

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

- *Общие понятия*
- *Законы фильтрации подземных вод.*
- *Определение направления и скорости движения подземных вод*
- *Понятие о гидрогеологических параметрах*
- *Расход потока и приток подземных вод к водозаборным сооружениям*
- *Зависимость дебита скважин от понижения уровня*

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Основной закон ламинарного движения жидкости в пористых породах был установлен французским ученым Дарси (1856 г.). На основе этого закона Дюпюи (1857 г.) разработал зависимость для определения расхода потока подземных вод и притока их к водозаборным сооружениям.

Фильтрация – движение подземных вод в порах рыхлых горных пород и в трещинах скальных пород в условиях, когда поры и трещины полностью заполнены водой.

В общем случае фильтрацией называют движение жидкости в пористой среде.

В. М. Шестаковым предложен термин *геофильтрации*, отражающий специфику фильтрации подземных вод в горных породах.

Если движение воды происходит в породах, не полностью насыщенных водой, то его называют *инфильтрацией*.

Ламинарное, или параллельно-струйчатое, движение происходит без пульсации скоростей, *турбулентное*, или вихревое, движение характеризуется пульсацией скоростей, вследствие чего перемешиваются различные слои потока.

Установившееся движение подземных вод характеризуется постоянством во времени в любом сечении мощности, напорного градиента, скорости фильтрации, расхода. При изменении во времени этих характеристик движение называется *неустановившимся*.

ЗАКОНЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Линейный закон фильтрации. Ламинарное движение подземных вод подчиняется линейному закону фильтрации, известному под названием закона Дарси и имеющему следующий вид:

$$Q = kJw,$$

где Q — расход фильтрационного потока — количество воды, протекающей через данное поперечное сечение потока в единицу времени, $\text{м}^3/\text{сут}$; k — коэффициент фильтрации породы, $\text{м}/\text{сут}$; J — градиент напора или гидравлический градиент; w — поперечное сечение потока, м^2 .

Градиент напора характеризует уклон свободной поверхности грунтовых вод или пьезометрической поверхности напорных вод. Его вычисляют по формуле

$$J = (H_1 - H_2) / l,$$

где H_1 — отметка уровня грунтовых вод или пьезометрической поверхности напорных вод в сечении I (рис.), м; H_2 — то же, в сечении II. Если водоупор расположен горизонтально, то для грунтовых вод H_1 и H_2 приравнивают к мощности водоносного горизонта h_1 и h_2 , м; l — расстояние между I и II, или путь фильтрации, м.

Градиент напора грунтовых вод можно определить по гидроизогипсам — линиям, соединяющим одинаковые отметки поверхности грунтовых вод.

Если обе части выражения (8) разделить на площадь поперечного сечения потока ω (м²), получим

$$Q/\omega = kl \quad (10)$$

Левая часть равенства определяет собой скорость фильтрации v (м/сут)

$$v = kl \quad (11)$$

Если принять $l=1$, то

$$v = k \quad (12)$$

Отсюда следует, что коэффициент фильтрации численно равен скорости фильтрации при градиенте напора, равном единице.

Движение подземных вод происходит не через все сечение потока, а лишь через часть его, соответствующую площади пор или трещин. Действительная скоростью фильтрующейся воды равна

$$u = Q/n\omega \quad (13)$$

Если сопоставить выражения (10) и (13), то можно установить следующую связь между v и u :

$$v = nu. \quad (14)$$

Учитывая, что пористость всегда меньше единицы, то скорость фильтрации меньше действительной скорости движения воды.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЗАКОН ФИЛЬТРАЦИИ.

Турбулентное движение, характерное для сильно трещиноватых пород с крупными пустотами и трещинами, подчиняется нелинейному закону фильтрации, который выражается формулой Шези — Краснопольского:

$$v = k\sqrt{I} \quad (16)$$

где v — скорость фильтрации, м/сут; k — коэффициент фильтрации, м/сут; I — напорный градиент.

Таким образом, при турбулентном движении скорость фильтрации пропорциональна напорному градиенту в степени $1/2$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Метод индикаторов. Этот метод заключается в погружении в опытную скважину веществ, изменяющих химический состав (или цвет) воды, и в улавливании этой воды в наблюдательных скважинах, расположенных ниже по течению подземных вод. Расстояние между опытной и наблюдательными скважинами принимают в зависимости от характера пород: в крупнозернистых песках 2...5 м, в мелкозернистых песках 1...2 м, в супесях, суглинках и других слабопроницаемых породах 0,5...1,5 м.

Расстояние между наблюдательными скважинами, размещаемыми обычно по радиусу, 0,5...1,5 м.

Действительную скорость движения воды вычисляют по формуле

$$u = l / (t_2 - t_1)$$

Где l —расстояние между опытной и наблюдательной скважинами;
 t_2 — время обнаружения индикатора в наблюдательной скважине;
 t_1 — время погружения индикатора в опытную скважину.

Метод индикаторов подразделяется на химический, колориметрический и электролитический.

Химический метод. Основан на использовании в качестве индикатора иона хлора, вводимого в скважину в виде раствора поваренной соли, хлористого лития или хлористого аммония, которые не сорбируются породой. Предварительно определяют содержание хлор-иона в воде. Появление индикатора в наблюдательной скважине устанавливают титрованием отбираемых проб раствором азотнокислого серебра. Момент появления индикатора фиксируют.



Рис. Схема расположения буровых скважин при определении действительной скорости движения подземных вод методом индикаторов:

1 — опытная (центральная); 2, 3, 4 — наблюдательные.

Метод треугольника

Для определения направления и скорости движения подземных вод используют также радиоиндикаторные методы. Для мечения воды в качестве индикаторов широко применяют соединения, в которые входит ^{131}I , ^{35}S , ^{24}Na и др. Источник излучения (в гильзе) опускают в опытную скважину, а счетчик — в наблюдательную.

Метод радиоактивных индикаторов может быть широко применен и при изучении фильтрации из водохранилищ, взаимосвязи поверхностных и подземных вод, при исследовании миграции солей и т. д.

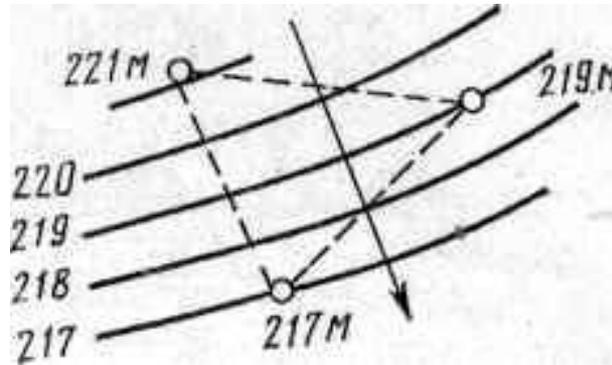


Рис. Построение гидроизогиПС по трем скважинам. Стрелкой показано направление движения грунтовых вод.

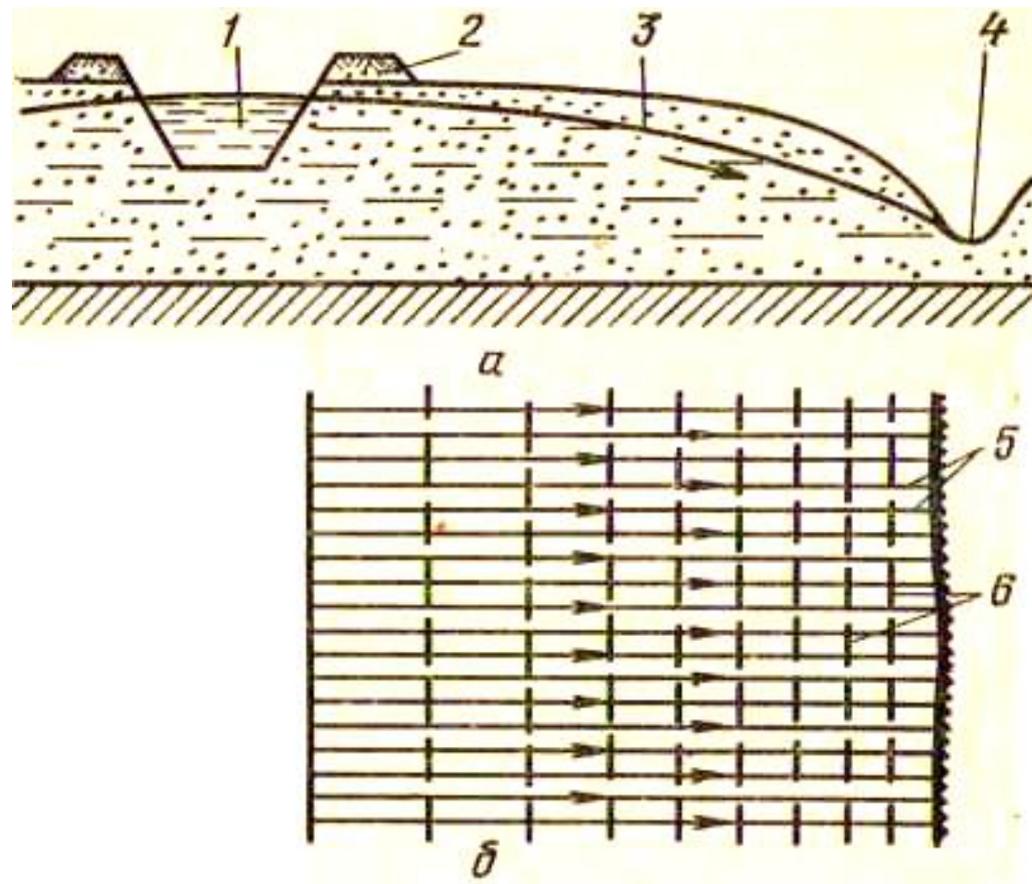


Рис. Схема плоского в плане потока грунтовых вод (по П. П. Климентову):
a — разрез; *б* — план; 1 — оросительный канал; 2 — насыпь; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — овраг; 5 — линии токов; 6 — гидроизогины.

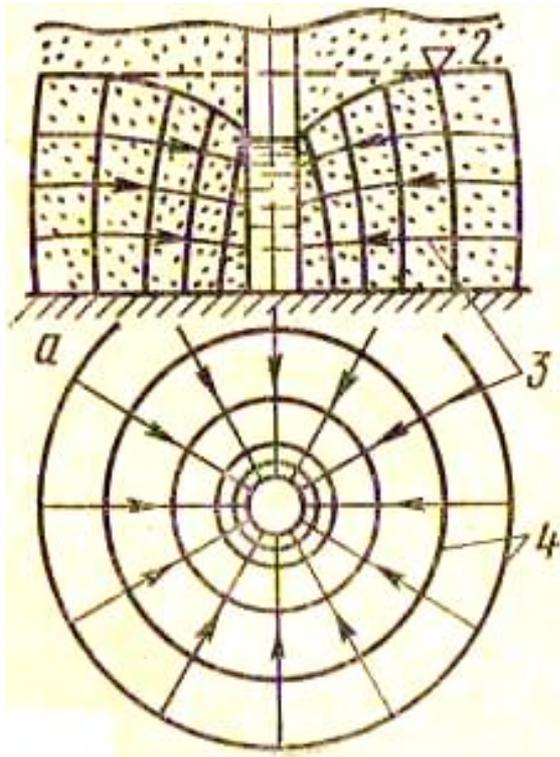


Рис. Схема радиально сходящегося в плане потока грунтовых вод:
 а — разрез; б — план; 1 — скважина; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — линии токов; 4 — гидроизогипсы.

Карта гидроизогипс позволяет установить характер потока подземных вод. Для этого проводят перпендикулярно гидроизогипсам линии, называемые **линиями токов**. Если они параллельны между собой, поток подземных вод считается плоским. Возможны радиальнорасходящиеся и радиальносходящиеся потоки. Примером последних являются потоки подземных вод, направленные к скважине, из которой откачивают воду.

ПОНЯТИЕ О ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Главнейшими свойствами пород, определение которых необходимо для выполнения указанных выше расчетов, являются фильтрационные и емкостные. Они характеризуются следующими параметрами: коэффициентами фильтрации и проницаемости, водопроводимостью, коэффициентами пьезо-и уровнепроводности, гравитационной и упругой водоотдачи, недостатка, насыщения и перетекания (в слоистых толщах), параметрами, характеризующими фильтрационное сопротивление ложка водотоков и водоемов. Последние параметры необходимы для оценки взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Гидрогеологические параметры определяют на основе полевых опытно-фильтрационных работ, путем наблюдений за режимом подземных вод, в лабораторных приборах и др. Методика проведения этих работ, обработки и интерпретации получаемых данных рассматриваются в специальных руководствах.

Основным методом определения гидрогеологических параметров являются опытно-фильтрационные работы: откачки подземных вод из скважин, наливов воды в шурфы, котлованы, скважины, нагнетания воды в скважины и т. д.

Проницаемостью называется свойство горных пород пропускать через себя жидкости, газы и их смеси при наличии перепада давления. Проницаемость зависит от пористости или трещиноватости и вязкости жидкости.

Коэффициент проницаемости используют при расчете движения разнородных жидкостей, например вода — нефть, высокоминерализованных или газонасыщенных, или термальных подземных вод.

Коэффициент фильтрации является показателем водопроницаемости пород. Он имеет ту же размерность, что и скорость, — м/сут. Связь коэффициента фильтрации с коэффициентом проницаемости имеет следующий вид:

$$k = K_i \gamma / \eta$$

Где k — коэффициент фильтрации, см/с; K

K_i — коэффициент проницаемости, см²;

η - динамическая вязкость жидкости, Па-с.

γ — плотность жидкости, кг/см³;

Водопроницаемость скальных пород зависит от их трещиноватости, главным образом от размера и густоты трещин. Чем больше сечение трещин, тем выше коэффициент фильтрации.

Водопроницаемость нескальных пород зависит от многих условий, но прежде всего от гранулометрического состава. Последний определяет крупность пор, с увеличением которой растет коэффициент фильтрации. Разнозернистость (наличие, например, песчаных фракций в галечнике или глинистых фракций в песке) уменьшает водопроницаемость этих пород.

Коэффициент водоотдачи характеризует емкостные свойства породы, то есть способность породы, насыщенной водой, отдавать (путем стекания) свободную воду. Коэффициентом гравитационной водоотдачи называют отношение объема стекшей воды, ранее заполнявшей пустоты, к объему всей породы; выражается обычно в долях единицы объема и является переменной величиной. Коэффициент водоотдачи галечника, гравия, крупных песков, то есть пород, обладающих наибольшей водоотдачей, близок к их пористости или полной влагоемкости.

Гравитационная водоотдача — величина непостоянная. Она изменяется во времени, в частности в связи с колебаниями уровня грунтовых вод. Гравитационная водоотдача используется при расчетах осушения безнапорных пластов. По аналогии с этим показателем для характеристики емкостных свойств напорных пластов, которые в процессе фильтрации не осушаются. Ф. М. Бочеве́р предложил понятие ***упругой водоотдачи μ^**** . *Коэффициент упругой водоотдачи — объем воды, который может быть получен с единицы площади напорного пласта при понижении пьезометрического напора на 1 м. Упругую водоотдачу определяют путем опытно-фильтрационных работ п режимных наблюдений. Упругая водоотдача меньше гравитационной. Порядок величины ее $10^{-3} \dots 10^{-5}$.*

Водопроводимость характеризует способность водоносного пласта мощностью m и шириной 1 м пропускать воду в единицу времени при напорном градиенте, равном единице. Водопроводимость T равна произведению коэффициента фильтрации на мощность пласта km и выражается в квадратных метрах в сутки ($\text{м}^2/\text{сут}$).

Коэффициент уровнепроводности — комплексный параметр, характеризующий скорость перераспределения напоров воды в пласте при неустановившейся фильтрации. В безнапорном пласте он равен $a=km/\mu$. В напорном пласте этот параметр называют **коэффициентом пьезопроводности**: он равен $a=km/\mu^*$.

При откачке воды из скважин в условиях слоистых; водоносных горизонтов (в двухслойной или многослойной толще) на дебит скважин и снижение уровня подземных вод, то есть на дренирующий эффект оказывают влияния процессы перетекания подземных вод через слабопроницаемые слои отложений (рис. 30). В этих случаях для расчета дебита скважин, помимо основных параметров, необходимо при двухслойной толще определять гравитационную водоотдачу (μ) верхнего водоносного горизонта, а при слоистой толще — **коэффициент перетекания (B)**. Это комплексный параметр, который находится в зависимости от водопроводимости основного водоносного горизонта, коэффициента фильтрации и мощности разделяющих слабопроницаемых пластов.

Коэффициент перетекания определяют по формуле

$$B = \sqrt{\frac{km}{\frac{k'_0}{m'_0} + \frac{k''_0}{m''_0}}}$$

где km — водопроницаемость основного водоносного горизонта, $m^2/сут$;
 k'_0, k''_0 — коэффициенты фильтрации соответственно перекрывающего и подстилающего слабопроницаемых слоев, $m/сут$; m'_0, m''_0 — мощность этих слоев, m .

При проведении опытно-фильтрационных и мелиоративных работ на прибрежных участках вблизи рек в связи с проектированием дренажа, эксплуатационных и других водозаборов необходимо учитывать закольматированность русловых отложений, ширину реки и несовершенство вреза ее.

При гидродинамических расчетах фильтрационное сопротивление ложа водоема учитывают путем увеличения истинного расстояния от расчетной точки до реки на значение ΔL , принимая, что дополнительное сопротивление, обусловленное увеличением длины потока на значение ΔL , отражает сопротивление русловых отложений или степень деформации потока вблизи реки, канала, дрены и т. д.

Одиночные откачки (без наблюдательных скважин) проводят при нескольких ступенях понижения для нахождения зависимости дебита скважины от понижения уровня подземных вод.

Кустовые откачки проводят, оборудуя опытный участок наблюдательными скважинами, расположенными по одному или двум створам к центральной скважине, из которой ведут откачку. При откачке измеряют дебит скважины и снижение уровня воды в центральной и наблюдательной скважинах. Основное назначение кустовых откачек — определение расчетных гидрогеологических параметров.

В сложных условиях, когда требуется изучить взаимосвязь водоносных горизонтов или эффективность скважин вертикального дренажа и т. д., проводят ***опытно-эксплуатационные откачки***. Они являются разновидностью кустовых откачек, их проводят длительное время (до нескольких месяцев). Эффект опытно-эксплуатационных откачек соизмерим с влиянием проектируемых сооружений, если они должны воспроизвести дренажный эффект или подтвердить возможность получения заданного дебита скважины для водоснабжения.

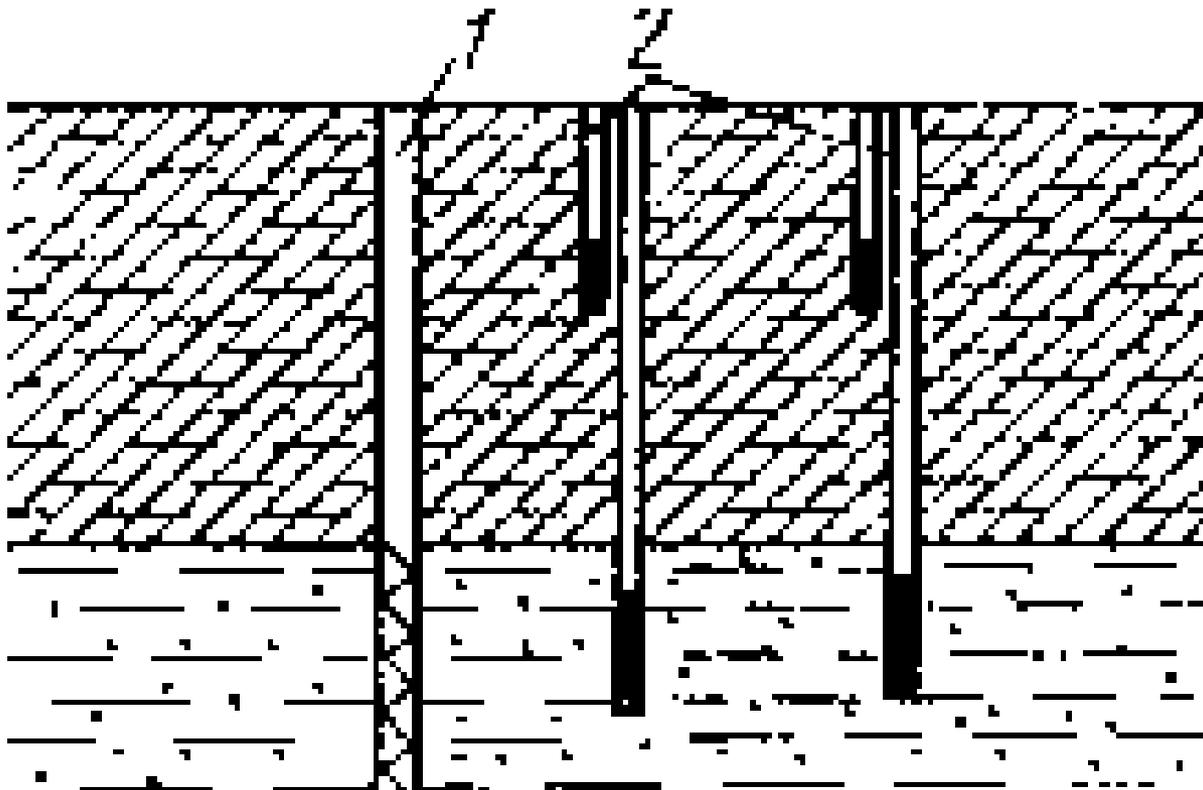


Рис. Расположение наблюдательных пьезометров в двухслойном пласте:

1 — опытная центральная скважина; *2* — наблюдательные кусты скважин.

Метод наливов в шурфы применяют для определения фильтрационных свойств ненасыщенных пород зоны аэрации. Он применим в условиях, когда глубина залегания уровня грунтовых вод от дна шурфа больше суммы высоты капиллярного поднятия и возможной мощности зоны промачивания.

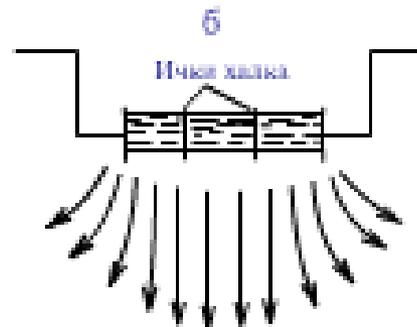
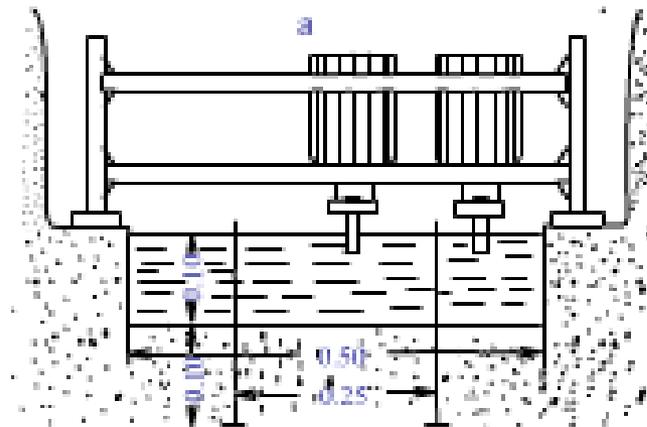
Этот метод заключается в том, что в дно шурфа вдавливают два концентрично расположенных кольца высотой 20 см и диаметром 25...50 см. В оба кольца подают воду, ее уровень поддерживают постоянным и одинаковым в двух цилиндрах; измеряют и вводят в расчет расход воды $Q_{уст}$, поступающий во внутреннее кольцо.

Коэффициент фильтрации рассчитывают по формуле

$$k = \frac{4Q_{cn} l}{\pi d^2 (h_k + h + l)}$$

где l —глубина просачивания воды в грунт; h_k —капиллярное давление в данном грунте, равное примерно 50% максимальной высоты капиллярного поднятия;
 h —высота слоя воды в кольце.

Глубину просачивания определяют после окончания опыта бурением двух скважин—в середине шурфа и на расстоянии нескольких метров от него на глубину возможного промачивания. Во время бурения отбирают образцы грунта (через 0,3...0,5 м) для определения влажности. Сопоставлением влажности по двум скважинам устанавливают глубину l .



Определение коэффициента фильтрации методом налива (по Н. С. Нестеру).

Дебит совершенной скважины. Совершенная скважина в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме фильтрации.

$$Q = \frac{1,36k(h_2^2 - h_1^2)}{\ln x_2 - \ln x_1}$$

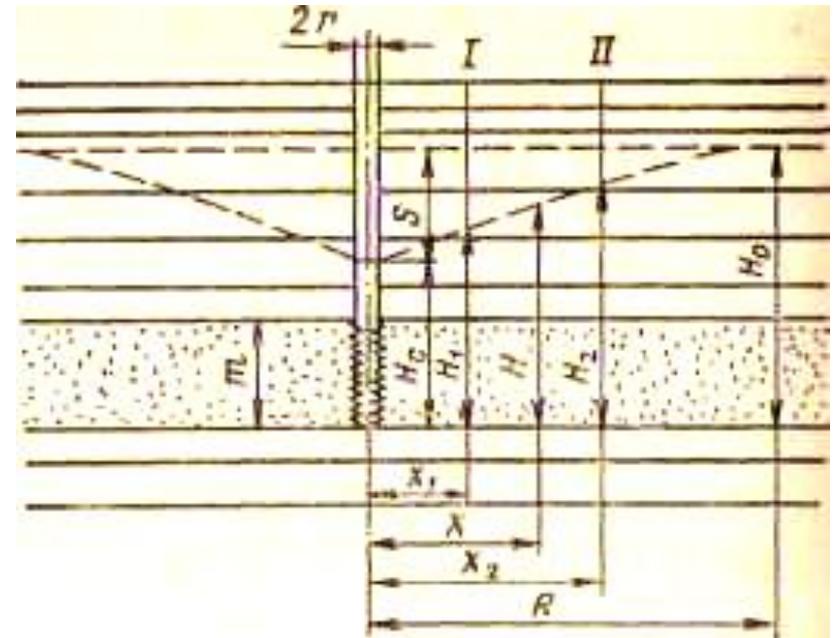
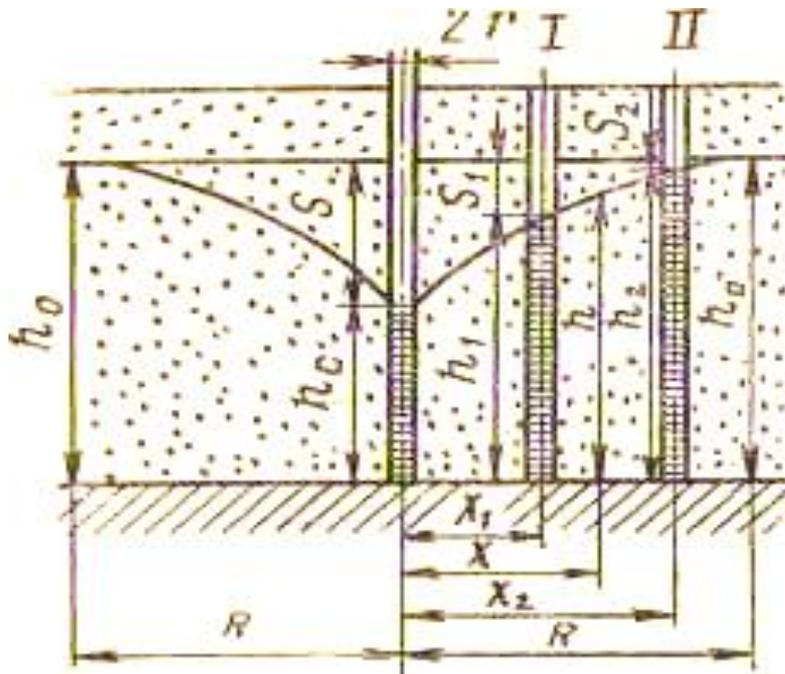


Рис. Схема для определения притока грунтовых вод к совершенной скважине по формуле Дюпюи.

Рис. Приток артезианских вод к совершенной скважине.

Совершенная скважина в напорном однородном водоносном слое.

$$Q = \frac{2,73kmS}{\lg R - \lg r}$$

Дебит несовершенной скважины. Несовершенные скважины по сравнению с совершенными оказывают дополнительное сопротивление потоку подземных вод, поступающему в скважину при откачке. Поэтому при равном понижении дебит несовершенного колодца меньше, чем совершенного. При глубоком залегании водоупора большинство сооружаемых скважин является несовершенными.

Формула Н. К. Гуринского. Несовершенная скважина с затопленным фильтром. Дебит несовершенной скважины с затопленным фильтром при условии, что расстояние от конца фильтра до кровли и подошвы водоносного пласта больше длины фильтра. равен (м³/сут)

$$Q = 2,73 \frac{kl_{\tilde{n}\hat{e}}S_{\tilde{n}\hat{e}}}{\lg \alpha l_{cr} - \lg r_{cr}}$$

где $l_{ск}$ — длина фильтра в скважине, из которой произведена откачка, м;

$S_{ск}$ — понижение уровня в той же скважине, м;

r — радиус скважины, м.

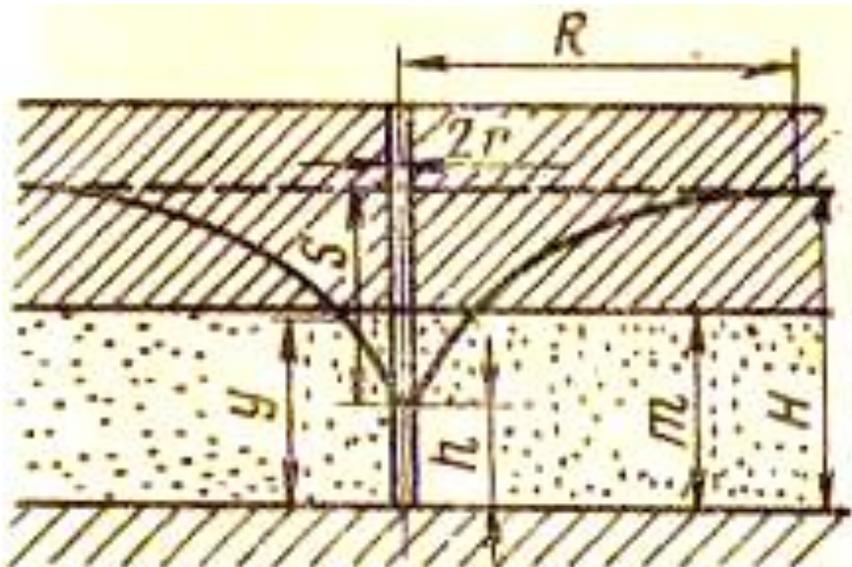


Рис. Приток воды к скважине, работающей в условиях напорно-безнапорных вод.

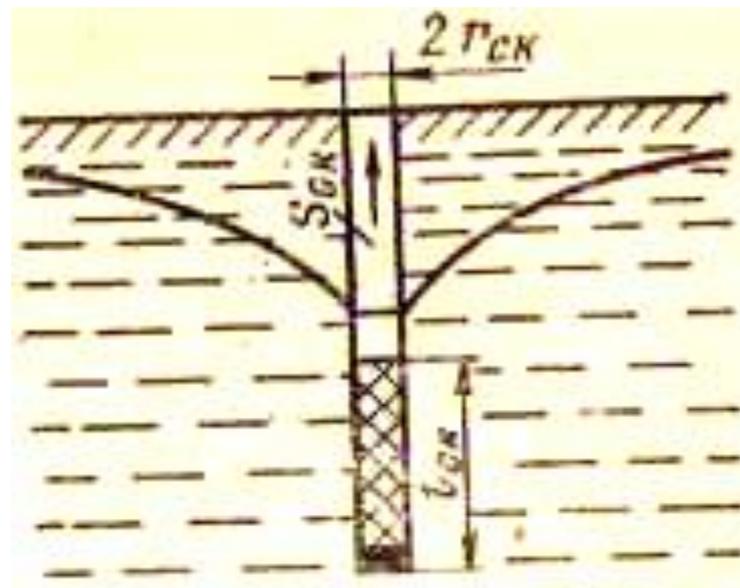


Рис. Приток к несовершенной скважине с затопленным фильтром.

Зависимость дебита скважин от понижения уровня

Значения зависимости дебита скважин от понижения уровня необходимы при гидрогеологических расчетах, связанных с использованием подземных вод, дренированием территории и т. д.

Приведенные выше расчетные формулы дебита скважин показали, что дебит зависит от понижения S . Поэтому сравнивать производительность (водобилие) различных скважин можно по **удельному дебиту q** — расходу при понижении уровня воды в скважине на 1 м. Для напорных вод

$$q = Q/S.$$

Для грунтовых вод характерно убывание удельного дебита с понижением уровня.

Для безнапорных вод между понижением уровня в скважине и дебитом существует параболическая зависимость, а для напорных вод — прямолинейная.