

ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИИ.

Понятия и определения.

Движение жидкости в грунтах и пористых средах называется фильтрацией. Грунтовые воды, находясь в движении, образуют фильтрационный поток.

Дождевая вода с поверхности земли просачивается в землю, насыщает водопроницаемый слой. На какой – то глубине она задерживается водонепроницаемым грунтом и движется по его поверхности.

Водонепроницаемый слой называется водупором, он образует подобие русла фильтрационного потока.

Движение грунтовых вод может быть напорным и безнапорным.

При безнапорном движении фильтрационный поток ограничен сверху свободной поверхностью, в каждой точке которой давление обычно равно атмосферному. Эта свободная поверхность называется депресссионной поверхностью.

Линия пересечения депрессионной поверхности с вертикальной плоскостью называется кривой депрессии.

Объём воды, протекающей через живое сечение пористой среды в единицу времени, называется фильтрационным расходом.

В напорных фильтрационных потоках водоносный пласт расположен между двумя водоупорами. Если в верхнем водоупоре пробурить скважину, то вода в этой скважине поднимется как в пьезометрической трубке на определённую высоту.

Вода, добытая из такой скважины или колодца, называется артезианской, а колодец – артезианским колодцем.

Часто при проектировании и строительстве объектов возникает необходимость понижения естественного уровня грунтовых вод. ***Для отвода грунтовой воды и понижения её уровня прокладывают специальные дренажные трубы. Чтобы их спроектировать, надо рассчитать фильтрационные потоки.***

Режим движения грунтовых вод может быть ламинарным или турбулентным.

В мелкозернистых грунтах режим движения ламинарный.

***В крупнозернистых грунтах
(крупный песок, гравий, галька,
каменная наброска)***

режим движения турбулентный.

На практике чаще встречается ламинарный режим фильтрации.

Основной закон фильтрации.

Он установлен в середине XIX –го века Дарси и носит его имя. Многочисленные опыты показали, что **скорость фильтрации воды прямо пропорциональна пьезометрическому уклону в первой степени.** Основной закон фильтрации (закон Дарси) записывается в виде:

$$u = k J, \text{ где}$$

u – скорость фильтрации;

k – коэффициент фильтрации, зависящий от категории грунта, рода жидкости и температуры;

J – пьезометрический уклон, равный гидравлическому (u мала по величине).

Коэффициент фильтрации представляет собой скорость фильтрации при уклоне, равном единице.

Пусть труба внутренним диаметром d заполнена песком и в порах грунта движется вода.

В любом произвольном сечении этой трубы можно выделить три площади:

1. площадь сечения пор грунта $\omega_{\text{пор}}$,
эта площадь является площадью
действительного живого сечения потока;

2. площадь сечения частиц грунта $\omega_{\text{част}}$,
через эту площадь вода в
действительности не проходит;

3. площадь сечения всей трубы

$\omega = \pi d^2/4$, ω включает площади пор и
частиц:

$$\omega = \omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{част.}}$$

Действительная скорость движения воды в порах грунта:

$$u_d = Q / \omega_{\text{пор}},$$

но в качестве скорости фильтрации принимается:

$$u = Q / \omega.$$

Следовательно, скорость фильтрации – это фиктивная (воображаемая) скорость, получаемая в предположении, что вода движется не только через поры грунта, но и через пространство, занятое частицами.

Закон Дарси можно записать для расхода:

$$\omega u = \omega k J \quad \text{или} \quad Q = k \omega J.$$

Оба вида закона Дарси применимы для ламинарного режима фильтрации.

Режим фильтрации ламинарный, если выполняется условие:

$$u d \leq 0,01 \div 0,07, \quad \text{где}$$

u – скорость фильтрации, см/с;

d – средний диаметр зёрен грунта, см.

Если условие не выполняется, то режим фильтрации турбулентный, для него: $u = k_t \sqrt{J}$, где

k_t – коэффициент турбулентной фильтрации.

Равномерное безнапорное движение грунтовых вод.

Пусть по водоупору с уклоном i движется грунтовая вода. При равномерном движении свободная поверхность параллельна плоскости дна (водоупора).
Значит, ***глубина грунтовой воды***
 $h_0 = \text{const}$ по длине потока.

Скоростным напором можно пренебречь (u – мала по величине),
поэтому напорная и пьезометрическая линии должны совпадать со свободной поверхностью потока.

Равномерное безнапорное движение грунтовых вод.

Следовательно, при равномерном движении грунтовых вод: $J = J_p = i$, поэтому формула Дарси для расхода запишется в виде:

$$Q = k \omega i.$$

При широком фильтрационном потоке расчёт ведётся на единицу ширины.

q – удельный расход, приходящийся на единицу ширины потока.

$\omega = h_0 \cdot 1$, тогда $q = k h_0 i$, отсюда:

$$h_0 = q / ki.$$

Это уравнение равномерной безнапорной фильтрации.

Неравномерное безнапорное плавно изменяющееся движение грунтовых вод.

При плавно изменяющемся движении живые сечения плоские и вертикальные (при малом уклоне русла).

Выделим два сечения:

1–1 и **2–2**, **ds** – расстояние между ними;

H_1 , **H_2** – напоры в этих сечениях

относительно плоскости сравнения **$0 – 0$** ;

- **$dH = H_1 – H_2$** – потери напора на длине **ds** .

**Неравномерное безнапорное
плавно изменяющееся движение
грунтовых вод.**

Гидравлический уклон, равный пьезометрическому:

$$J = - dH / ds,$$

знак минус в формуле потому, что напор в направлении оси **S** убывает и **dH** отрицательна по величине.

При плавно изменяющемся движении:

$$u = v = - k dH / ds.$$

Это формула Дюпюи, которая гласит:

средняя скорость в вертикальном живом сечении равна уклону свободной поверхности в этом сечении, умноженному на коэффициент фильтрации.

Формула Дюпюи отличается от формулы Дарси.

Формула Дарси даёт скорость фильтрации для любой точки области фильтрации.

Формула Дюпюи – среднюю скорость в плоском вертикальном живом сечении при плавно изменяющемся безнапорном движении.

С использованием формулы Дюпюи можно получить расход фильтрационного потока, приходящийся на единицу ширины потока (удельный расход):

$$q = k h (i - dh / ds) -$$

***это дифференциальное уравнение
неравномерного безнапорного
движения грунтовых вод (при $i > 0$).***

Здесь:

h – глубина в рассматриваемом сечении;

i – уклон водоупора.

Если уклон водоупора $i = 0$, то:

$$q = - k h \quad dh / ds.$$

Разделим переменные:

$$q / k \quad ds = - h \quad dh.$$

Проинтегрируем уравнение от сечения 1 до сечения 2:

$$q / k (S_2 - S_1) = (h_1^2 - h_2^2) / 2 \quad \text{или,}$$

обозначив расстояние между

сечениями $(S_2 - S_1) = \ell$, получим

уравнение Дюпюи:

$$q / k \cdot \ell = (h_1^2 - h_2^2) / 2.$$

Приток воды к водосборным галереям.

Водосборные галереи применяются в дренажных сооружениях при осушительных работах для понижения уровня грунтовых вод.

Галереи могут быть открытыми или закрытыми.

На рисунке показана открытая галерея, дно которой совпадает с горизонтальной плоскостью водоупора.

Открытая галерея.

Если из галереи не забирать воду, то уровень воды в ней поднимется до **ГГВ** – горизонта грунтовых вод.

Если дну галереи дать наклон или забирать какой – то расход воды **Q**, то уровень воды в галерее будет понижаться и с боковых сторон будет наблюдаться приток грунтовых вод с расходом **Q_{пр}**.

Как только будет достигнуто равенство расходов **Q_{пр} = Q**, в галерее установится уровень воды с равновесной глубиной **h**.

В грунте, прилегающем к галерее, слева и справа устанавливаются кривые депрессии.

L – зона влияния галереи, т.е. расстояние с которого галерея собирает воду.

L ограничивает участок неравномерного движения фильтрационного потока.

H₀ – мощность водоносного пласта (глубина грунтовых вод).

При расчёте фильтрационного потока расход определяется по уравнению

Дюпюи: $q / k = (H_0^2 - h^2) / 2L.$

Уравнение даёт односторонний приток воды к галерее, полный приток $Q_{пр} = 2q.$
Галереи могут быть закрытыми.

Фильтрация через тело
однородной прямоугольной
перемычки.

В теле перемычки установится кривая депрессии.

Для расчёта фильтрационного расхода также используется уравнение Дюпюи,

где $h_1 = H_0$; $h_2 = h_0$; $l = L$:

$$q / k = (H_0^2 - h_0^2) / 2L.$$

Эта формула справедлива для любого сечения фильтрационного потока.

Для промежуточного сечения 1-1 уравнение Дюпюи запишется в виде:

$$q / \kappa = (h^2 - h_0^2) / 2x.$$

Приравняем правые части уравнений:

$$(h^2 - h_0^2) / 2x = (H_0^2 - h_0^2) / 2L,$$

получим:

$$h = \sqrt{(h_0^2 + (H_0^2 - h_0^2) x / L)}.$$

По последней формуле можно рассчитать кривую депрессии:

$$\text{при } x = 0 \rightarrow h = h_0;$$

$$\text{при } x = L \rightarrow h = H_0.$$

Фильтрация воды через земляную плотину.

Рассмотрим плотину из однородного
грунта, установленную на водоупоре.

Гидравлический расчёт плотины состоит в определении фильтрационного расхода воды и в построении кривой депрессии ВС, которую надо иметь при проектировании плотины (дамбы), в частности для расчёта устойчивости её откосов.

В теле плотины фильтрация плавно изменяющаяся при ламинарном режиме.

Фильтрационный поток ограничен линиями **АВ, ВС, СД, ДЕ, АЕ**. На каждой из этих линий фильтрационный поток удовлетворяет определённым граничным условиям.

1. Линия АВ (верховой откос плотины) является линией равного напора. Во всех её точках напор одинаков и равен $H_{вб}$. Если за плоскость сравнения взять плоскость водоупора, то:

$$H_{вб} = Z + p / \rho g.$$

Одновременно АВ является живым сечением фильтрационного потока. Живое сечение всегда перпендикулярно линиям тока. Поэтому линию АВ струйки фильтрации всегда проходят по нормали.

2. Линия ДЕ также является линией равного напора. Во всех её точках напор равен $H_{нб}$. Она тоже одновременно является живым сечением части фильтрующего потока.

3. Линия ВС – кривая депрессии, это свободная поверхность фильтрующего потока, пьезометрическая линия.

Давление во всех её точках одинаково и равно атмосферному. Это самая верхняя линия тока фильтрационного потока.

В – точка уреза воды, в точке **С** кривая депрессии касательна к низовому откосу.

4. Линия АЕ – линия водоупора.

Одновременно она является самой нижней линией тока. Она всюду перпендикулярна живым сечениям, кроме **АВ** и **ДЕ**.

5. Линия СД – тоже линия равного давления, атмосферного. Эта линия не является линией тока, движение фильтрационного потока здесь резко изменяющееся.

СД не является живым сечением, т.к. линии тока пересекают её под углом, отличным от угла **90°**.

По линии СД фильтрационный поток выходит на низовой откос и скатывается в нижний бьеф.

СД – зона высачивания.

С – точка выклинивания кривой депрессии.

В средней части плотины движение плавно изменяющееся, в пределах верхового и низового клиньев плотины – резко изменяющееся.

Гидравлический расчёт плотины.

*Для гидравлического расчёта
плотины действительный
трапецеидальный профиль $AbcE$
заменяется условным $A'b'cE$,
имеющим вертикальную верховую
грань.*

Гидравлический расчёт плотины.

Расстояние $\lambda_{H_{вб}}$ между вертикальным сечением, проходящим через точку уреза воды **В**, и верховой вертикальной гранью условного профиля плотины выбирается так, что:

1. фильтрационный расход через плотину с условным профилем $q_{усл}$ должен быть равен фильтрационному расходу через плотину с действительным профилем $q_{д}$;
2. большая часть кривой депрессии, построенной для условного профиля, должна совпадать с кривой депрессии для действительного профиля.

Величина коэффициента λ зависит от коэффициента заложения верхового откоса $m_1 = \text{ctg } \alpha_1$.

Коэффициент λ определяется по формуле Г.К. Михайлова:

$$\lambda = m_1 / (1 + 2m_1), \text{ в среднем } \lambda \approx 0,4.$$

Если в нижнем бьефе вода отсутствует ($H_{нб} \approx 0$), то удельный расход можно рассчитать по уравнению Дюпюи:

$$q = k H_{вб}^2 / 2L_0,$$

расстояние $L_0 = L + \lambda H_{вб}$.

Величину промежутка высачивания можно определить по формуле С.Н. Нумерова:

$$h_0 = (m_2 + 0,7) q / k, \text{ где } m_2 = \operatorname{ctg} \alpha_2.$$

Зная фильтрационный расход q и промежуток высачивания h_0 , можно построить кривую депрессии ВС.

Для выделенного в насыпи сечения 1-1 уравнение Дюпюи записывается в виде:

$$q / k = (H_{вб}^2 - h^2) / 2x, \text{ отсюда}$$

$$h = \sqrt{(H_{вб}^2 - 2qx / k)}.$$

Задаваясь расстояниями x , найдём соответствующие им глубины фильтрационного потока h :

$$H_{вб} \geq h \geq h_0.$$

Получив $B'C$ – кривую депрессии для условной схемы $A'b'cE$, визуальнo заменяют её начальный участок $B'c'$ линией Bc' . Она проводится нормально к верховому откосу Ab .

К низовому откосу кривая депрессии должна подходить в точке C как к касательной.

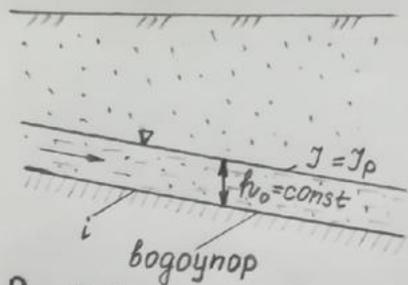


Рис. Равномерное безнапорное движение грунтовых вод.

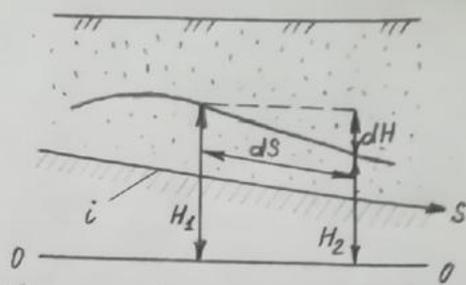


Рис. Неравномерное безнапорное плавно изменяющееся движение грунтовых вод.

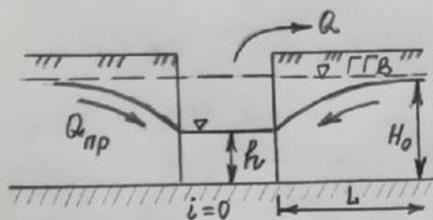


Рис. Открытая галерея.

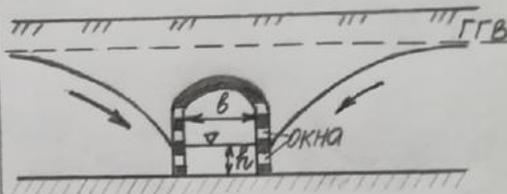


Рис. Закрытая галерея.

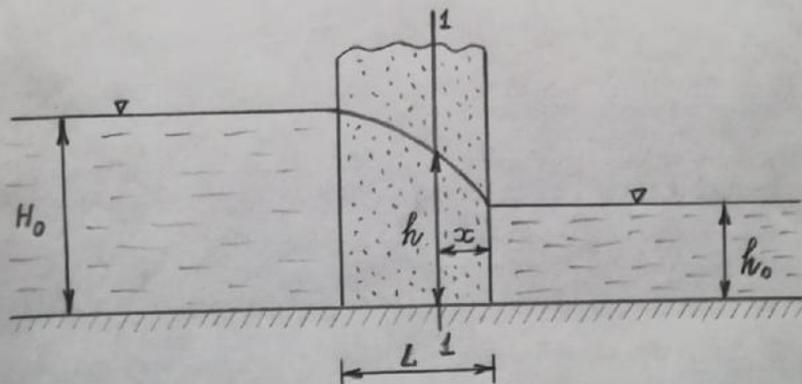


Рис. Фильтрация через тело однородной прямоугольной перемычки.

Рисунки к теме "Основы фильтрации."

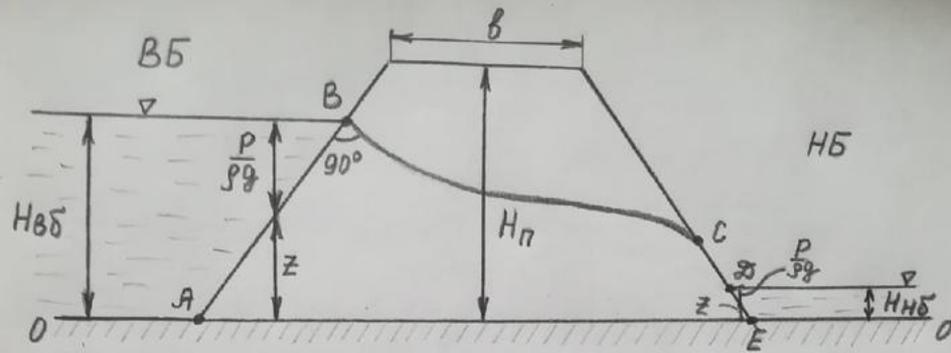


Рис. Фильтрация воды через земляную плотину.

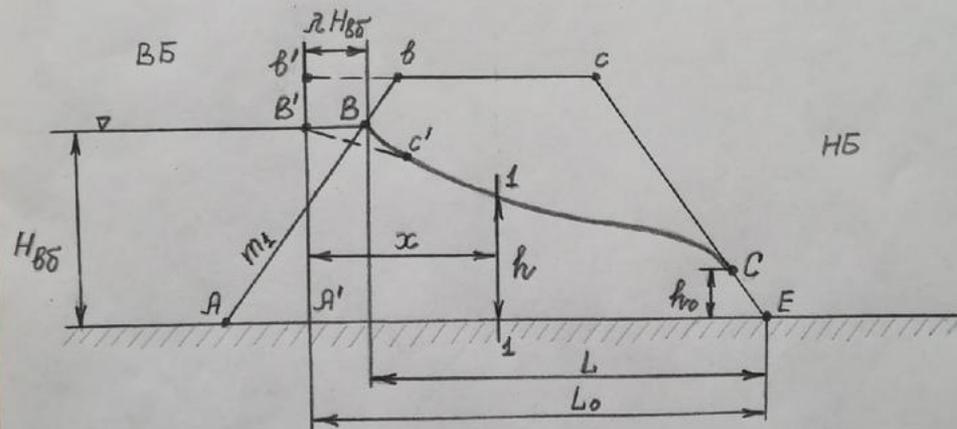


Рис. Гидравлический расчёт плотины.

Рисунки к теме "Основы фильтрации."