

## Основные гидродинамические элементы фильтрационного потока

Под потоком подземных вод понимаются пространственно оконтуренные потоки гравитационных подземных вод, движение которых происходит в пористой или трещиноватой среде горных пород под действием напорного градиента.

Гидродинамические элементы потока — величины, которые несут основную информацию о потоке подземных вод и полностью его определяют, — мощность, ширина, пьезометрический напор, напорный градиент или гидравлический уклон, направление движения потока, скорость фильтрации и расход.

**Мощность потока ( $h, m$ ).** Она определяется мощностью водонасыщенных горных пород в пределах водоносного горизонта. В потоках грунтовых вод  $h$  — расстояние от свободной поверхности зеркала воды до подстилающего водоупора; в потоках напорных вод  $m$  — мощность водоносного пласта между его верхней и нижней границами (водоупорами).

**Ширина потока ( $B$ ).** Она измеряется в сечении, перпендикулярном направлению движения потока, и зависит от распространения водоносных отложений, а также от режима питания и разгрузки подземных вод.

Пьезометрический напор Я. Термин введен в науку Д. Бернулли, выражается он следующим уравнением:

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

где  $P$  — гидростатическое давление в исследуемой точке потока воды, Па;  $\gamma = \rho g$  — объемная масса воды, кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>) или Н/м<sup>3</sup>;  $z$  — высота исследуемой точки потока над выбранной плоскостью сравнения напоров, м;  $v^2/2g$  — скоростной напор ( $v$  — скорость фильтрации,  $g$  — ускорение свободного падения).

Величина  $v^2/2g$  в потоке подземных вод весьма мала, поэтому ею обычно пренебрегают. Выражение  $P/\gamma$  заменяется величиной  $h_p$ , которая называется пьезометрической высотой. Пьезометрической называется высота, на которую поднимается вода над данной точкой потока под влиянием гидростатического давления  $P$  в этой точке.

Таким образом, пьезометрический напор складывается из двух величин: пьезометрической высоты  $h_p$  и высоты данной точки потока над выбранной плоскостью сравнения напоров  $z$ , т. е.

$$H = h_p + z$$

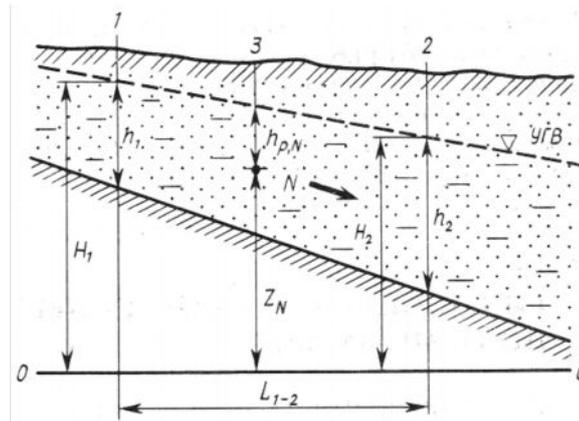


Рис. 1. Схема к определению пьезометрического напора в грунтовом потоке:  
 1, 2, 3 — расчетные сечения;  $h_1, h_2$  — мощности потока соответственно в первом и втором сечениях;  $H_1, H_2$  — пьезометрические напоры соответственно в первом и втором сечениях; УГВ — уровень грунтовых вод; 0-0 — плоскость сравнения; стрелкой показано направление движения потока

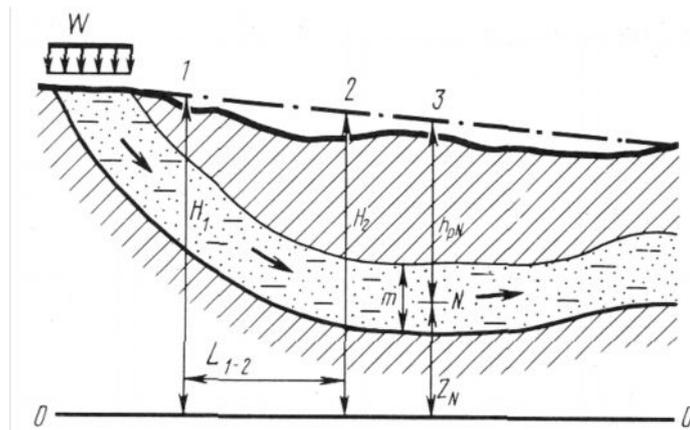


Рис. 2. Схема к определению пьезометрического напора в напорном потоке:  
 1, 2, 3 — расчетные сечения;  $H_1, H_2$  — пьезометрические напоры соответственно в первом и втором сечениях;  
 W — величина инфильтрации (инфильтрационное питание); m — мощность водоносного горизонта;  
 прерывистая линия — пьезометрический уровень; 0-0 — плоскость сравнения; стрелкой показано направление движения потока

Если, например, определяется пьезометрический напор потока в точке  $N$  (рис. 1, 2), то его величина как в грунтовом, так и в напорном потоке равна высоте положения этой точки над выбранной плоскостью сравнения  $z_N$  и плюс высота столба воды над точкой  $N$ :

$$H_N = h_{p,N} + z_N.$$

**Напорный градиент или гидравлический уклон ( $I$ ).** При движении воды через пустоты горных пород часть пьезометрического напора теряется на трение, возникает уклон поверхности подземных вод в сторону их движения. Если сделать вертикальный разрез по направлению движения подземных вод, то получим кривую понижения напора. У вод со свободной поверхностью она называется *кривой депрессии*, а у напорных вод — *пьезометрической кривой*.

Если расстояние между сечениями, в которых определяются значения

пьезометрического напора,  $L_{1-2}$  устремить к нулю, то предел отношения  $\Delta H_{1-2}/L_{1-2}$  даст действительное значение напорного градиента в рассматриваемой точке потока (см. рис. 1):

$$I = \lim_{L_{1-2} \rightarrow 0} \left[ \frac{\Delta H_{1-2}}{L_{1-2}} \right] = -\frac{dH}{dL}. \quad (1)$$

Знак минус в формуле (1) указывает на уменьшение величины напора  $H$  по пути фильтрации (отрицательное значение производной). Если водоупорное ложе в грунтовом потоке горизонтальное и оно принято за плоскость сравнения, то  $H_1 = h_1$ ;  $H_2 = h_2$ . В этом случае напорный градиент может быть представлен следующим образом:

$$I = \lim_{L_{1-2} \rightarrow 0} \left[ \frac{\Delta h_{1-2}}{L_{1-2}} \right] = -\frac{dh}{dL}.$$

Величина напорного градиента для естественных потоков подземных вод обычно невелика, в среднем 0,001—0,0001.

**Направление движения потока.** Оно устанавливается по сопоставлению напоров в разных точках потока. Существует простой способ определения направления движения потока в сторону меньшего напора — по трем точкам. Более точную характеристику направления движения находят по линиям тока. Направление движения потока можно определить и по гидродинамической сетке.

**Скорость фильтрации ( $v$ ).** Отношение расхода потока  $Q$  к площади его поперечного сечения  $F$  дает скорость фильтрации  $v$ .

$$v = \frac{Q}{F}.$$

**Расход потока подземных вод ( $Q$ ).** Он выражается объемом воды, протекающей через поперечное сечение водоносного пласта в единицу времени:

$$Q = vF.$$

При линейном законе фильтрации расход потока определяется следующим образом:

$$\text{для грунтового потока } Q = k_{cp} I_{cp} h_{cp} B_{cp};$$

$$\text{для напорного потока } Q = k_{cp} I_{cp} m_{cp} B_{cp}.$$

В двух последних формулах коэффициенты фильтрации, напорные градиенты, мощности и ширина потока принимаются средними для изучаемого участка.

Обычно при оценке условий фильтрации определяется не полный расход потока  $Q$ , а так называемый единичный расход  $q$ , т. е. расход потока, приходящийся на 1 м его ширины. Формулы для единичного расхода имеют вид:

для грунтового потока  $q = Q/B_{cp} = k_{cp}I_{cp}h_{cp}$ ;

для напорного потока  $q = Q/B_{cp} = k_{cp}I_{cp}m_{cp}$ .

### **Основные гидродинамические особенности потоков подземных вод**

Гидродинамические особенности потоков подземных вод заключаются в изменении гидродинамических элементов потока под влиянием естественных и искусственных факторов. Выяснение изменений гидродинамических элементов потока во времени и пространстве необходимо для правильного перехода от реальных природных условий к расчетной схеме, позволяющей проводить обоснованные гидрогеологические расчеты.

По П. П. Климентову и В. М. Кононову (1985), основными факторами, оказывающими влияние на изменение гидродинамических характеристик потока, являются: 1) степень водонасыщенности горных пород; 2) условия залегания и гидравлический характер потока; 3) условия питания и разгрузки; 4) фильтрационные свойства горных пород и свойства фильтрующейся жидкости; 5) форма и характер границ, граничные условия.

**Степень водонасыщенности горных пород.** По степени водонасыщенности горных пород выделяют зону аэрации (ненасыщенные или частично насыщенные водой горные породы) и зону насыщения (зону фильтрации). Виды и закономерности движения воды в зоне аэрации, а также законы движения воды в зоне насыщения различны и рассматриваются в самостоятельных разделах.

**Условия залегания и гидравлический характер потоков.** По условиям залегания в зоне насыщения выделяются два основных типа потоков: безнапорные и напорные. Термин «безнапорный поток» не следует понимать буквально. Напоры имеет любой поток подземных вод, независимо от его гидравлического характера. Безнапорные потоки залегают, как правило, неглубоко от поверхности земли, имеют свободную поверхность подземных вод и непосредственную связь с атмосферой.

Напорные потоки расположены обычно ниже потоков грунтовых вод в пластах, изолированных непроницаемыми пластами от атмосферы и от смежных в разрезе водоносных горизонтов. Пьезометрическая поверхность в них находится всегда выше кровли водоносного пласта, в связи с чем давление на поверхности потока (у кровли) всегда больше атмосферного и имеется избыточный напор над кровлей горизонта.

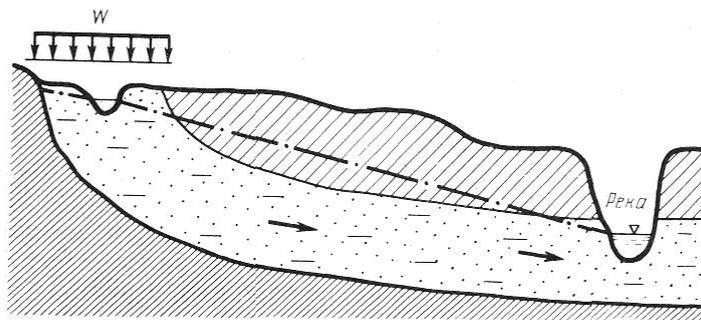


Рис. 3. Схема фильтрации в условиях напорно-безнапорного потока:  
 $W$  — величина инфильтрации; пунктирная линия — пьезометрическая кривая; стрелкой показано направление движения потока

В определенных природных условиях встречаются потоки напорно-безнапорных вод. Так, например, вблизи поверхностных водоемов, дренирующих напорные потоки, пьезометрический уровень опускается ниже кровли водоносного пласта (рис. 3). Нередко условия напорно-безнапорного движения возникают вблизи водозаборных сооружений. Возможности изменения гидравлического характера потока необходимо учитывать при гидрогеологических расчетах.

**Условия питания и разгрузки подземных вод.** По условиям питания и разгрузки выделяются три типа потоков: 1) потоки с сосредоточенным питанием и разгрузкой; 2) потоки с рассеянным питанием и разгрузкой; 3) потоки со смешанным питанием и разгрузкой.

В потоках первого типа питание и расходование подземных вод сосредоточено на отдельных локальных участках или границах потока. Гидродинамические особенности этого типа потоков заключаются в постоянстве их расходов на всем пути движения. В потоках второго типа питание и разгрузка подземных вод осуществляется на значительных площадях их распространения. В потоках грунтовых вод рассеянное питание происходит

путем инфильтрации атмосферных осадков через зону аэрации, а разгрузка — за счет испарения с поверхности грунтовых вод. В напорных водах рассеянная разгрузка и питание осуществляются в основном через кровлю и подошву потока при гидравлической связи со смежными водоносными горизонтами.

В подземных потоках третьего типа гидродинамические особенности проявляются на разных участках по-разному в зависимости от условий питания и разгрузки на изучаемом участке и его границах.

**Фильтрационные свойства горных пород и свойства фильтрующейся жидкости.** По фильтрационным свойствам водовмещающие горные породы могут быть изотропными (фильтрационные свойства по всем направлениям одинаковые) и анизотропными

(фильтрационные свойства зависят от направления). Примером изотропных пород являются пески, песчаники, известняки, а анизотропных — лёссы, лёссовидные суглинки, ленточные глины. Понятие об анизотропии нельзя отождествлять с понятием о неоднородности водоносной толщи. Анизотропия обусловлена структурными и текстурными особенностями породы, а неоднородность — различием литологического состава водоносной толщи в горизонтальном и вертикальном направлениях. Неоднородные водоносные толщи в природе встречаются наиболее часто.

При изучении анизотропных и неоднородных водоносных толщ прибегают к их схематизации, приведению области фильтрации либо к условно однородной (методами осреднения водопроводимости), либо к неоднородной схеме, для которой имеются решения существующими методами.

На условия фильтрации оказывают влияние и свойства фильтрующейся жидкости, особенно ее вязкость и плотность.

**Форма и характер границ. Краевые условия.** Потоки подземных вод имеют границы естественные и искусственные, внутренние и внешние, проницаемые и непроницаемые, которые оказывают существенное влияние на гидродинамические условия потоков, их тип, структуру и характер режима.

В качестве естественных границ подземных потоков могут быть рассмотрены контуры питающих или дренирующих их рек, озер, оврагов, балок, а также болота, мочажины, контакты пород различной водопроницаемости, тектонические нарушения и т. п. Искусственными границами являются контуры инженерных сооружений, оказывающих то или иное влияние на потоки подземных вод (скважины, колодцы, галереи и т. д.). Инженерные сооружения следует рассматривать как внутренние «контуры» (границы) области фильтрации, а естественные границы — как внешние. Формы границ потоков могут быть самыми разнообразными (прямолинейными, ломаными, криволинейными, круговыми и др.

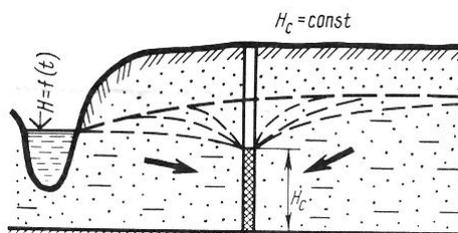


Рис. 4. Схема граничных условий первого рода.

Потоки подземных вод в естественных и искусственных условиях представляют собой единую физическую область, внутри которой распределение давления, скоростей и

расходов подземных вод определяется так называемыми начальными и граничными условиями или в совокупности — *краевыми условиями*.

*Начальные условия* характеризуют распределение основных гидродинамических элементов в потоке в начальный момент времени и обычно задаются распределением напоров  $H$  в пределах потока:

$$H = f(x, y, z), \text{ или в частном случае } H = \text{const.}$$

Граничные условия подразделяются на четыре рода.

**Граничные условия первого рода:** в этом случае на границе области задается значение напора

$$H = f(t) \text{ или } H = \text{const.}$$

Граничные условия первого рода наблюдаются на границах подземных потоков с поверхностными водотоками, уровень воды в которых изменяется во времени [ $H = f(t)$ ] или при эксплуатации скважин с постоянным понижением, где величина напора остается величиной постоянной:  $H = \text{const}$ , (рис. 4).

**Граничные условия второго рода:** условия характеризуют расход подземных вод  $q$  на границах области фильтрации:

$$q = f(t); q = \text{const} \text{ или } q = 0.$$

Граничные условия второго рода (рис. 5) имеют место в скважинах при эксплуатации их с постоянным расходом ( $q = \text{const}$ ); на границах потоков с изменением расхода во времени [ $q = f(t)$ ] или на границах с непроницаемыми породами ( $q = 0$ ).

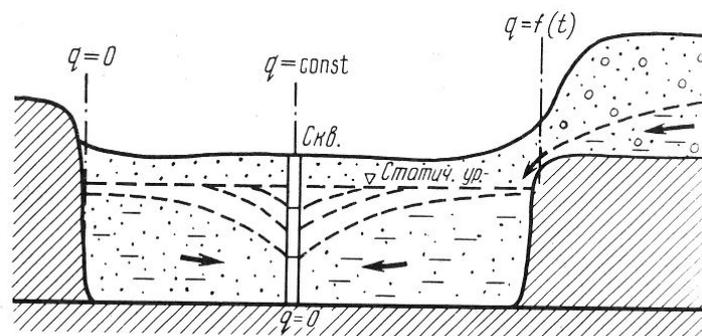


Рис. 5. Схема граничных условий второго рода.

**Граничные условия третьего рода:** условие выражает линейную зависимость расхода от разности напоров:

$$q = k_0/m_0(H_1 - H_2).$$

Оно может иметь место при наличии рассеянного питания или, например,

расходования воды на границе потоков в условиях гидравлической взаимосвязи водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемым слоем (рис. 6).

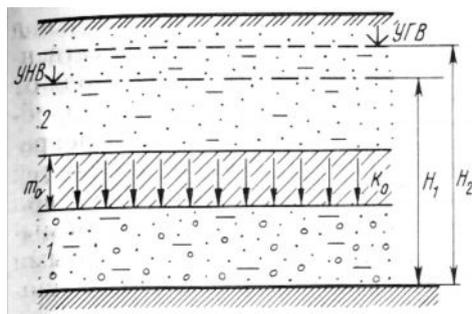


Рис. 6. Схема граничных условий третьего рода:

1 — водоносный горизонт напорных вод с пьезометрическим напором  $H_1$ , 2 — водоносный горизонт грунтовых вод с пьезометрическим напором  $H_2$ , УНВ — уровень напорных вод; УГВ — уровень грунтовых вод;  $m_0, k_0$  — мощность и коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя

**Граничные условия четвертого рода:** условия отвечают случаю взаимодействия двух разнородных горизонтов на их контакте:

$$H_{L1} = H_{L2}; \quad q_{L1} = q_{L2}.$$

Здесь напоры и расходы через поперечное сечение любой полосы тока с обеих сторон этой границы равны между собой в силу неразрывности течения (рис. 7).

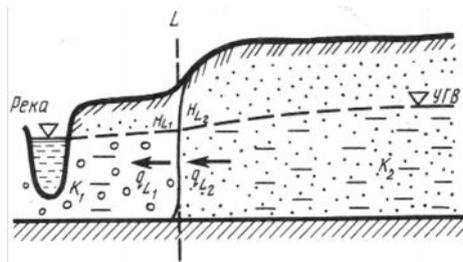


Рис. 7. Схема граничных условий четвертого рода

В зависимости от формы и характера границ формируются различные по виду и структуре потоки подземных вод. Различают одномерные, двухмерные и трехмерные потоки (по числу составляющих скорости фильтрации).

Все потоки подземных вод в природных условиях являются трехмерными, в которых гидродинамические элементы представляют собой функции пространственных координат  $X, Y, Z$ . Но обычно трехмерные потоки схематизируются и представляются в виде расчетных схем для одномерного и двухмерного потоков. Если природные условия настолько сложны, что не поддаются такой схематизации, решение задач выполняется с помощью моделирования.

В зависимости от формы линий токов потоки подразделяются на плоские и

радиальные.

Поток называется плоским, если линии токов параллельны некоторой плоскости, секущей поток. Если эта плоскость вертикальна, поток называется плоским в разрезе, если горизонтальна — плоским в плане.

В *радиальном* потоке линии тока представляют собой семейство прямых, сходящихся в одной точке или расходящихся от нее, а линии равных напоров — семейство окружностей, перпендикулярных к линиям тока. Радиальный поток может быть сходящимся (например, приток воды в скважину при откачке) или расходящимся (при нагнетании или наливе воды в скважину), *радиально-симметричным* (линии напора — коаксиальные окружности) или *планово-радиальным* (нет симметрии).

Влияние границ на условия работы инженерных сооружений, действующих в потоке, зависит от их местоположения. Если влияние боковых границ не сказывается на условиях работы инженерных сооружений из-за их значительной удаленности, то поток называется *неограниченным* или *бесконечным*. При влиянии на условия работы инженерных сооружений одной из границ потока он называется *полуограниченным* или *полубесконечным*, а при влиянии нескольких границ — *ограниченным*.