических скважин