

ОБЩАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Лекция 8

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Доцент кафедры
общего землеведения и
гидрометеорологии
Ю.А. Гледко
gledko74@mail.ru

План лекции

- Основные гидродинамические процессы в зоне аэрации: инфильтрация, испарение, конденсация.
- Виды и законы движения подземных вод в зоне насыщения, понятие о фильтрации. Закон Дарси.
- Основные законы фильтрации.
- Коэффициенты фильтрации и водопроницаемости.
- Фильтрационные свойства пород в области движения подземных вод.

Динамика подземных вод

- **Динамика подземных вод** – учение о движении воды в горных породах земной коры, совершающемся под влиянием как природных, так и искусственных факторов. В сферу изучения входит движение вод не только в водоносных, насыщенных водой породах, но и различные виды передвижения воды в ненасыщенных пористых образованиях.

Ламинарное и турбулентное движение ПОДЗЕМНЫХ ВОД

- Под **ламинарным** понимается такое движение, когда струйки воды двигаются без завихрения, параллельно друг другу, с небольшими скоростями; поэтому иногда ламинарное движение называют параллельно-струйчатым. Движение подземных вод в подавляющем большинстве случаев является ламинарным.
- Под **турбулентным** движением понимается такое движение, которое характерно большими скоростями, вихреобразностью, пульсацией и перемешиванием отдельных струй воды. Турбулентное движение может происходить только в очень крупных порах или в широких трещинах горных пород при значительных градиентах (например, вблизи скважин, из которых происходит интенсивная откачка воды).

Движение воды в зоне аэрации

- В **зоне аэрации** происходит проникновение атмосферных осадков и поверхностных вод в грунт, называемое ***просачиванием (инфильтрацией)***. Различают ***свободное просачивание и нормальную инфильтрацию***.
- Инфильтрационная вода может либо достичь уровня грунтовых вод и вызвать его повышение, либо остаться в зоне аэрации в виде капиллярно-подвешенной воды.

Движение воды в зоне насыщения

- В **зоне насыщения** под действием силы тяжести и гидростатического давления свободная (гравитационная) вода по порам и трещинам грунта перемещается в сторону уклона поверхности водоносного горизонта (уровня грунтовых вод) или в сторону уменьшения напора. Это движение называется **фильтрацией**.
- В гидрогеологии под термином **«фильтрация подземных вод»** понимается движение свободной гравитационной воды, происходящее под действием силы тяжести или градиента давления (при условии полного насыщения свободного пространства водой).

Фильтрационный поток подземных вод

- Расходом фильтрационного потока Q называется количество воды, проходящее в единицу времени через поперечное сечение потока (см³/с, л/с, м³/сут и т.д.). Поскольку оценка расхода может производиться для потоков (элементов потока), имеющих различную ширину, введено понятие так называемого **удельного** (единичного) расхода потока q , под которым понимается количество воды, проходящее в единицу времени через поперечное сечение потока при ширине 1 м (см³/с, л/с, м³/сут и т.д.).

Фильтрационный поток подземных вод

- Под *скоростью фильтрации* (скоростью фильтрационного потока) понимается количество воды, которое проходит в единицу времени через единицу поперечного сечения потока (пласта):
 - $v_{\phi} = Q/F$,
- где v_{ϕ} — скорость фильтрации (см/с, м/сут и т.д.); Q — расход фильтрационного потока (см³/с, м³/сут); F — площадь поперечного сечения (см², м²).

Фильтрационный поток подземных вод

- Движение свободной (гравитационной) воды как при нормальной инфильтрации в зоне аэрации, так и при фильтрации в зоне насыщения имеет в мелкопористых грунтах *ламинарный режим* и подчиняется зависимости, которую применительно к движению подземных вод записывают в виде *закона фильтрации Дарси*:
 - $v_{\phi} = K_{\phi} \cdot I$,
- где v_{ϕ} – скорость фильтрации; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; I – гидравлический уклон, равный либо уклону поверхности уровня грунтовых безнапорных вод (этот уклон пропорционален продольной составляющей силы тяжести), либо градиенту пьезометрического напора (пропорционального градиенту гидростатического давления) у напорных артезианских вод.

Пьезометрический напор

- Понятие о напоре воды введено в науку русским ученым Д. Бернулли. По его определению, величина напора выражается следующим уравнением:

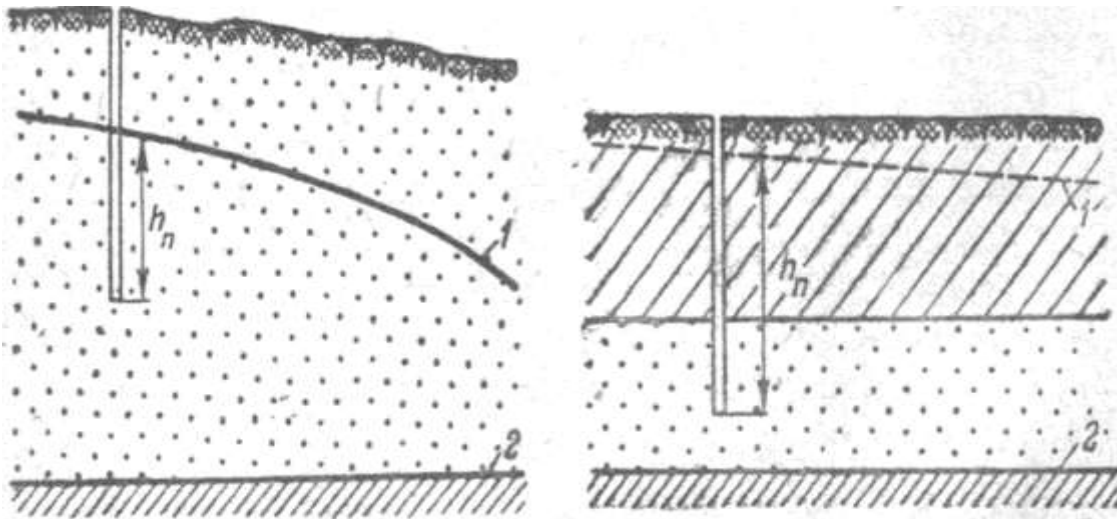
$$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = H$$

- где: P – гидростатическое давление в исследуемой точке потока воды; γ – объемный вес воды; z – высота исследуемой точки потока над выбранной плоскостью сравнения напоров; $-\frac{v^2}{2g}$ – скоростной напор.
- Величина $\frac{v^2}{2g}$ в потоке подземных вод весьма мала, ею обычно

пренебрегают, и **напор подземных вод** определяют по уравнению

$$\frac{P}{\gamma} + z = H$$

Пьезометрический напор



- Величина

$$\frac{P}{\gamma} + z = H$$

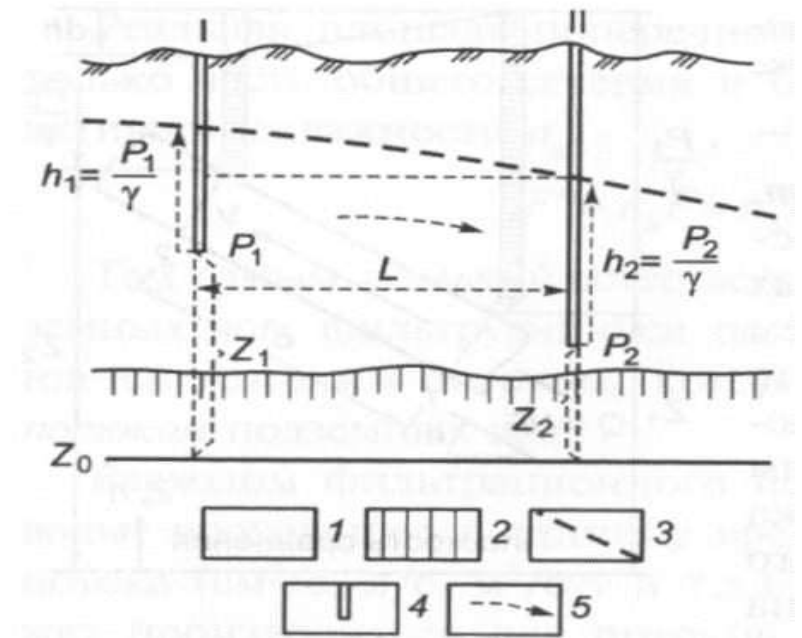
известна под названием **пьезометрического напора** и является мерой энергии потока движущейся жидкости, а отношение

$$\frac{P}{\gamma} = h$$

как **пьезометрическая высота**, характеризующая «энергию давления».

Пьезометрический напор

- Пьезометрическая высота h – это высота, на которую должна подниматься вода над данной точкой потока под влиянием гидростатического давления P в этой точке. В случае грунтового потока пьезометрическая высота равна глубине погружения данной точки от зеркала грунтовых вод, а в случае напорных – вод глубине погружения точки от пьезометрической поверхности этих вод



- Рис. Схема потока подземных вод со свободной поверхностью
- 1 – породы водоносного горизонта и зоны аэрации; 2 – слабопроницаемые породы; 3 – свободный уровень подземных вод; 4 – пьезометры (скважины); 5 – направление движения потока подземных вод

Напорный градиент

- *Потеря напора* подземных вод (ΔH , м) на участке между рассматриваемыми сечениями потока, отнесенная к расстоянию между сечениями (L — длина пути фильтрации, м), называется **градиентом пьезометрического напора** (**напорным градиентом**) и определяется из выражения

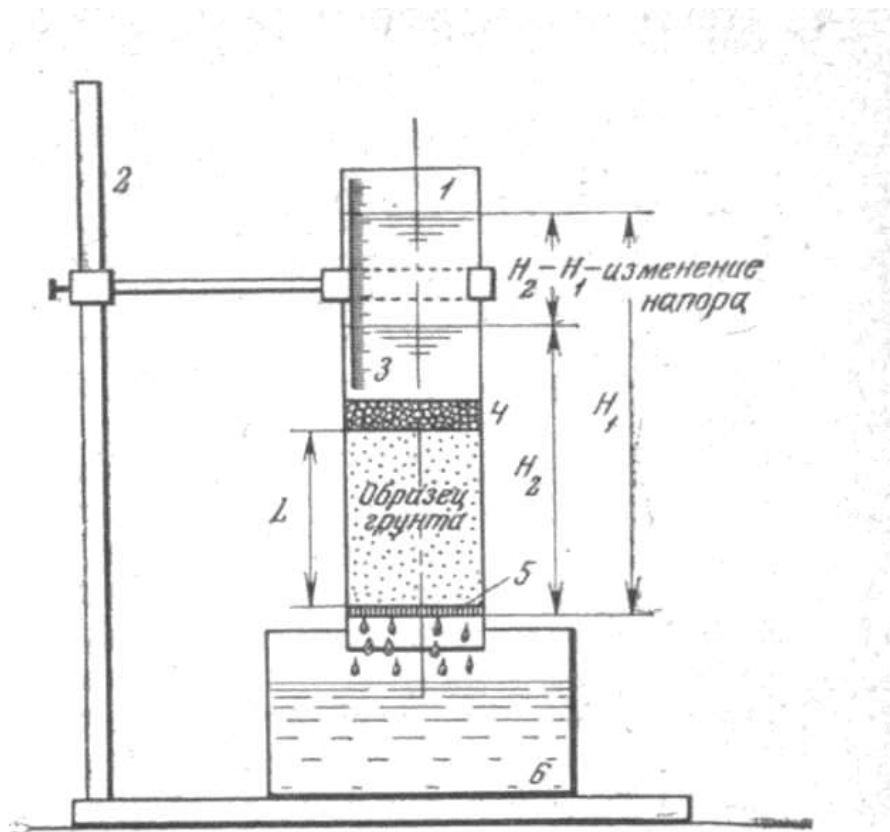
$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Delta H}{L} = \lim \left[\frac{\Delta H}{\Delta x} \right] = -dh / dx$$

при $x = L \rightarrow 0$

- Таким образом, значение напорного градиента I характеризует **потерю пьезометрического напора на единицу длины пути фильтрации**. Знак (–) в выражении указывает, что величина напора уменьшается по направлению движения подземных вод (с увеличением x).

Линейный закон фильтрации Дарси

Основной закон фильтрации был экспериментально установлен французским гидравликом Анри Дарси в 1856 году на основании опытов по исследованию движения воды через трубки, заполненные песком.



- Рис. Схема прибора для определения коэффициента фильтрации
- 1 — фильтрационная трубка; 2 — штатив;
3 — мерная шкала;
4 — крупнозернистая песчаная или гравийная пригрузка;
5 — сетка;
6 — водоприемный сосуд

Линейный закон фильтрации Дарси

- По результатам опытов А. Дарси сформулировал вывод (закон) о том, что количество воды (Q), проходящее через трубку, заполненную дисперсным материалом, прямо пропорционально разности уровней (ΔH) в крайних сечениях трубки, прямо пропорционально площади поперечного сечения трубки (F), обратно пропорционально длине трубки (L — длина пути фильтрации) и прямо пропорционально постоянному для данного материала коэффициенту (K), характеризующему проницаемость материала, заполняющего трубку. Таким образом, в общем виде закон А. Дарси (основной закон фильтрации) может быть выражен формулой

$$Q = KF \frac{H_1 - H_2}{L} = KF \frac{\Delta H}{L} = KFI$$

- где F — площадь поперечного сечения трубы, см²; H_1 и H_2 — значения пьезометрического напора в крайних сечениях, см; L — длина трубки (пути фильтрации), см; K — коэффициент пропорциональности, см/с; I — значение напорного градиента; Q — расход воды (потока), см³/с.

Линейный закон фильтрации Дарси

- При оценке значения расхода воды через единичное поперечное сечение потока

- $$q = Km \frac{H_1 - H_2}{L} = Kf \frac{H_1 - H_2}{L} = Kf \frac{\Delta H}{L} = KmI$$

- где m — мощность потока, см, м; $1 m=f$ — площадь поперечного сечения потока при единичной ширине, см², м²; q — удельный или единичный расход потока, см³/с, м³/сут; остальные обозначения (см. 8.10).

- При делении обеих частей уравнения (8.10) на площадь поперечного сечения потока (F) получаем

- $$\frac{Q}{F} = v = K \frac{\Delta H}{L} = KI$$

- где v — скорость фильтрации, см/с, м/сут и т.д.
- Уравнения (8.10), (8.11), (8.12) являются различными формами выражения основного закона фильтрации, записанного соответственно относительно расхода потока Q , единичного расхода q и скорости фильтрации v и показывают линейную зависимость скорости фильтрации от напорного градиента и поэтому закон Дарси называют линейным законом фильтрации. При линейном законе фильтрации скорость фильтрации пропорциональна первой степени напорного градиента или уклона потока.

Коэффициент фильтрации и водопроницаемости

- Коэффициент пропорциональности (K), характеризующий проницаемость материала, заполняющего трубку, был назван А. Дарси коэффициентом фильтрации (водопроницаемости). Из выражения (8.12) следует, что коэффициент водопроницаемости (коэффициент фильтрации) в законе Дарси имеет размерность скорости (м/сут, см/с и др.) и численно равен скорости фильтрации при единичном ($I=1$) напорном градиенте.
- Член уравнения (8.11), являющийся произведением мощности потока (площади его поперечного сечения f при ширине потока равной 1) на значение водопроницаемости (K), называется *проводимостью* (водопроницаемостью, коэффициентом водопроницаемости) потока или пласта, которая численно равна удельному расходу потока (q) при единичном ($J=1$) напорном градиенте:

$$T = Km = q$$

- где T – проводимость пласта, м²/сут.

Границы применимости закона Дарси

- Переход от ламинарного течения к турбулентному характеризуется (в зависимости от среды) определенными значениями **числа Рейнольдса (Re)**. При числе Рейнольдса выше критического возможен переход в турбулентное движение (ламинарный режим движения воды в трубках происходит при $Re < 2300$, а турбулентный - при $Re > 2300$). При движении жидкости в пористой среде число Рейнольдса определяется (Р. де Уист) из выражения

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

- где v – скорость фильтрации;
- $\frac{\mu}{\rho} = \nu$ – коэффициент кинематической вязкости

жидкости (μ – вязкость воды, ρ – плотность воды); d – эффективный диаметр.

Тем самым значение числа Рейнольдса зависит от скорости фильтрации и диаметра частиц минерального скелета породы, определяющего размеры пустот и, следовательно, проницаемость горной породы (для песков средней крупности $Re = 50 - 60$).

- По данным, приводимым Р. де Уистом, значение Re , при котором происходят отклонения от линейного закона фильтрации, изменяется в зависимости от размера частиц и пористости горной породы в пределах от 2 до 5.

Отклонения от линейного закона

- В крупнообломочных, сильно трещиноватых или закарстованных породах скорости движения подземных вод могут быть значительными, и режим потока в этих случаях становится турбулентным. В таких случаях вместо формулы Дарси используется нелинейный закон, установленный А.А. Краснопольским:

$$v_{\delta} = K'_{\delta} \sqrt{I}$$

- где K'_{δ} – коэффициент турбулентной фильтрации, который определяют опытным путем.
- Из формулы видно, что при турбулентном движении скорость фильтрации пропорциональна напорному градиенту в степени $1/2$.