

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

ЧАСТЬ 3

Плоскопараллельная геофильтрация

Лекция № 16. Одномерная плоскопараллельная стационарная фильтрация

16.1. Типы расчетных схем

Плоскопараллельная фильтрация - основной тип потока в междуречном массиве. Так как ЛТ параллельны, такую фильтрацию называют линейной. Различают фильтрацию в напорных и грунтовых (безнапорных) потоках, в однородных и неоднородных по строению пластах, с горизонтальным и наклонным положением водоупора (безнапорные), постоянной или переменной мощностью и шириной потока в плане, наличием или отсутствием инфильтрационного питания. Начало координат принимается на урезе левой или правой реки. Если направление потока совпадает с осью x , то расход считаем положительным ($q_x > 0$), в противном случае – отрицательным ($q_x < 0$).

16.2. Потоки в однородных пластах

Для потока в однородном напорном пласте с постоянной водопроницаемостью ($T = \text{const}$) (рис. 16.1) имеем

$$q_x = -T \frac{\partial H}{\partial x}. \quad (16.1)$$

Интегрирование в пределах $x=0, H=H_0; x=L, H=H_L$ дает

$$q = T \frac{H_0 - H_L}{L}, \quad (16.2)$$

а в пределах $x=0, H=H_0, x=x, H=H_x$:

$$q = T \frac{H_0 - H_x}{x}, \quad (16.3)$$

то есть уравнение Дарси.

Приравнявая (16.2) и (16.3) получим

$$H_x = H_0 - \frac{H_0 - H_L}{L} x. \quad (16.4)$$

Уровень подземных вод имеет вид плоскости, а в разрезе – это прямая линия. Аналогичные уравнения могут быть получены путем интегрирования уравнения Лапласа

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = 0 \quad (16.5)$$

в виде $H = Ax + B$. A и B определяем из граничных условий $x=0, B=H_0, x=L, A = \frac{H_L - H_0}{L}$. Окончательно имеем уравнение (16.4). Подставляя (16.4) в (16.1) и дифференцируя по x получим (16.2).

Для горизонтального потока грунтовых (безнапорных) вод в однородном пласте (рис. 16.2) имеем

$$q_x = -Kh \frac{dh}{dx}. \quad (16.6)$$

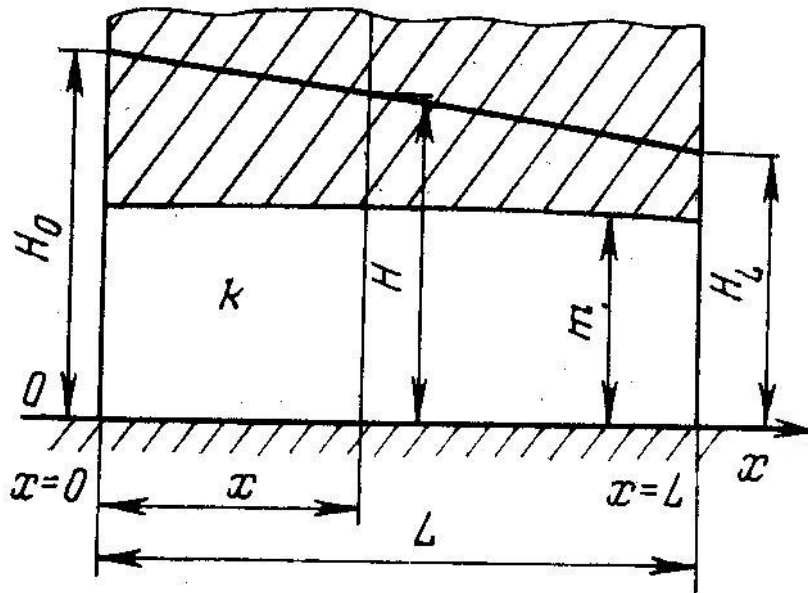


Рис. 16.1. Расчетная схема линейного потока в однородном напорном пласте

Вводя h под знак производной и используя подстановку $\frac{h^2}{2} = u$ (Лекция № 7), получим

$$q = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} \quad (16.7)$$

$$\text{и } h_x^2 = h_0^2 - \frac{h_0^2 - h_L^2}{L} x \quad (16.8)$$

Кривая уровня подземных вод имеет вид параболы.

$$\text{Очевидно, что и здесь при } (h_0 - h_L) \leq 0,25 \frac{h_0 + h_L}{2} \quad (16.9)$$

можно полагать $h_{cp} = \frac{h_0 + h_L}{2}$ и использовать уравнения вида (16.2) и (16.4) для напорных вод.

16.3. Поток в неоднородных пластах

Для потока с кусочно-однородным строением используется метод фрагментов (рис. 16.3) и значение средневзвешенного коэффициента фильтрации определяется по формуле

$$K_{0-L} = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2} + \frac{l_3}{K_3}} \quad (16.10)$$

Для потока с линейным изменением коэффициента фильтрации по зависимости

$$K_x = K_0 - \frac{K_0 - K_L}{L} x \quad (16.11)$$

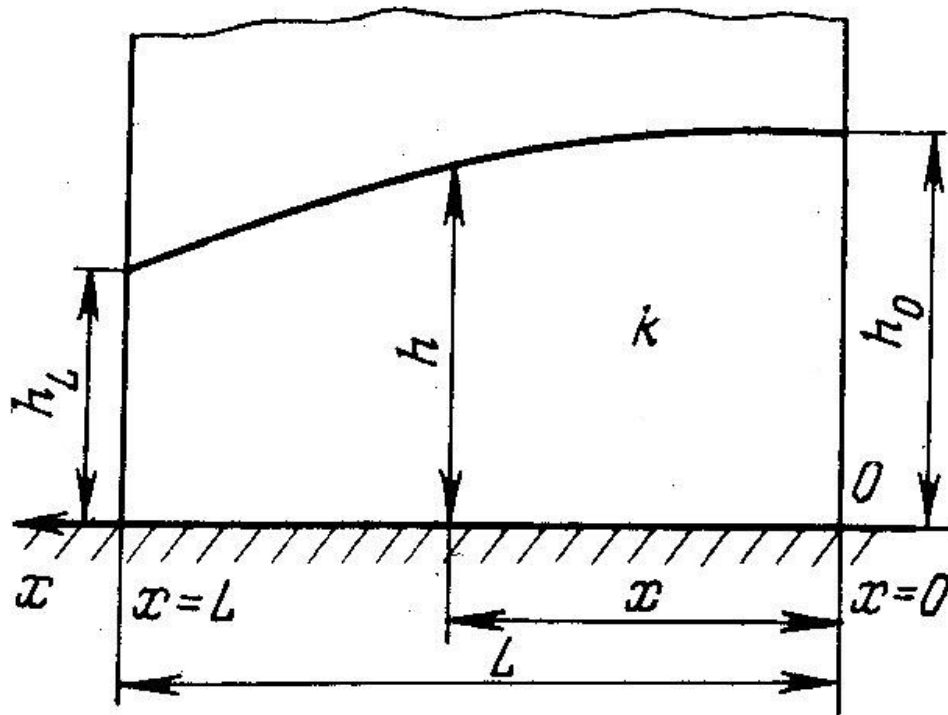


Рис. 16.2. Расчетная схема линейного потока грунтовых вод

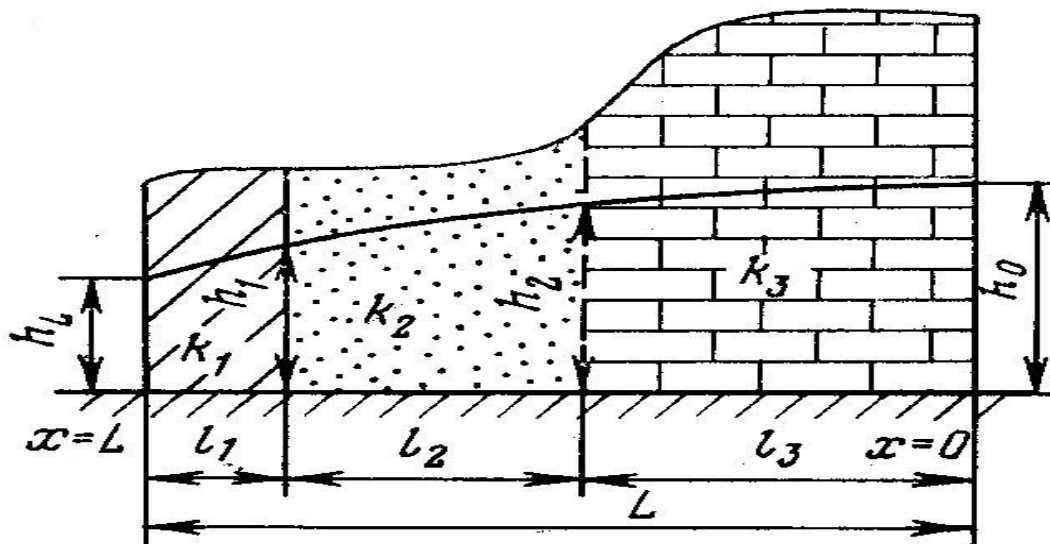


Рис. 16.3. Расчетная схема кусочно-однородного пласта

его средневзвешенное значение определяется по формуле

$$K_{0-L} = \frac{K_0 - K_L}{\ln K_0 - \ln K_L} \quad (16.12)$$

Для слоистой толщи (рис. 16.4) среднее значение коэффициента фильтрации определяется по зависимости

$$K_{0L} = \frac{\sum K_i h_i}{\sum h_i} \quad (16.13)$$

Для определения величины расхода при этом используются формулы

(16.2) и (16.7) в зависимости от выполнения условия (16.9).

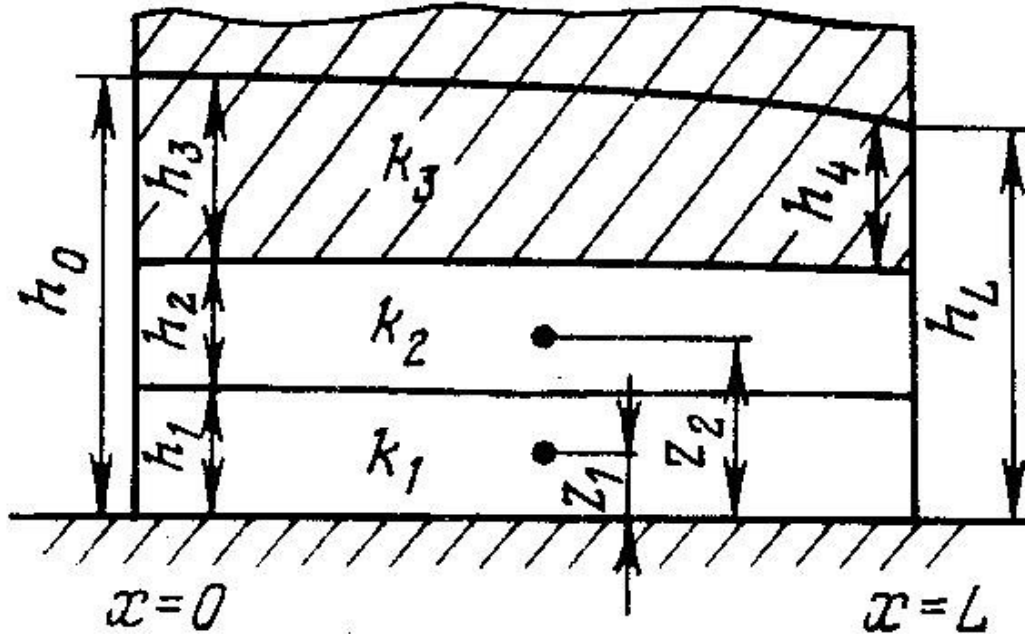


Рис. 16.4. Расчетная схема слоистой толщи

Для потоков с линейным изменением мощности m или ширины в плане B используется зависимость (16.12), где вместо K подставляется m или B .

Для определения положения уровня H_x или мощности потока h_x используется прием, основанный на приравнивании уравнений для расходов (16.2) или (16.7) записанных для двух пар сечений $(0-L)$ и $(0-x)$, аналогично выводу формулы (16.4). При этом важно правильно определить средневзвешенное значение коэффициента фильтрации на участке потока $(0-x)$. Например, формула (16.12) примет вид

$$K_{0-x} = \frac{K_0 - K_x}{\ln K_0 - \ln K_x} \quad (16.14)$$

16.4. Потоки с инфильтрационным питанием

Очевидно, что величина латерального расхода q_x в этом случае будет изменяться от сечения к сечению по следующей зависимости

$$q_x = q_0 + W \cdot x \quad (16.15)$$

где q_0 - расход в сечении $x = 0$ (рис. 16.5).

Подставив (16.15) в (16.6) имеем

$$-Kh \frac{dh}{dx} = q_0 + W \cdot x \quad (16.16)$$

После интегрирования (16.16) в пределах от $x=0$ до $x=x$, получим

$$-K \frac{h_x^2 - h_0^2}{2} = q_0 \cdot x + \frac{W \cdot x^2}{2} \quad (16.17)$$

$$\text{откуда } q_0 = K \frac{h_0^2 - h_x^2}{2x} - \frac{Wx}{2} \quad (16.18)$$

а полагая $x = L$, получим
$$q_0 = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} - \frac{WL}{2} \quad (16.19)$$

Подставляя (16.19) в (16.15) окончательно имеем

$$q_x = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} - \frac{WL}{2} + Wx \quad (16.20)$$

уравнение Г.Н. Каменского (1935).

В граничном сечении $x = L$ расход будет равен

$$q_L = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} + \frac{WL}{2}, \quad (16.21)$$

то есть расходы q_0 и q_L отличаются на величину WL .

Приравнявая формулы (16.18) и (16.19) можем определить величину h_x в любом сечении:

$$h_x = h_0^2 - \frac{h_0^2 - h_L^2}{L} \cdot x + \frac{Wx}{K}(L - x) \quad (16.22)$$

Кривая уровня имеет вид эллипса.

Зная величину h_x можно определить неизвестное W по зависимости

$$W = K \left(\frac{h_0^2 - h_L^2}{L(L - x)} - \frac{h_0^2 - h_x^2}{(L - x)x} \right) \quad (16.23)$$

При наличии инфильтрационного питания на междуречье возможно возникновение водораздела подземных вод. Здесь $q_x = 0$. Непременным условием наличия водораздела являются противоположные знаки у расходов на урезах рек q_0 (16.19) и q_L (16.21).

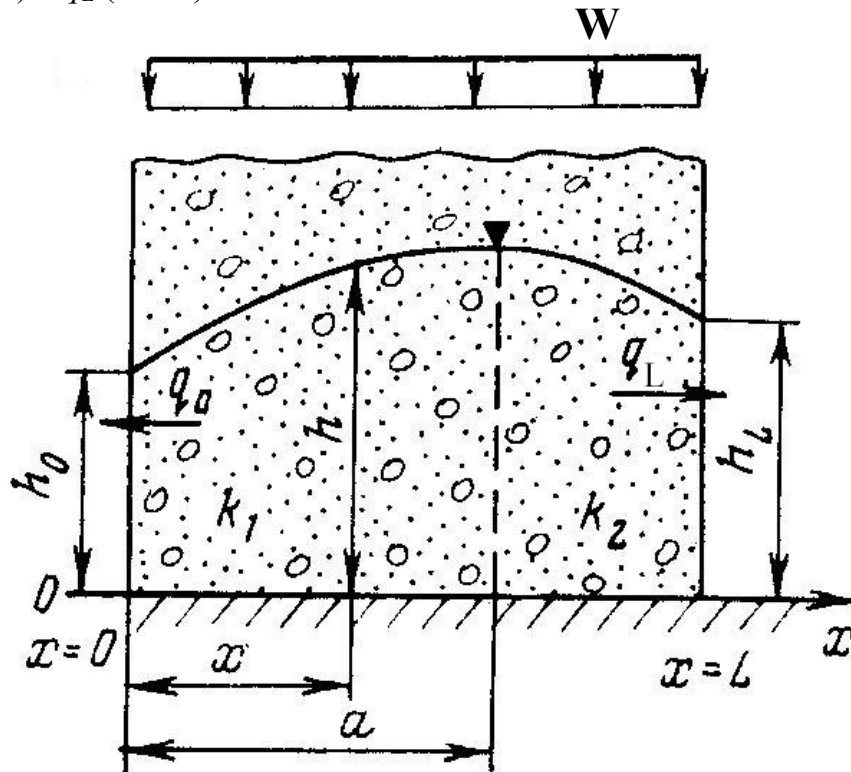


Рис. 16.5. Расчетная схема линейного потока с инфильтрацией
Такое возможно, если

$$\frac{WL}{2} \geq \left| K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} \right|, \quad (16.24)$$

т.е. вертикальная составляющая расхода больше или равна горизонтальной составляющей. В этом случае положение водораздела a определяется из зависимости (16.20), полагая $q_x=0$, имеем (рис. 16.5):

$$a = \frac{L}{2} - \frac{K}{W} \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L}. \quad (16.25)$$

Если $a < 0$ или $a > L$, то водораздел отсутствует. В этом можно убедиться, проверив условие (16.24). При кусочно-неоднородном строении ($K \neq const$) междуречья и (или) неравномерном (по x) инфильтрационном питании расчетные зависимости могут быть получены методом фрагментов. Все междуречье делится на два (или более) фрагмента, так что в пределах каждого из них $W=const$ и $K=const$. Пусть длина каждого фрагмента l_1 и l_2 , а мощность потока на границе фрагментов h_s . Тогда на границе фрагментов можем записать формулы для расходов:

$$q_1 = K_1 \frac{h_0^2 - h_s^2}{2l_1} + \frac{W_1 l_1}{2} \text{ и } q_2 = K_2 \frac{h_s^2 - h_L^2}{2l_2} - \frac{W_2 l_2}{2}. \quad (16.26)$$

Учитывая, что на границе фрагментов $q_1 = q_2$, приравнявая правые части этих формул, находим h_s . Затем в каждом фрагменте может определить h_x и q_x по формулам (16.22) и (16.20), используя в качестве граничных условий: для первого фрагмента $x=0$ $h=h_0$, $x=l_1$ $h=h_s$, для второго – $x=0$ $h=h_s$, $x=l_2$ $h=h_L$.

Вопросы к лекции №16

1. В чем заключается различие в формулах для единичных расходов стационарной плоскопараллельной и радиальной фильтрации?
2. В каких расчетных схемах положение кривой уровня не зависит от фильтрационных свойств пласта?
3. Какие погрешности возникают, если пользоваться уравнением (16.4) вместо (16.8)?
4. Как получить уравнение для построения пьезометрической кривой, если известна формула (16.20)?
5. Как доказать, что мощность грунтового потока с инфильтрационным питанием больше, чем при его отсутствии?
6. Как, зная уравнение (16.20), получить формулу для определения положения подземного водораздела?
7. Если по зависимостям (16.19) и (16.21) $q_0 > 0$ и $q_L > 0$ существует или нет подземный водораздел?
8. Какие условия должны быть выполнены при оценке W по формуле (16.23)?
9. Получите уравнения для определения расхода напорного потока, если установлено, что мощность в нем изменяется по закону (16.11).

10. Существует ли водораздел и где он находится, если вертикальный водообмен равен горизонтальному (формула 16.24)?
11. Если коэффициент фильтрации песков существенно возрастает по пути движения напорных вод, какой вид имеет кривая уровня и почему?
12. Как влияет на форму кривой уровня грунтовых вод наличие испарения и почему?
13. Какой вид имеет поверхность уровня безнапорного плоскопараллельного потока подземных вод? Меняется ли градиент вдоль потока? Почему? Как качественно изменяется вид поверхности уровня при наличии инфильтрации? Меняется ли расход от сечения к сечению в каждом из этих случаев?

Лекция № 17. Плоскопараллельная нестационарная фильтрация

17.1. Математическая постановка задачи и типы расчетных схем

Задача описывается основным дифференциальным уравнением одномерной фильтрации

$$a \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{W}{\mu} = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (17.1)$$

Математически задача рассматривается в приращениях уровня за счет изменения уровня на границах потока ΔH^0 , так что $H(x, t) = H_e(x, 0) + \Delta H(x, t)$, либо за счет дополнительного инфильтрационного питания ΔW^0 , характерного только для прогнозного периода, так что $W = W_e + \Delta W^0$. В этом случае согласно метода суперпозиции вместо (17.1) имеем два уравнения

$$\frac{\partial^2 H_e}{\partial x^2} + \frac{W_e}{T} = 0, \quad (17.2)$$

с граничными условиями $x=0 \ H=H_0$ и $x=L \ H=H_L$, $W=W_e$, (17.3) характеризующее начальное распределение уровней в условиях стационарной фильтрации, и

$$a \frac{\partial^2 (\Delta H)}{\partial x^2} + \frac{\Delta W^0}{\mu} = \frac{\partial (\Delta H)}{\partial t}, \quad (17.4)$$

характеризующее только приращение уровня за счет изменившихся на прогноз граничных условий $\Delta H^0(0, t)$ или ΔW^0 . При этом рассматриваются только линейные уравнения фильтрации, то есть такие уравнения, в которых параметры пласта не зависят от изменения уровня ($k, \mu, m = const$) и нет ГУ III рода, типа Q , $W=f(H)$.

В качестве типовых расчетных схем рассматриваются схемы полуограниченного и ограниченного пластов с ГУ I и II рода, без учета (рис. 17.1) и с учетом инфильтрационного питания, заданного на всей площади распространения потока или на полосе шириной B . На границах потока $x=0$ и $x=L$ задаются следующие законы изменения уровня (рис. 17.2): а) мгновенное приращение $\Delta H^0(0, t) = const$, б) постепенное изменение $\Delta H^0(0, t) = v \cdot t = \Delta H^0 \cdot \frac{t}{t_p}$, в) одна

из границ непроницаема. Во всех схемах пласт однородный по строению $k, \mu = const$.

17.2. Одномерный полубесконечный поток без дополнительного инфильтрационного питания ($\Delta W^0 = 0$) при мгновенном подпоре. Краевые условия для случая мгновенного изменения (подпора) уровня на границе имеют вид: $t=0 \Delta H_{x,0}=0$; $t>0 \ x=0 \ \Delta H^0 = const$, $x \rightarrow \infty \ \Delta H = 0$ и $\frac{\partial(\Delta H)}{\partial x} = 0$. Последнее условие характерно для водораздела ($q=0$).

$$\text{Решение имеет вид } \Delta H(x, t) = \Delta H^0 \cdot \operatorname{erfc}(\lambda), \quad (17.5)$$

$$\text{а для безнапорных вод } h^2(x, t) = [h^2(0, t) - h^2(0, 0)] \cdot \operatorname{erfc}(\lambda) + h^2(x, 0),$$

$$\text{где } \lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}. \quad (17.5a)$$

Функция $\operatorname{erfc}(\lambda) = 1 - \Phi(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\lambda e^{-\lambda^2} d\lambda$ - табулированный интеграл вероятности. При $t=0 \ \lambda \rightarrow \infty \ \Phi(\infty)=1$, а $\operatorname{erfc}(\infty)=0$ и $\Delta H(x, t)=0$, что отвечает заданным начальным условиям. При стационарном подпоре уровня, когда $t \rightarrow \infty \ \lambda = 0$ и $\operatorname{erfc}(0)=1$, $\Delta H(x, \infty) = \Delta H^0$, (17.6)

то есть вся кривая уровней перемещается параллельно самой себе на величину ΔH^0 (рис. 17.3б). Для грунтовых вод

$$h^2(x, \infty) = h^2(0, \infty) - h^2(0, 0) + h^2(x, 0), \quad (17.6a)$$

$$\text{причем } h(0, \infty) = h(0, 0) + \Delta H^0.$$

Зона влияния нестационарной фильтрации определяется из условия допустимой погрешности $\varepsilon = \frac{\Delta H(x, t)}{\Delta H^0} = \operatorname{erfc}(\lambda)$. Для $\varepsilon = 0,01 \ \lambda = 2$, тогда из (17.5a) получим

$$R_{\text{вл}} = 4\sqrt{at}. \quad (17.7)$$

Эта зависимость используется для оценки: а) сферы влияния инженерного сооружения (ИС), если подпор создается повышением уровня воды в канале или водохранилище; б) степени влияния внешних границ ($x=L$) на формирование подпора вблизи ИС и необходимости их учета в расчетной схеме. Исходя из этого время t_p , начиная с которого вместо полуограниченного пласта нужно пользоваться схемой ограниченного потока, равно

$$t_p \geq 0,06 \frac{L_{\text{гп}}^2}{a}. \quad (17.8)$$

Для получения уравнения фильтрационного расхода следует в уравнение Дарси (16.1) подставить зависимость (17.5) и продифференцировать по x

$$\Delta q = -kh_{\text{cp}} \frac{\partial \Delta H(x, t)}{\partial x} = \frac{kh_{\text{cp}} \Delta H^0}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}}. \quad (17.9)$$

$$\text{Для } x=0, \text{ на урезе имеем } \Delta q_0 = \frac{kh_{\text{cp}} \Delta H^0}{\sqrt{\pi at}}. \quad (17.10)$$

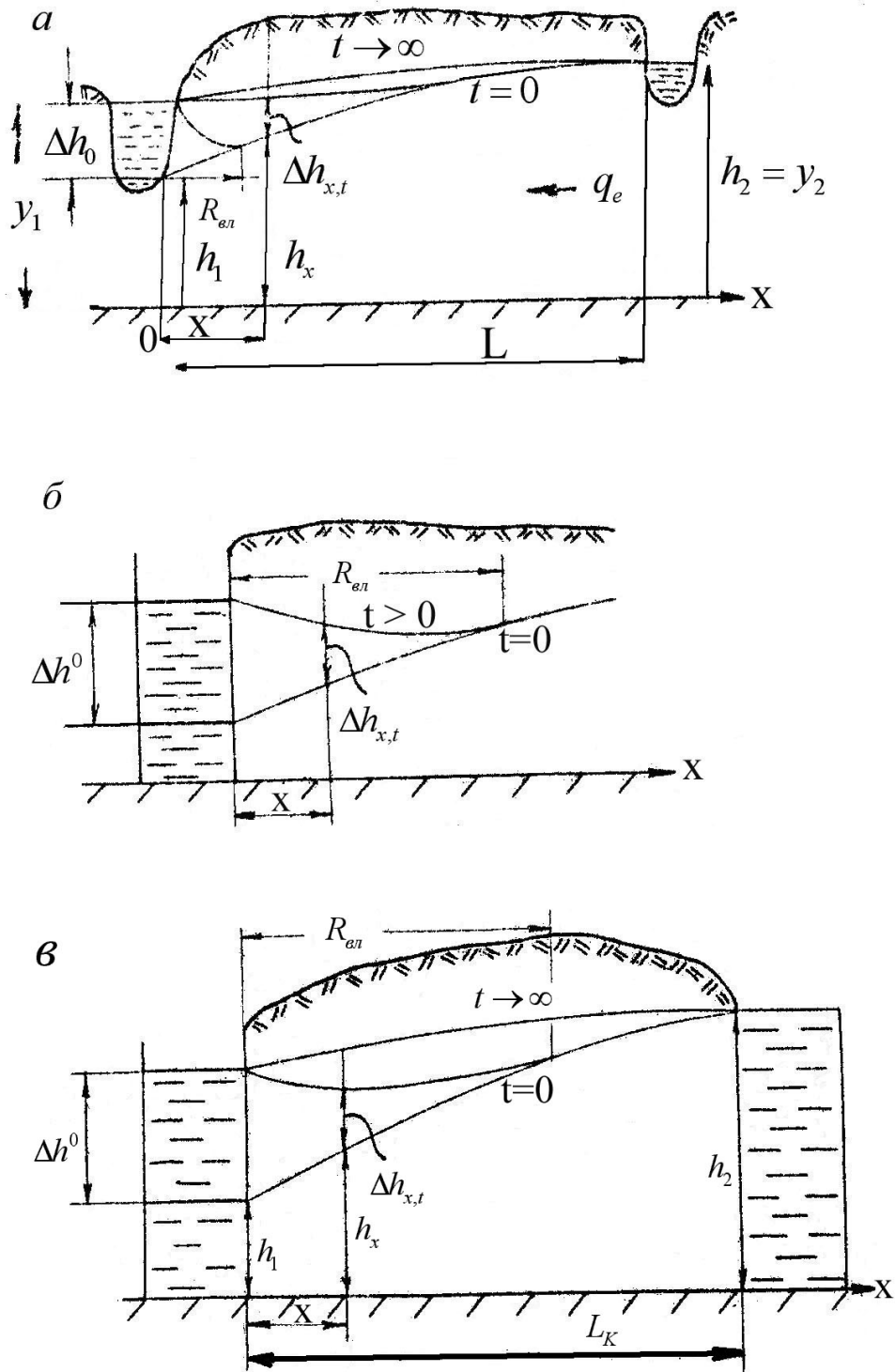


Рис. 17.1. Подпор грунтовых вод и основные расчетные схемы

(а – фильтрационная схема, б – полуограниченный пласт, в – ограниченный пласт)

При наличии естественного расхода потока q_e согласно методу сложения течений имеем (рис.17.3):

$$\text{для уровня } H(x,t) = H(x,0) + \Delta H(x,t), \text{ для расходов } q_{об} = q_e + \Delta q, \quad (17.11)$$

$$\text{причем } q_e = \frac{kh_{cp} \Delta H_{0-L}}{L}, \quad (17.12)$$

где $\Delta H_{0-L} = H_0 - H_L$, как это следует из (17.3).

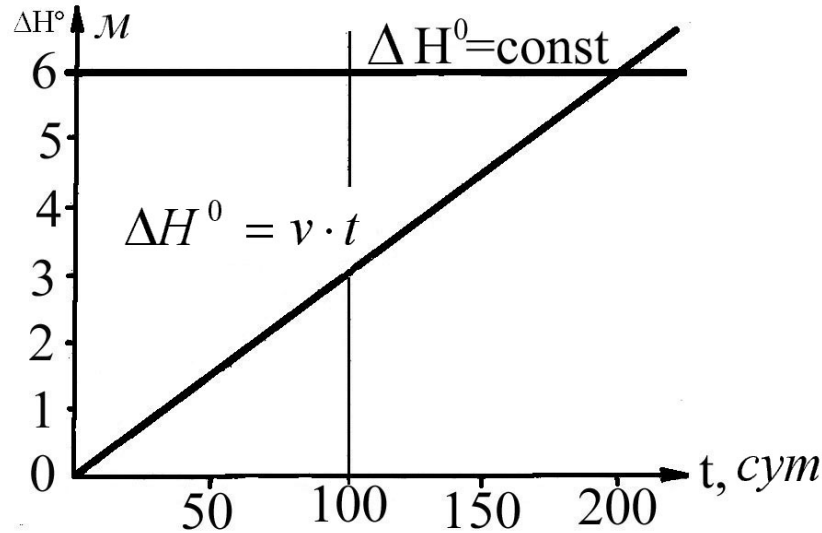


Рис. 17.2. Изменение граничных условий на урезе водохранилища

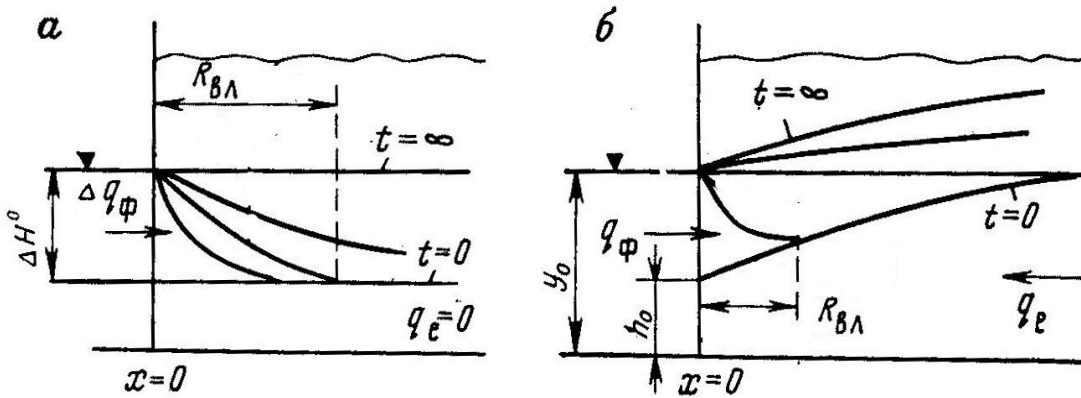


Рис. 17.3. Схема формирования кривых подпора

Если направление потоков q_e и Δq не совпадают (рис. 17.3б), то в процессе формирования подпора грунтовых вод наступает момент, когда фильтрация воды через сечение $x=0$ поменяет знак при $|q_e| = |\Delta q|$.

Этот момент t_0 определится из равенства (17.10) и (17.12):

$$t_0 = \frac{L^2 (\Delta H^0)^2}{\pi a \Delta H_{0-L}^2} \quad (17.13)$$

При $t \rightarrow \infty$ наступают условия стационарного подпора в полубесконечном потоке. При этом, как было указано ранее

$$\Delta H(x, t) = \Delta H^0 \quad (17.14)$$

на всем междуречном массиве и

$$q_{оо} = q_e, \quad (17.15)$$

так как при $t \rightarrow \infty$ $\Delta q_0 \rightarrow 0$.

Почти 95% $\Delta H^0(x, t)$ реализуются при $\lambda = 0,05$, то есть с ошибкой $\varepsilon_H = 5\%$ можно считать подпор установившимся при

$$t_{CH} \geq \frac{100x^2}{a} \quad (17.16)$$

$$\text{или } f_0 \geq 100, \quad (17.17)$$

где $f = \frac{at}{x^2}$ - малый параметр Фурье.

Аналогичные оценки времени наступления стационарного подпора по величине расхода могут быть сделаны из соотношения $\varepsilon_q = \frac{|\Delta q_0|}{|q_e|}$. Из (17.10) и (17.12) с учетом (17.13) получим соотношение

$$t_{cq} = \frac{t_0}{\varepsilon_q^2}, \quad (17.18)$$

то есть с ошибкой $\varepsilon \leq 0,1$ имеем

$$t_{cq} \geq 100t_0. \quad (17.19)$$

Для достаточно типичных условий $x=500$ м, $\Delta H^0=10$ м, $\Delta H_{0-L}=25$ м, $a=2 \times 10^3$ м²/сут стабилизация подпора наступит через

$$t_{CH}=12500 \text{ сут или более 30 лет,}$$

$$t_{cq}=6 \times 10^4 \text{ сут или более 150 лет.}$$

В действительности стабилизация наступает значительно раньше, вследствие воздействия разнообразных природных факторов, обуславливающих нарушение линейности исходных уравнений (неоднородность емкостных свойств пласта, изменение условий питания и разгрузки на междуречье при подъеме уровня воды, влияние внешних границ), которые часто не учитываются в расчетных схемах решаемых задач.

17.3. Одномерный полубесконечный поток без дополнительного инфильтрационного питания ($\Delta W^0 = 0$) при линейном во времени изменении уровня на границе.

$$\text{Граничное условие при } x=0 \text{ имеет вид } \Delta H^0 = v \cdot t = \frac{\Delta H^{\max}}{t_p} t, \quad (17.20)$$

где t_p - расчетный период времени, в течение которого уровень поднимается на величину $\Delta H^{\max}$, причем всегда $t \leq t_p$.

Решение для этого случая записывается в виде

$$\Delta H(x,t) = v \cdot t \cdot R^v(\lambda), \quad (17.21)$$

причем функция $R^v(\lambda)$ табулирована, λ определяется по формуле (17.5а).

Дополнительный расход потока в сечении $x=0$ за счет подпора определяется формулой

$$\Delta q^v = \frac{2kh_{cp}vt}{\sqrt{\pi at}}. \quad (17.22)$$

Наличие естественных положения уровня $H(x,0)$, расхода воды до подпора q_e учитывается методом сложения течений по уравнениям (17.11).

17.4. Ограниченные потоки без дополнительного инфильтрационного питания.

Для ограниченного потока длиной L (рис. 17.1) с условием на левой границе мгновенного изменения уровня $x=0$ $\Delta H^0(0,t) = const$, при неизменном уровне на правой границе $x=L$, $\Delta H_L^0 = 0$ и начальном условии $t=0$, $\Delta H(x,0) = 0$ решение имеет вид

$$\Delta H(x,t) = \Delta H^0 R(\bar{x}, F_0), \quad (17.23)$$

где $R(\bar{x}, F_0) = [1 - \bar{x} - S(\bar{x}, F_0)]$ - табулированная функция, $\bar{x} = \frac{x}{L}$ и $F_0 = \frac{at}{L^2}$ - большой параметр Фурье, $\tau = \frac{L^2}{a}$ - время стабилизации потока, $F_0 = \frac{t}{\tau}$.

Анализ графика $R(\bar{x}, F_0)$ свидетельствует о наступлении стационарной фильтрации с точностью 3-4% при значениях $F_0 \geq 0,5$, или

$$t_c \geq \frac{0,5L^2}{a}. \quad (17.24)$$

Изменение расхода потока на урезе определяется формулой

$$\Delta q_0 = \frac{kh_{cp}\Delta H^0}{L} [1 + S_q(F_0)], \quad (17.25)$$

где $S_q(F_0)$ - табулированная функция. При $F_0 \geq 0,5$ с точностью 3-4% значения $S_q(F_0)$ равно 0, нестационарный подпор переходит в стационарный.

Для стационарного подпора положение уровня в любом сечении определяется уравнением Г.Н. Каменского для напорных вод

$$H(x, \infty) = H(x, 0) + \frac{\Delta H^0(L-x)}{L}, \quad (17.26)$$

для грунтовых вод

$$h^2(x, \infty) = h^2(x, 0) + [h^2(0, \infty) - h^2(0, 0)] \frac{L-x}{L}, \quad (17.26a)$$

а расход потока

$$q = Kh_{cp} \frac{\Delta H_{0-L} + \Delta H^0}{L}, \quad (17.27)$$

причем $h(0, \infty) = h(0, 0) + \Delta H^0$.

17.5. Учет сложных граничных условий

Для открытого потока при изменении уровня воды на обеих границах величина $\Delta H(x,t)$ определяется как сумма изменений уровня, подсчитанных от действия изменения на каждой границе в отдельности. Например, если на границах $x=0$ и $x=L$ происходят мгновенные изменения уровней на величину ΔH_0^0 и ΔH_L^0 в моменты $t=0$ и $t=t'$ соответственно (рис. 17.4-а), то взяв за основу решение (17.23), получим уравнение для суммарного изменения уровня $\Delta H(x,t)$:

$$\Delta H(x,t) = \Delta H_0^0 R_1(\bar{x}, \tau) + \Delta H_L^0 R_2(1 - \bar{x}, \tau - \tau'), \quad (17.28)$$

где $\tau' = \frac{at'}{L^2}$ (17.29)

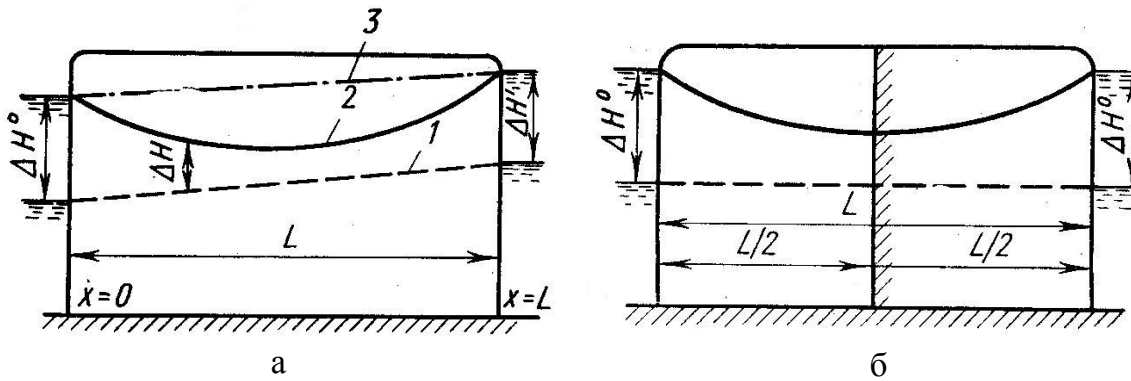


Рис. 17.4. Схема учета сложных граничных условий

Если в этой схеме положить $\Delta H_0^0 = \Delta H_L^0$ и $t' = 0$ (рис. 17.4-б), то в силу симметрии $\frac{\partial \Delta H(x)}{\partial x} = 0$ при $x = 0,5L$. Полученное при этих условиях решение соответствует схеме ограниченного пласта длиной $0,5L$ с разнородными границами, на одной задано $\Delta H(0,t) = \Delta H^0 = const$, а на второй $Q = 0 \left(\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \right)$.

Решение для такой схемы в пласте длиной L имеет вид [7]:

$$\Delta H(x,t) = \Delta H^0 \left[R_1 \left(\frac{x}{2}, \frac{\tau}{4} \right) + R_2 \left(1 - \frac{x}{2}, \frac{\tau}{4} \right) \right]. \quad (17.30)$$

Решение при ступенчатом или ломаном изменении уровня на одной из границ (рис. 17.5) может быть получено аналогично схеме работы скважины с изменяющимся водоотбором (лекция № 10).

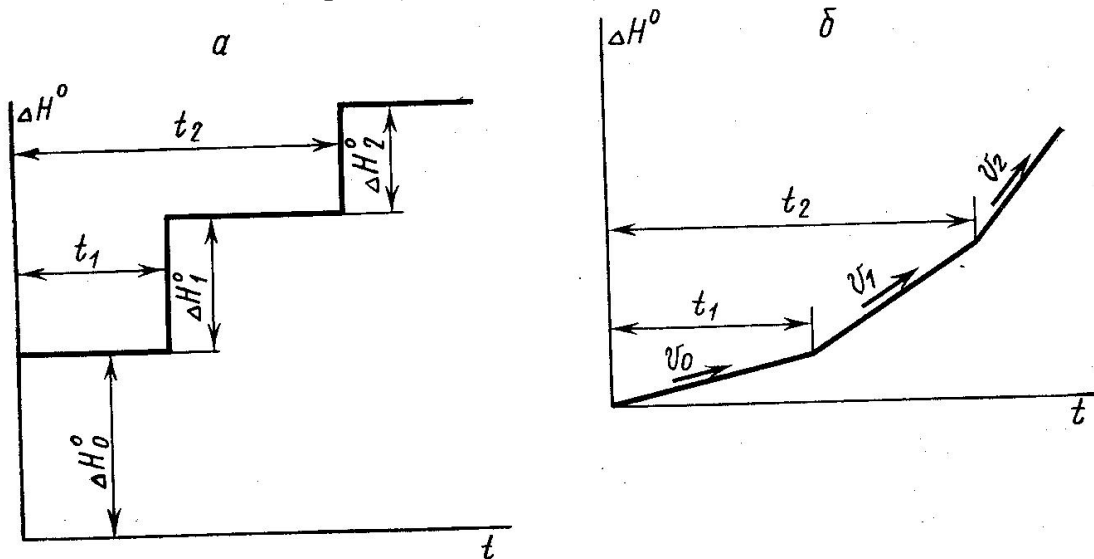


Рис. 17.5. Ступенчатый (а) и ломаный (б) графики изменения граничных условий

17.6. Неограниченный пласт с дополнительным инфильтрационным питанием ΔW^0 на всей площади пласта.

Для этой схемы, характерной для водораздельных пространств, приращение уровня $\Delta H(x, t)$ на всей площади потока будут одинаковыми. Поэтому $\frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial x^2} = 0$ и уравнение (17.4) примет вид

$$\frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} = \frac{\Delta W^0}{\mu} \quad (17.31)$$

После интегрирования получим

$$\Delta H(x, t) = \frac{\Delta W^0 t}{\mu} \quad (17.32)$$

что характеризует непрерывный равномерный подъем уровня на всей площади водоносного пласта.

17.7. Полуоткрытый пласт с дополнительным инфильтрационным питанием ΔW^0 (рис. 17.6а).

На границе пласта $x = 0$ $\Delta H^0(0, t) = 0$. Начальные условия $t = 0$ $\Delta H(x, 0) = 0$, фильтрация описывается уравнением (17.4). Введем новую переменную

$$u(x, t) = \Delta H(x, t) - \frac{\Delta W^0 t}{\mu} \quad (17.33)$$

Продифференцируем (17.33) последовательно по t

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} - \frac{\Delta W^0}{\mu} \quad (17.34)$$

и дважды по x

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial x^2} \quad (17.35)$$

Подставим (17.34) и (17.35) в (17.4) и получим

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (17.36)$$

При этом преобразуются начальные и граничные условия

$$t = 0 \quad u(x, 0) = 0, \quad t > 0 \quad x = 0 \quad u(0, t) = -\frac{\Delta W^0 t}{\mu} = v^w t \quad (17.37)$$

Полученные уравнения (17.36) и (17.37) тождественны рассмотренной ранее задаче подпора уровня в полубесконечном пласте при $\Delta W^0 = 0$ под влиянием равномерного изменения уровня $\Delta H(0, t)$ со скоростью $v^w = \frac{-\Delta W^0}{\mu}$ на границе $x = 0$. Следовательно, решение для переменной u

будет согласно уравнению (17.21) иметь вид

$$u(x, t) = v^w t R^w(\lambda) = -\frac{\Delta W^0 t}{\mu} R^w(\lambda) \quad (17.38)$$

Принимая во внимание зависимость (17.33), окончательно получим

$$\Delta H(x, t) = \frac{\Delta W^0 t}{\mu} [1 - R^w(\lambda)], \quad (17.39)$$

где $R^w(\lambda) = R^v(\lambda)$.

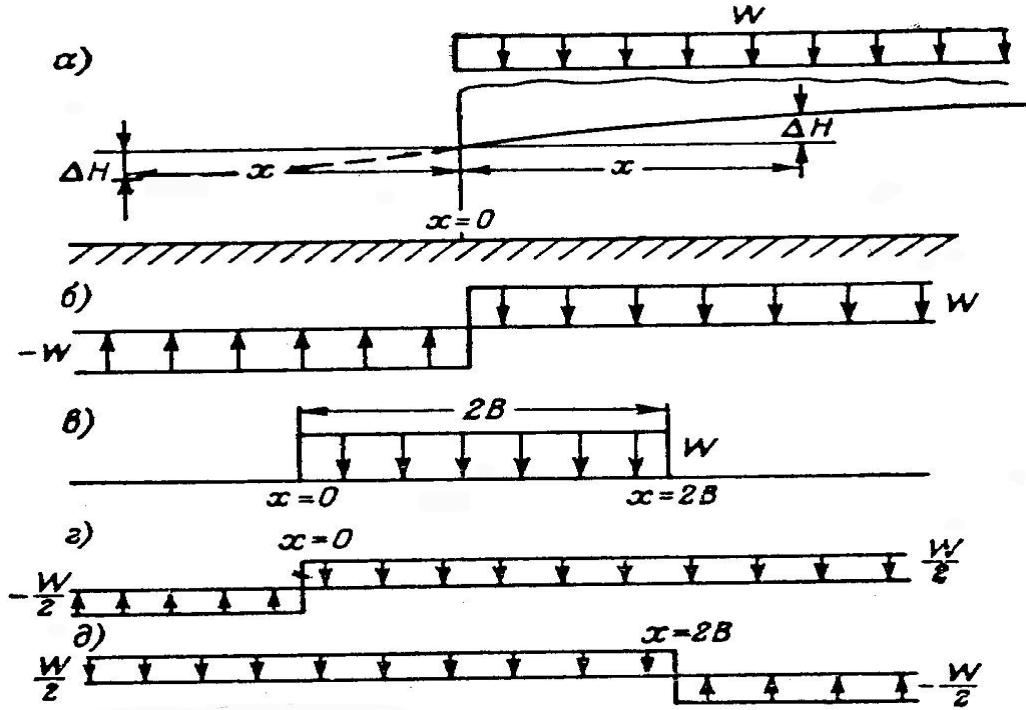


Рис. 17. 6. Схемы к выводу зависимостей для полуограниченного и полосового инфильтрационных потоков

Полученная расчетная схема аналогична схеме для неограниченного пласта, в котором имеются две области: реальная и отображенная (рис. 17.6б). В реальной области задана инфильтрация $+W$, в отображенной $-W$. Из условия зеркальной симметрии на границе областей автоматически соблюдается $\Delta H(0, t) = 0$, что соответствует схеме полуоткрытого пласта (рис. 17.6а).

17.8. Полосовая дополнительная инфильтрация ΔW^0 в неограниченном пласте (рис. 17.6в)

Решение для этой схемы получается, если сложить две схемы зеркально-симметричной инфильтрации, показанных на рис. 17.6г.д. Для каждой из них можно использовать решение (17.39). Так для схемы (рис. 17.6г) при $x > 0$ подъем уровня $\Delta H_1(x, t)$ определяется по формуле

$$\Delta H_1(x, t) = \frac{Wt}{2\mu} [1 - R^w(\lambda)] \quad (17.40)$$

При $x < 0$ будет иметь такой же спад уровня. Для схемы, представленной на рис. 17.6д подъем уровня $\Delta H_2(x, t)$ определяется уравнением

$$\Delta H_2(x, t) = \frac{Wt}{2\mu} [1 - R^w(\lambda')] \quad (17.41)$$

$$\text{где } \lambda' = \frac{2B - x}{2\sqrt{at}} \quad (17.42)$$

Соответственно суммарное решение $\Delta H(x, t)$ будет равно

$$\Delta H(x, t) = \frac{Wt}{\mu} \left[1 - \frac{R''(\lambda) + R''(\lambda')}{2} \right] . \quad (17.43)$$

При вычислении значений $R''(\lambda)$ следует иметь в виду, что функция $1 - R''(\lambda)$ является нечетной, т.е.

$$1 - R''(-\lambda) = -1 + R''(\lambda) \text{ или } R''(-\lambda) = 2 - R''(\lambda) . \quad (17.44)$$

Проанализируем полученную зависимость (17.43) для сечений в центре полосы ($x = B$) и на границе полосы ($x = 0$).

В первом случае $\lambda = \lambda' = \frac{B}{2\sqrt{at}} = \lambda_B$ и получим

$$\Delta H(B, t) = \frac{Wt}{\mu} [1 - R(\lambda_B)] . \quad (17.45)$$

Во втором случае $\lambda = 0$, $\lambda' = \frac{2B}{2\sqrt{at}} = 2\lambda_B$ и получим

$$\Delta H(0, t) = \frac{Wt}{2\mu} [1 - R(2\lambda_B)] . \quad (17.46)$$

Расход воды на границе полосы определяется формулой

$$q(0, t) = WB[1 - \operatorname{erf}(2\lambda_B)] . \quad (17.47)$$

Полученное решение (17.45) может быть представлено в обобщенном виде с использованием безразмерных параметров. Обозначим

$$\Delta \bar{H}(B, t) = \frac{\Delta H(B, t) \cdot Km}{W \cdot B^2} . \quad (17.48)$$

Тогда из (17.45) имеем

$$\Delta \bar{H}(B, t) = F_0 [1 - R(\lambda_B)] , \quad (17.49)$$

где $F_0 = \frac{at}{B^2}$ - параметр Фурье.

$$\lambda_B = \frac{B}{2\sqrt{at}} = \frac{1}{2\sqrt{F_0}} . \quad (17.50)$$

Аналогично для (17.46) получим

$$\Delta \bar{H}(0, t) = 0,5 F_0 [1 - R(2\lambda_B)] . \quad (17.51)$$

Графики для зависимостей (17.49) и (17.51) показаны на рис. 17.7. Такие графики называются диагностическими. Они позволяют выполнять решение не только прямых, но и обратных задач по определению инфильтрационных потерь по данным наблюдений в скважинах за режимом подземных вод.

Можно сформулировать основные принципы получения расчетных зависимостей для разнообразных схем потоков с дополнительным инфильтрационным питанием. Эти схемы различаются по двум основным параметрам: типу граничного условия (ГУ) и положением границ массива орошения относительно границ пласта.

1. Наличие ГУ I рода ($\Delta H = 0$) аппроксимируется зеркально-симметричным заданием инфильтрации с противоположным знаком.

2. Закрытая граница ($Q = 0$) всегда является линией симметрии. Размеры области фильтрации удваиваются, причем в пределах ее отображенной части задается инфильтрация с тем же знаком, что и в реальной области.
3. Полосовая область дополнительной инфильтрации аппроксимируется двумя типовыми схемами инфильтрации в полуограниченном пласте с ГУ I рода на границах полосы, так что бы внутри полосы в каждой схеме было задано $+\Delta W/2$, а вне полосы - $-\Delta W/2$.

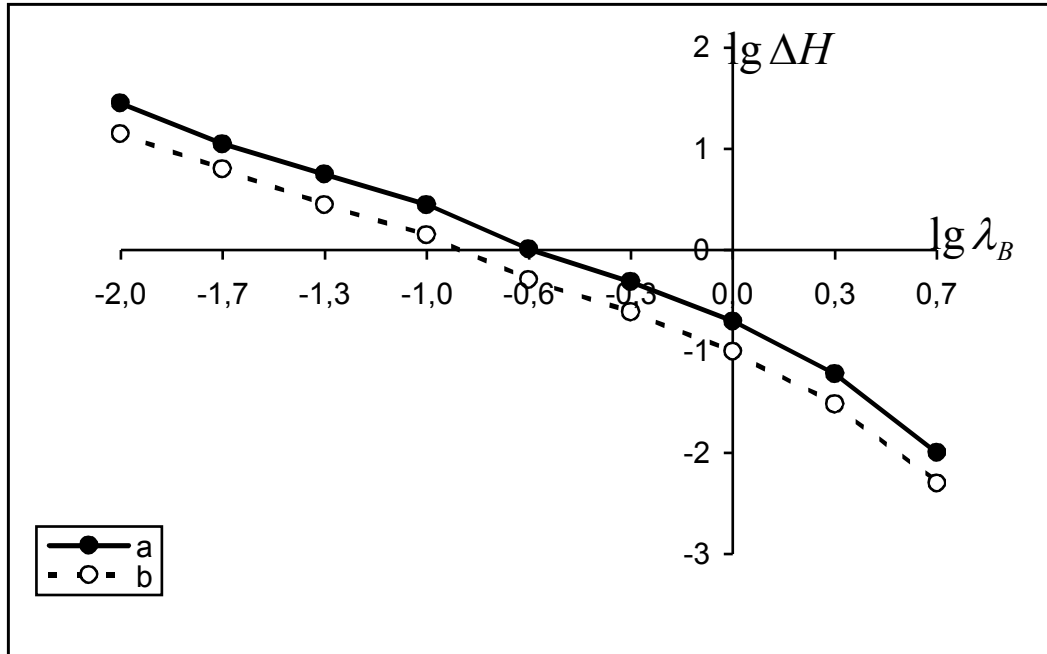


Рис. 17.7. Диагностические графики в безразмерных координатах $\lg \Delta H (x; t) \div \lg \lambda_b$ для полосовой инфильтрации в неограниченном пласте (a – центр, b – границы массива орошения)

При переменной во времени инфильтрации можно заменить реальный график инфильтрации ступенчатым и воспользоваться методом сложения течений.

Если подпор происходит за счет наложения инфильтрации и изменения уровня на границе, то для условий линейной задачи следует подсчитать величины подпора от действия каждого из факторов в отдельности, а затем сложить полученные значения со своими знаками.

Вопросы к лекции №17

1. Назовите особенности потока, которые позволяют свести пространственную фильтрацию к плоскопараллельной по координате x .
2. В чем особенность математической постановки задачи подпора для естественного потока с наличием инфильтрационного питания?
3. Запишите и объясните математические выражения для краевых условий следующих расчетных схем:
 - а) мгновенный подпор в полуограниченном пласте,
 - б) мгновенный подпор в ограниченном пласте.

4. Как определить время, начиная с которого в формировании подпора существенным является влияние удаленной границы?
5. Каким образом можно получить решение для подпора в ограниченном пласте с разнородными граничными условиями ($H = const$ и $Q = 0$)?
6. К какой величине стремится изменение фильтрационного расхода после мгновенного подпора в полуограниченном пласте при $t \rightarrow \infty$? Как влияет на этот процесс наличие естественного расхода потока, интенсивность инфильтрационного питания?
7. Какие природные условия определяют использование схемы полуограниченного пласта в течение всего периода прогноза? Как определить время стационарной фильтрации в этих условиях?
8. Какими природными факторами ускоряется наступление стационарного режима фильтрации при подпоре?
9. Как доказать теоретически, в каком случае радиус влияния от подпора больше, при мгновенном или постепенном повышении уровня в реке?
10. Какие практические задачи можно решать на основе уравнений плоскопараллельной стационарной и нестационарной одномерной фильтрации?
11. Для каких расчетных схем получены формулы (17.32) и (17.39)? В чем их различие?
12. Что такое диагностические графики и каково их значение в гидродинамических исследованиях фильтрации на массивах орошения?
13. Какими особенностями характеризуется режим грунтовых вод, формирующийся под влиянием полосовой инфильтрации?
14. Можно ли решения, полученные для исследования фильтрации на массивах орошения, применить для изучения условий подтопления городских и промышленных территорий?

Лекция № 18. Фильтрация воды из водохранилищ и каналов

18.1. Общие положения

Сходство фильтрации из водохранилища и канала определяется наличием прямолинейных контуров сооружения и значительной их длиной в плане при небольшой ширине по урезу, что обуславливает формирование плоскопараллельной фильтрации. Различия в фильтрации из водохранилищ и каналов определяются следующими факторами. Значительные фильтрационные потери из водохранилища приводят к быстрому прохождению стадии свободной и наступлению стадии подпертой фильтрации.

Изучаются развитие подпора грунтовых вод от инженерного сооружения (ИС) и величина фильтрационных потерь. Граничным условием для водохранилища является постоянный уровень воды, при этом зоной деформации потока в разрезе вблизи уреза крупного водохранилища часто пренебрегают. Для оросительных каналов и мелких водохранилищ характерны периодический режим работы (по сезонам года), глубокое начальное положение уровня грунтовых вод, существование всех стадий фильтрации и необходимость учета двухмерности потока в разрезе вблизи ИС.

Расчетные схемы, рассматриваемые для каналов и водохранилищ, могут быть так же использованы для определения утечек из накопителей промстоков, сбросных каналов. Для этих ИС важной проблемой является гидродинамическая оценка интенсивности проникновения в водоносные горизонты промстоков, проектирование и осуществление противофильтрационных мероприятий.

18.2. Особенности фильтрации воды из каналов

В зависимости от строения зоны аэрации (ЗА) и слоя воды h_0 на поверхности земли или канале инфильтрационный поток идет по схеме: свободное просачивание (рис. 18.1а) или нормальная инфильтрация (рис. 18.1б).

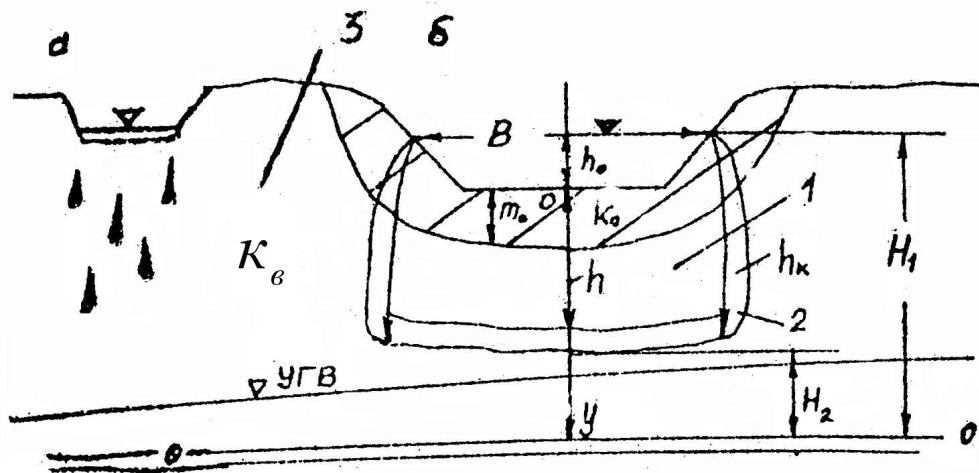


Рис. 18.1. Схема инфильтрационного потока из канала

(1 – зона полного насыщения; 2 – зона действия капиллярного всасывания h_k ; 3 – ненасыщенная зона с влажностью $\Theta < ПВ$)

Свободное просачивание наблюдается в подстилающем слое при двухслойном строении ЗА, если соблюдаются условие В.В. Ведерникова:

$$\frac{k_e}{k_0} > \frac{h_0 + m_0 + h_k}{m_0}, \quad (18.1)$$

где k_0 , k_e - коэффициенты фильтрации покровного слоя (экрана) и влагопереноса подстилающего слоя;

m_0 - мощность покровного слоя (экрана канала);

h_k - капиллярное давление, равное при влажности пород подстилающего слоя $\Theta = ММВ$ примерно половине высоты капиллярного поднятия H_k .

Коэффициент влагопереноса k_e (м/сут) зависит от начальной влажности породы и количества заземленного в порах воздуха (фазовая проницаемость). Приблизительно по С.Ф. Аверьянову [1] определяется как (лекция № 3)

$$k_e = k \left(\frac{\Theta - ММВ}{ПВ - ММВ} \right)^n, \quad (3.20)$$

где k - коэффициент фильтрации, м/сут, при $\Theta = ПВ$; Θ - влажность, при которой начинается процесс инфильтрации воды в “сухую” породу; $ММВ < \Theta \leq ПВ$ (n - показатель степени, обычно равен 3-5).

Нормальная инфильтрация возникает, если

$$\frac{k_e}{k_0} \leq \frac{h_0 + m_0 + h_k}{m_0} \quad (18.2)$$

В покровном слое и при однородном строении 3А под дном канала практически всегда наблюдается нормальная инфильтрация.

В гидравлической постановке скорость и градиент потока при нормальной инфильтрации определяются следующими выражениями:

$$I = \frac{h_0 + h_k + h}{h} \quad , \quad (18.3)$$

$$V = k_e \cdot I \quad , \quad (18.4)$$

где h - глубина, на которую профильтровалась вода с поверхности земли или от дна канала, численно равная длине инфильтрационного потока, $h = l$.

Со временем процесс инфильтрации становится квазистационарным, т.е. почти установившимся (если не наступает его смыкание с нижележащими грунтовыми водами), а градиент потока стремится к единице. Расход такого потока определяется по формуле С.Ф. Аверьянова [1] и называется расходом “на бесконечность”:

$$\bar{Q}_{cp} = k_e \left(1 + 0,5 \frac{H_k}{B} \right) (B + 2 h_0) \quad (18.5)$$

При фильтрации воды из каналов последовательно прослеживаются три стадии: свободная фильтрация, капиллярно-грунтовый поток и подпертая фильтрация (рис. 18.2)

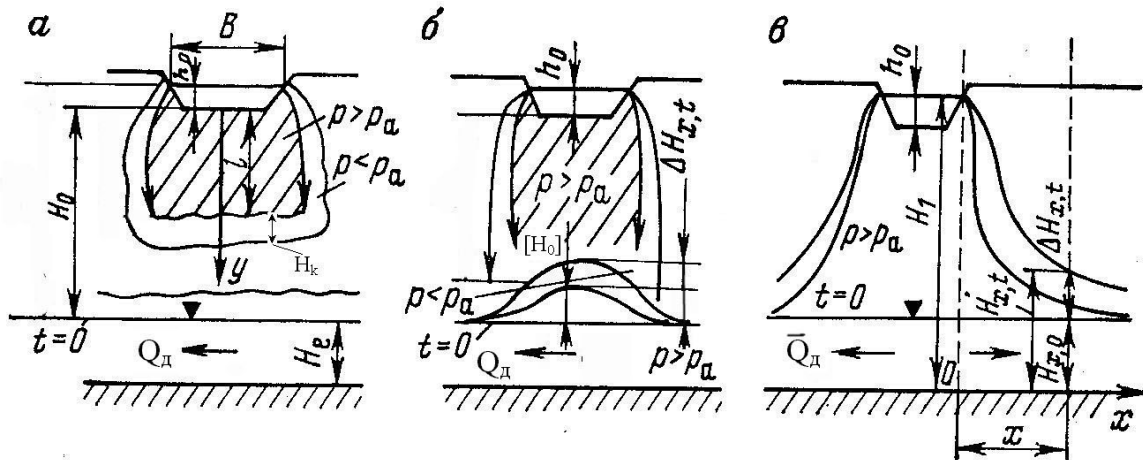


Рис. 18.2. Схема стадий фильтрации из канала при начальном глубоком положении уровня грунтовых вод (по С.Ф. Аверьянову)

(а – свободное впитывание; б – капиллярно-грунтовый поток; в – подпертый поток)

18.3. Свободная фильтрация

Стадия свободной фильтрации или впитывания при условии (18.2) характеризует процесс инфильтрации воды в породах зоны аэрации. Единичный (на 1 м длины канала) расход воды, идущий через дно и борта канала, определяется в гидравлической постановке формулой

$$Q_\phi = \bar{Q}_\phi \left(1 + \frac{b}{\sqrt{t}} \right) \quad , \quad (18.6)$$

где $\bar{Q}_\phi$ - фильтрационный расход на “бесконечность”, определяемый по уравнению (18.5); t - время от начала работы канала (принимается мгновенное его заполнение и постоянный уровень воды в нем h_0).

Параметр впитывания b (см^{1/2}), определяется как

$$b \approx 0,6 \sqrt{\frac{\Theta \cdot H_k + 1,4 h_0}{k_e}}, \quad (18.7)$$

где k_e - коэффициент влагопереноса, м/сут, вычисляемый по формуле (3.20).

Средний градиент оценивается по зависимости (18.3), скорость движения нисходящего потока по (18.4). Глубина h от дна канала, на которую опускается поток, определяется из неявного уравнения:

$$t = \frac{\mu}{k_e} \left[h - (h_0 + H_k) \ln \frac{h_0 + H_k + h}{h} \right], \quad (18.8)$$

где t - время, за которое формируется поток, глубиной h .

Продолжительность стадии впитывания рассчитывается как

$$t_1 \approx \frac{H_0 - H_k}{k_e} \mu, \quad (18.9)$$

где H_0 - мощность зоны аэрации под каналом, м; μ - недостаток насыщения, определяемый по зависимости

$$\mu = PB - MMB. \quad (18.10)$$

18.4. Капиллярно-грунтовый поток

Стадия капиллярно-грунтового потока протекает практически при отсутствии тесной гидравлической связи между грунтовыми водами и каналом. Величина изменения уровня грунтовых вод под каналом определяется зависимостью:

$$\Delta h = \frac{\bar{Q}_\phi}{\sqrt{\pi \cdot k \cdot h_{cp} \cdot \mu}} \sqrt{t} + [H_0], \quad (18.11)$$

где h_{cp} - средняя мощность грунтовых вод под каналом, м; t - время от начала формирования бугра грунтовых вод (от начала стадии капиллярно-грунтового потока), сут; $[H_0]$ - высота бугра грунтовых вод, мгновенно формирующегося в начале стадии капиллярно-грунтового потока (по С.Ф. Аверьянову критический подъем грунтовых вод),

$$[H_0] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{b \cdot \bar{Q}_\phi}{\sqrt{k \cdot h_{cp} \cdot \mu}}. \quad (18.12)$$

Расход воды на этой стадии приблизительно оценивается по формуле (18.6). Продолжительность стадии капиллярно-грунтового потока определяется выражением:

$$t_2 = \frac{\pi^2}{4} b^2 \left[\frac{H_0}{[H_0]} - 1 \right]^2. \quad (18.13)$$

Суммарные фильтрационные потери (объем воды) из канала в период первой и второй стадии фильтрации

$$V_{I+II} = \bar{Q}_\phi \left(1 + \frac{2b}{\sqrt{t_1 + t_2}} \right) (t_1 + t_2) \quad . \quad (18.14)$$

18.5. Подпертая фильтрация

Стадия подпертой фильтрации идет в условиях прямой гидравлической связи вод канала с грунтовыми. Уровень воды в канале является границей 1-го рода, создает максимальное значение напора и формирует подпор грунтовых вод. Положение уровня в любом сечении определяется зависимостями лекции 17, в которых координата x при необходимости заменяется $x + \Delta L_{но}$, где $\Delta L_{но}$ определяется по формуле (6.8). Начало координат принимается на урезе канала и приближенно считается, что здесь уровень мгновенно повышается на величину $\Delta h^0 = H_0 + h_0$.

Неустановившийся во времени односторонний поток воды из канала

$$Q_\partial = \frac{k \cdot h_{cp} \cdot \Delta h^0}{\sqrt{\pi \cdot a (t_2 + t_3)}} \quad , \quad (18.15)$$

где t_3 - текущее время от начала стадии подпертой фильтрации, Δh_0 - напор на урезе канала.

Установившийся односторонний расход воды из канала для ограниченного потока длиной L приближенно вычисляется по уравнению Дюпюи-Дахлера [1].

$$\bar{Q}_\partial = \frac{k \cdot h_{cp} \cdot \Delta h^0}{L + \Delta L_{но} + \frac{H_0 - B}{2}} \quad . \quad (18.16)$$

Для грунтовых потоков весьма большой длины со средним градиентом I_0

$$\bar{Q}_\partial = k \cdot I_0 (H_0 + h_{cp}) \quad . \quad (18.17)$$

Суммарные фильтрационные потери из канала определяются по формуле

$$V_{III} = 4k \cdot h_{cp} \frac{H_0 + h_0}{\sqrt{\pi a}} (\sqrt{t_2 + t_3} - \sqrt{t_2}) \quad . \quad (18.18)$$

Графики, характеризующие изменение во времени уровня грунтовых вод и инфильтрационного расхода под дном канала, показаны на рис. 18.3.

18.6. Критерии существования разных стадий фильтрации под каналом

При выявлении существования разных стадий фильтрации основными критериями являются соотношения глубин H_0 и $[H_0]$ и расходов $\bar{Q}_\phi$ и $\bar{Q}_\partial$. Оценка ведется по С.Ф. Аверьянову [1] согласно таблице 18.1.

18.7. Исследование фильтрации воды из каналов

Изучение фильтрации воды из канала включает:

1. Установление существования стадий фильтрации;

2. Определение величины подъема уровня грунтовых вод, фильтрационного расхода и суммарных потерь на фильтрацию под каналом и в зоне его влияния на разных стадиях;
3. Сопоставление фильтрационных потерь из канала с расходом воды в канале, оценка КПД работы канала и вывод о необходимости проведения противофильтрационных мероприятий, выявление закономерностей в изменении основных гидродинамических характеристик потока и вывод о возможности подтопления окружающей территории, необходимости дренажных мероприятий и сроках их выполнения.

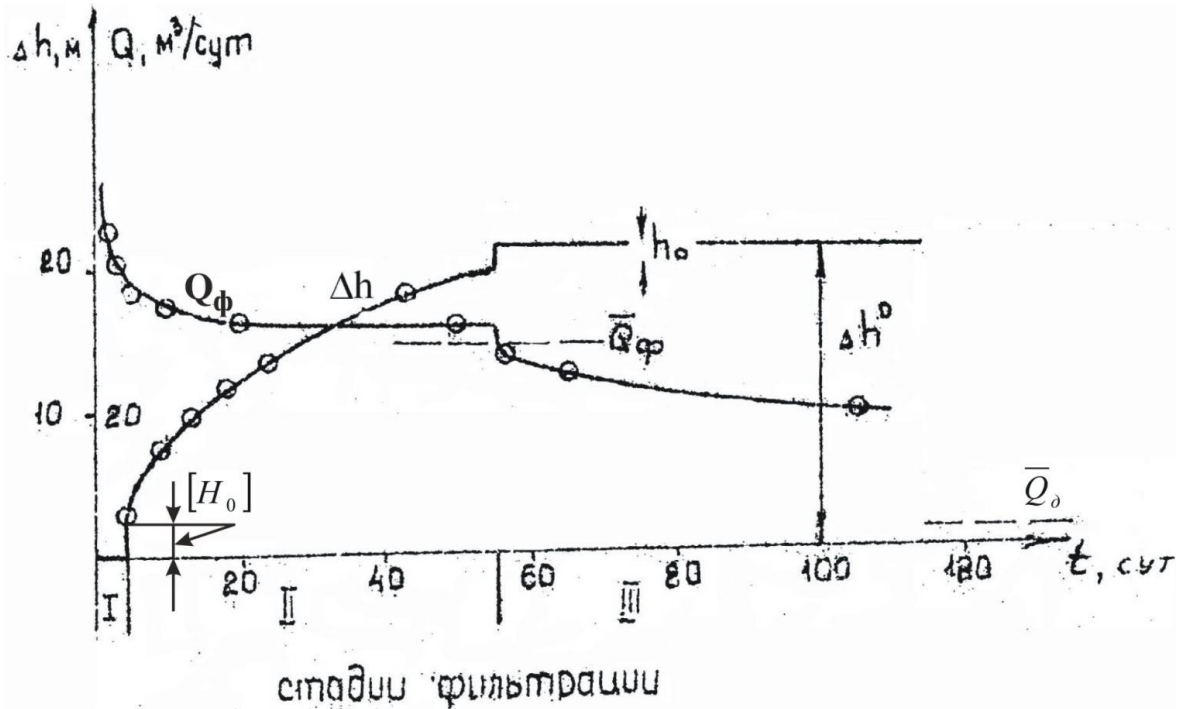


Рис. 18.3. Изменение уровня грунтовых вод и расхода воды на фильтрацию под каналом

Таблица 18.1

Критерии	$\bar{Q}_\phi > \bar{Q}_0$	$\bar{Q}_\phi < \bar{Q}_0$
$H_0 > [H_0]$	Последовательно существуют все три стадии	Существуют первая и вторая стадии, третья не наступает (18.19)
$H_0 \leq [H_0]$	Сразу наступает третья стадия фильтрации	(18.20)
$H_0 \gg [H_0]$	Существует только первая стадия фильтрации	(18.21)

18.8. Фильтрация воды из водохранилища

В зоне влияния водохранилища фильтрация является пространственной, но гидродинамические особенности позволяют свести ее к плановой или двухмерной в разрезе (профильной). На рис. 18.4а показаны основные зоны фильтрации в районе водохранилища, отличающиеся гидродинамическими особенностями потоков. По этому признаку выделяют три основные гидродинамические зоны. Первая характеризует фильтрацию под плотиной. В плане поток плоскопараллельный, что позволяет исследовать его в разрезе как двухмерный.

Фильтрация определяется величиной напора на плотине H_0 , определяемой как разность отметок верхнего H_1 и нижнего H_2 бьефов, строением естественного основания плотины и конфигурацией ее подземного контура. Обычно напор H_0 принимают постоянным, а фильтрацию считают стационарной. Основные типы расчетных схем представлены на рис. 18.4б, в. При однородном строении основания плотины исследования проводят на основе гидромеханических решений, дающих аналитические уравнения для линий токов и линий напоров, на основе которых строят гидродинамическую сетку движения. Эти решения даны в справочнике [9].

Гидравлическое решение получено Г.Н. Каменским для схемы, приведенной на рис. 18.4б. Представляя для однородного пласта средний путь фильтрации линий тока длиной $L + m$, фильтрационный расход на 1 м плотины по закону Дарси можно определить следующим образом

$$q = km \frac{H_0}{L + m}, \quad (18.22)$$

где $H_0/(L + m)$ - средний градиент фильтрации для всей области.

С гидродинамической точки зрения наиболее интересна схема двухслойного пласта (рис. 18.4в). Гидравлическое решение этой задачи было получено Г.Н. Каменским с использованием предпосылки о движении воды в хорошо проницаемом слое только в горизонтальном, а в слабопроницаемом только в вертикальном направлении при соблюдении критерия $k_{\max}/k_{\min} \geq 100$. Фильтрационный расход определяется по зависимости

$$q = \frac{H_0}{\frac{L}{T} + 2 \sqrt{\frac{m_0}{k_0 \cdot T}}}, \quad (18.23)$$

а напорный градиент в нижнем бьефе

$$I_0 = \frac{H_0}{2m_0 + L \sqrt{\frac{k_0 m_0}{T}}}, \quad (18.24)$$

где T - водопроводимость хорошо проницаемого пласта,

k_0 m_0 - коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемого пласта.

18.9. Обходная фильтрация

Во второй зоне (обходная фильтрация) движение идет в обход примыкания плотины. Размеры этой зоны значительно больше мощности потока, и фильтрация сводится к плановой. Она определяется величиной H_0 , естественным уклоном потока I_e , строением бортов долины и конфигурацией примыкания. При сравнении приведенной на рис. 18.4а схемы обходной фильтрации (II) со схемой фильтрации под плотиной (рис. 18.4б) обнаруживается принципиальное сходство в структурах планового (xOy) и профильного (xOz) потоков. Это означает, что гидромеханические решения, полученные для схемы одно-

родного основания плотины, можно использовать при исследовании обходной фильтрации, принимая форму и длину контура примыкания соответственно за форму и длину основания плотины.

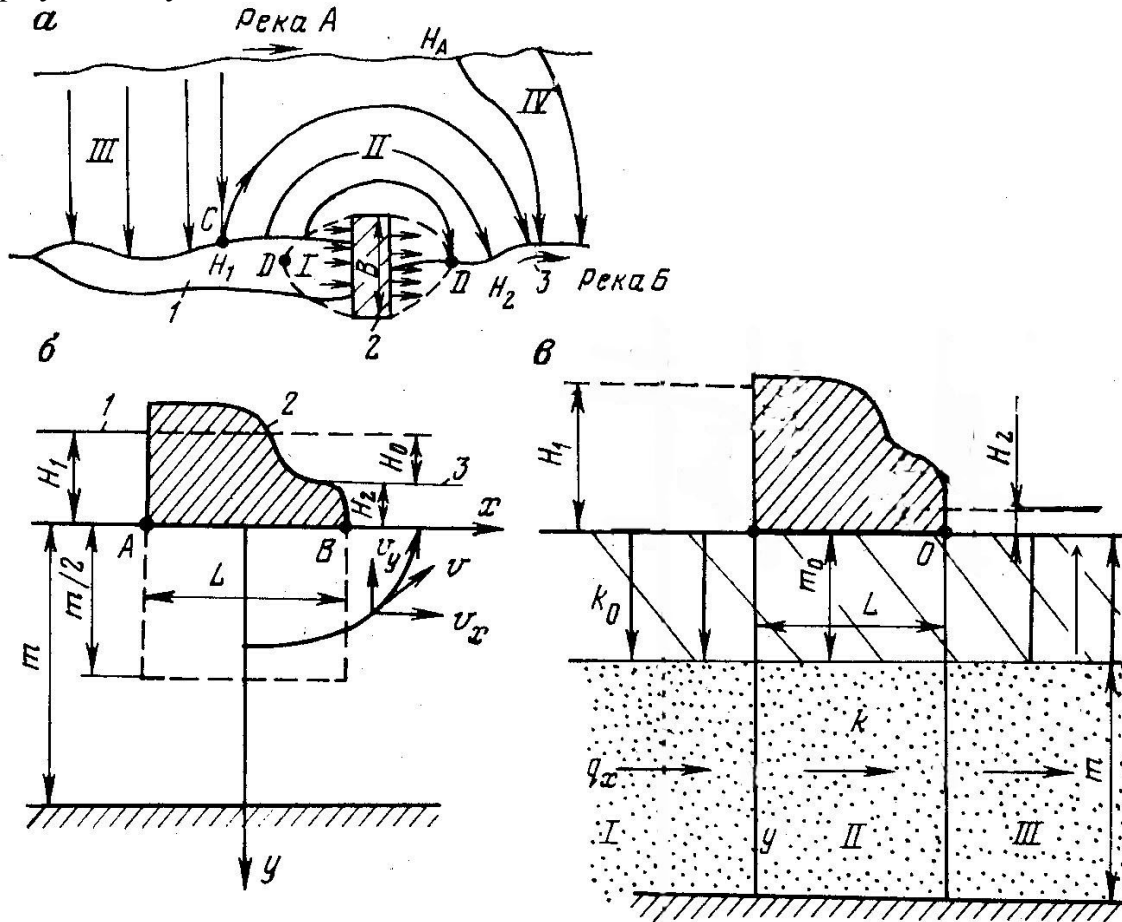


Рис. 18.4. Схема фильтрации в зоне плотины в плане (а)

и разрезе на однородном (б) и двухслойном (в) основании

1 – водохранилище (верхний бьеф); 2 – плотина; 3 – нижний бьеф. Зоны фильтрации (а): I – под плотинной; II – в обход плечевого примыкания; III – из водохранилища; IV – деформируемого потока в нижнем бьефе. C, D – отдельные точки области фильтрации. H_1 , H_2 , H_A – соответственно отметки уровня воды в верхнем и нижнем бьефах и в долине. I – III (в) – фрагменты

Для простых условий (однородный, напорный пласт, прямолинейные урезы, стационарный режим фильтрации) можно использовать гидравлический метод расчета. Схематизированный поток характеризуется радиальной фильтрацией (рис. 18.5).

При отсутствии естественного потока ($I_e = 0$) линии равных напоров представляют собой радиусы, а линии токов – длины полуокружностей длиной $l = \pi \cdot r$. Напор в любой точке определяется как

$$H_A^1 = H_0 \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right), \quad (18.25)$$

а величина напорного градиента обходной фильтрации

Расход потока обходной фильтрации определяется из уравнения:

$$Q = \int_{r_0}^{B_0} \frac{TH_0}{\pi r} dr = \frac{TH_0}{\pi} \ln \frac{B_0}{r_0} \quad (18.32)$$

Для сложных контуров урезом верхнего и нижнего бьефа, неоднородного строения пласта задачу решают графическим построением гидродинамической сетки.

18.10. Третья зона характеризует фильтрацию из водохранилища в борта долины. Это плоскопараллельная нестационарная фильтрация, связанная с подпором уровней, изученная ранее в лекции № 17. Исследования включают определение величины подъема уровня воды во времени, достижения ими практически стационарного состояния, а также оценку зоны влияния подпора, величину фильтрационных потерь из водохранилища, их изменение во времени. Как видно из рис. 18.6 возможны три варианта развития подпора.

Первый возникает при $h_0 < h_L$, и $y_0 = (h_0 + \Delta H^0) < h_L$ и характеризуется двумя последовательными стадиями формирования подпора, различающимися генетическими составляющими водного баланса потока (рис. 18.6б). В начальный период при $t < t_0$ подпор развивается под влиянием q_ϕ и q_e , затем при $t = t_0$, как видно из формулы (17.13), $|q_e| = |q_\phi|$ и при $t > t_0$ наступает вторая стадия, в течение которой главным фактором является q_e . При условии медленно-го постоянного повышения уровня воды в водохранилище по зависимости $\Delta H = \mathcal{V} \cdot t$ и значительных естественных уклонах потока I_e начальная стадия может и не наступить и в течение всего периода $|q_e| > |q_\phi|$. Это возможно при

$$\text{условии } I_e \geq \mathcal{V} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{a}}, \quad (18.33)$$

$$\text{где } \mathcal{V} = \frac{\Delta H^{\max}}{t_p}, \quad (18.34)$$

что следует из сопоставления формул (17.12) и (17.22).

Условие (18.33) особенно важно при гидродинамических расчетах потерь из хранилищ жидких промстоков, сооружаемых в местах понижения рельефа (долинах), ибо позволяет минимизировать утечки этих стоков в борта долины.

Второй вариант наблюдается при $h_0 < h_L$, но $y_0 = (h_0 + \Delta H^0) > h_L$ (рис. 18.6г) и тоже характеризуется наличием двух стадий формирования подпора, причем начальная аналогична первому варианту, но время ее существования иное и определяется из выражения (17.7), как момент, в который влияние нестационарного подпора достигло второй границы $R_{\text{вл}} = L_{\text{зп}}$. С этого времени подпор развивается только под влиянием потерь из водохранилища q_ϕ .

Третий вариант отвечает соотношению $h_0 > h_L$ и имеет одну стадию формирования подпора под влиянием q_ϕ (рис. 18.6в).

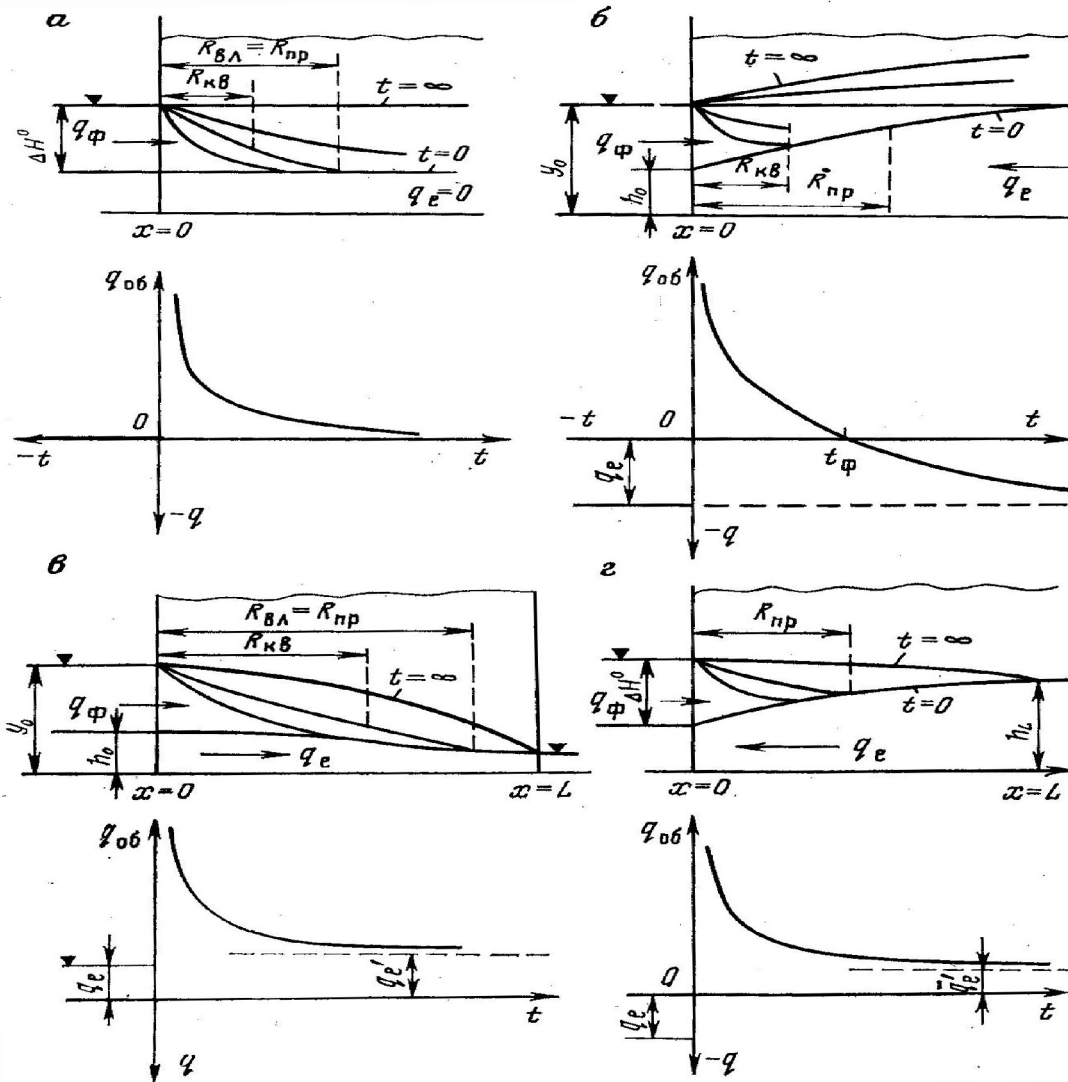


Рис. 18.6. Схемы развития кривых подпора и расхода в различных гидрогеологических условиях

Наступление стационарного подпора зависит от времени стабилизации $\tau = L^2/a$ и определяется зависимостями (17.4), (17.19) или (17.24). При изучении тационарного подпора используют два подхода [5]. Первый предполагает получение расчетных значений уровней с инженерным запасом. В этом случае рассматривается полубесконечный поток, в котором область подпора x существенно меньше области развития пласта L ($x \leq 0,05L$). В результате можно пренебречь изменением питания потока, считая, что его расходы до подпора и после него равны. Такая постановка задачи приводит к условию, что подпор формируется независимо от строения пласта и наличия или отсутствия естественного инфильтрационного питания, которое учитывается в начальном распределении уровней. Подпор в любом сечении $\Delta H(x, \infty)$ численно равен подпору на границе ΔH_0 и кривая уровней перемещается параллельно самой себе (рис. 18.7).

Второй подход учитывает изменение условий питания, так как область подпора x соизмерима с длиной потока L , и следовательно, расходы потока до

и после подпора различны. Такая постановка задачи справедлива для ограниченного потока.

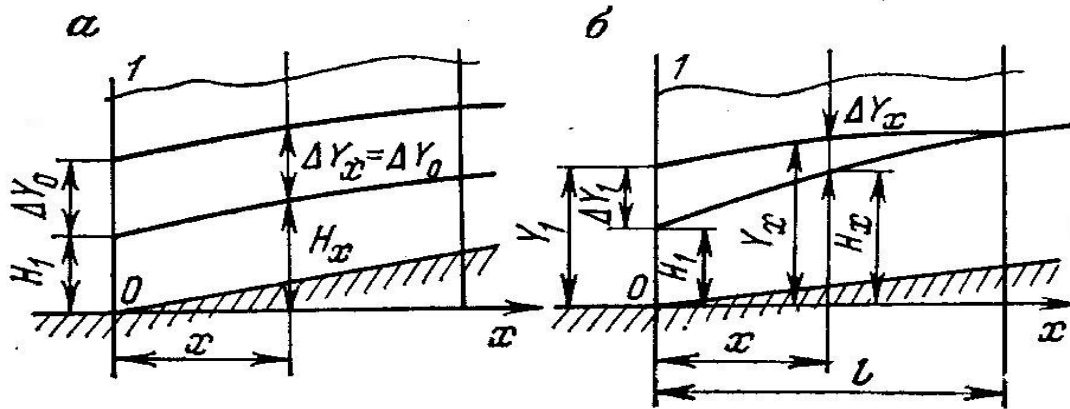


Рис. 18.7. Расчетные схемы оценки стационарного подпора в полубесконечном потоке (по И.К. Гавич)

(а – при $x \ll L$; б – при $x \approx L$)

Вопросы к лекции №18

1. При каких соотношениях H_0 и $[H_0]$, $\bar{Q}_\phi$ и $\bar{Q}_0$ при сооружении канала сразу наступает стадия подпертой фильтрации? Практически будет наблюдаться только стадия свободной фильтрации?
2. Из анализа влажности в формуле (3.20) покажите, в каких пределах может измениться коэффициент влагопереноса κ_e .
3. На каких стадиях фильтрации будут максимальный и минимальный расходы воды из канала?
4. По трассе канала увеличивается мощность зоны аэрации. На основе теоретических зависимостей покажите, как будут меняться $\bar{Q}_\phi$, t_1 , t_2 .
5. Объясните, как и почему изменяется фильтрационный расход из канала во времени.
6. Чему равен градиент потока в формуле (18.5)?
7. Если средняя скорость фильтрации выражается как $\mathcal{V}_{cp} = H_0/\pi r$, то какую форму имеет линия тока и поток в целом (H_0 - постоянная разность напоров на концах линий токов)?
8. В чем заключается различие и сходство фильтрации воды из водохранилищ и каналов?
9. Какие два режима движения воды характерны для стадии свободной фильтрации, чем они различаются и какими критериями можно установить их наличие?
10. Каковы особенности стадии капиллярно-грунтового потока? По каким принципам построены математические зависимости для оценки подпора и фильтрации на этой стадии?
11. Подпертая фильтрация из водохранилища и канала аппроксимирована одной расчетной схемой, определены положение депрессионной кривой и

- величина фильтрационного расхода на урезе при $x = 0$ для стационарных и нестационарных условий. Будут ли одинаковы погрешности расчета?
12. Охарактеризуйте все возможные схемы развития подпора и расхода в разных гидрогеологических условиях. При каких условиях подпора $|q_e| > |q_\phi|$ всегда?
 13. В чем сходство и различие математической постановки задач фильтрации под плотиной и в обход ее примыканий?
 14. Как изменится ширина зоны обходной фильтрации и фильтрационный расход в расчетных схемах: $I_e = 0$, $I_e > 0$ и $I_e \gg 0$?
 15. Охарактеризуйте основные зоны фильтрации в районе водохранилищ.

Лекция № 19. Гидродинамические основы расчета дренажных мероприятий

19.1. Дренажные мероприятия направлены на предотвращение и ликвидацию избыточного увлажнения земель или подтопления территорий в целях их рационального использования. Осуществляются как в зонах избыточного увлажнения при преобладании осадков над испарением, так и в зонах недостаточного увлажнения – под влиянием орошения, фильтрационных потерь из каналов, водохранилищ, водопроводной и канализационной сетей.

Подтопление территории – это процесс, при котором уровень грунтовых вод (УГВ) вследствие избыточного увлажнения поднимается к поверхности земли, затопливает фундаменты и подвалы инженерных сооружений.

19.2. Для выбора эффективных мероприятий по борьбе с подтоплением необходимо иметь четкое представление об основных причинах (факторах), вызывающих этот процесс.

Для количественной оценки этих факторов должно быть составлено уравнение водного баланса защищаемой территории (рис. 19.1):

$$\mu \frac{\Delta H_{S,S+2}}{\Delta t} = \frac{q_{np} - q_{om}}{\Delta x} + W_a - W_{исп} \pm W_{гл} \quad (19.1)$$

Подтопление происходит при значительных (десятки см в год) величинах $\Delta H / \Delta t$. Исходя из этого уравнения можно выделить основные факторы избыточного увлажнения.

1. Преобладание осадков ($W_{инф}$) над испарением ($W_{исп}$) и оттоком q_{om} . Сюда относятся утечки на промплощадках и населенных пунктах, инфильтрация на массивах орошения.
2. Затрудненные условия оттока (q_{om}), плохая естественная дренированность территории, отсутствие оврагов, малые уклоны рельефа, отсутствие хорошо проницаемых грунтов (песков) в разрезе.
3. Преобладание притока (q_{np}) над оттоком и испарением, например, за счет фильтрационных потерь из каналов и водохранилищ выше защищаемой территории.

19.3. Важным показателем эффективности осушения является обеспечение в пределах всей защищаемой территории определенной глубины до УГВ,

строительства водохранилища или паводка в реке, или увеличение оттока ($q_{от}$) при подтоплении поймы реки и склонов ее долины.

- Контурный дренаж – располагается по контуру защищаемого объекта и используется при сравнительно небольших размерах защищаемого объекта (до нескольких км²).
- Систематический дренаж – дрены располагаются равномерно в пределах всей защищаемой территории. Используется при преобладании осадков ($W_{инф}$) над испарением ($W_{исп}$) и значительных размерах защищаемой территории (десятки км²).

19.3.2. По конструктивному типу дренажи могут быть горизонтальными или вертикальными. Горизонтальный дренаж выполняется в виде открытой траншеи глубиной до 3,5 м или закрытой перфорированной трубы, уложенной в траншею и засыпанной сверху проницаемым грунтом (песчано-гравийная смесь), при больших глубинах заложения. Вертикальный дренаж представляет собой систему взаимодействующих скважин, объединенных сбросным коллектором с принудительной откачкой воды из скважин. Выбор того или иного типа дренажа определяется технико-экономическим расчетом.

19.4. При гидродинамическом расчете дренажа важно определить:

1. Расход воды, который необходимо отвести за пределы защищаемой территории. Эта величина обычно определяется из анализа уравнения общего баланса при обеспечении равенства его левой части нулю и реализации условия положения УГВ не выше нормы осушения h_{oc} в пределах всей защищаемой территории.
2. Размещение дренажных сооружений, их протяженность, количество и расстояния между дренами или скважинами, при которых реализуется условие нормальной работы дренажа (понижение уровня в скважинах не больше допустимых ($S_{дон}$)), глубина горизонтальных дрен обеспечивает отвод всей воды с защищаемой территории.
3. Выбор сечений горизонтальных дрен, диаметров и длины фильтров скважин, которые обеспечат отвод всей избыточной воды за пределы защищаемой территории.

19.5. Рассмотрим последовательно решение выше перечисленных задач.

19.5.1. В отличие от расчетов водозаборов, где инженерный запас связан в ряде случаев с исключением при схематизации влияния границ питания и перетекания из соседних пластов, что обеспечивает преуменьшение расчетных водопритоков к скважинам, при обосновании дренажа запас в расчетах при недостаточной изученности реализуется, напротив, за счет принятия в расчетных схемах более благоприятных условий водопритока, чем это может быть имеет место в действительности.

Учитывая, что основной задачей дренажа является отведение избыточного количества воды, расчеты дренажей выполняются, как правило, для стационарного режима фильтрации. При этом априори предполагается, что весь расход дренажа обеспечивается избыточным водопритоком на защищаемую тер-

риторию, а период нестационарного режима, связанный с началом работы дренажа, является не очень продолжительным.

Определение количества воды Q_{op} , которое необходимо отвести с защищаемой территории для поддержания h_{oc} , выполняется с использованием уравнений Дюпюи для плоско-параллельной или радиальной структуры потока (лекция № 19 и 16) в зависимости от конкретных условий. Широко применяются методы обобщенных систем скважин и “большого колодца”. При этом схема плоско-параллельной фильтрации используется, как правило, при расчетах защитного дренажа, а радиальной фильтрации – контурного водопонизительного дренажа. Расчеты выполняются для заданного размещения дренажа относительно защищаемой территории. Результатом этих расчетов является определе-

ние линейного дренажа модуля $q_{op} = \frac{Q_{op}}{l_{op}}$ (19.2) и длины контура дренажа

- l_{op} . Расчеты выполняются для совершенных дрен (траншей) полностью вскрывающих водоносный пласт. Величина Q_{op} зависит от заданного положения контура дренажа. При этом, как правило, Q_{op} уменьшается при удалении дренажа от контуров питания ($H = const$) и приближении к защищаемому объекту. Обычно выполняется несколько вариантов расчетов, различающихся положением контура дренажа. Оптимальным считается условие $Q_{op} \rightarrow \min$. В качестве основного ограничения при расчетах выступает обеспечение h_{oc} в самых неблагоприятных точках защищаемой территории. В процессе расчетов должно быть получено прогнозное положение уровня на контуре совершенного дренажа h_{op} . Оно определяется путем трансформации уравнения Дюпюи относительно уровня в заданном сечении.

Для плоско-параллельной фильтрации (рис. 19.2)

$$h_{op}^2 = h_1^2 - \frac{2 \cdot Q_{op} \cdot L_{1-op}}{k \cdot l_{op}}, \quad (19.3)$$

для радиальной фильтрации (рис. 19.3)

$$h_{op}^2 = h_1^2 - \frac{Q_{op}}{\pi \cdot k} \ln \frac{R_k}{r_{op}}, \quad (19.4)$$

В этих формулах

h_1, h_2 - мощность водоносного пласта в заданном сечении (граница постоянного напора) или под защищаемым объектом,

Q - полный расход воды между дренажами и этим сечением,

L_{1-op}, R_k - расстояние линии дренажа до этого сечения,

r_{op} - расстояние контурного дренажа до центра защищаемой территории (центра системы).

19.5.2. Определение конструктивного типа дренажа и размещение дренажных сооружений вдоль выбранного контура зависит от конкретных условий. Общие рекомендации: при хорошей проницаемости пород, залегающих с

поверхности земли, более эффективным оказывается горизонтальный дренаж, при залегании с поверхности слоя глин или тяжелых суглинков, подстилаемых хорошо проницаемыми породами, более эффективным может оказаться вертикальный дренаж.

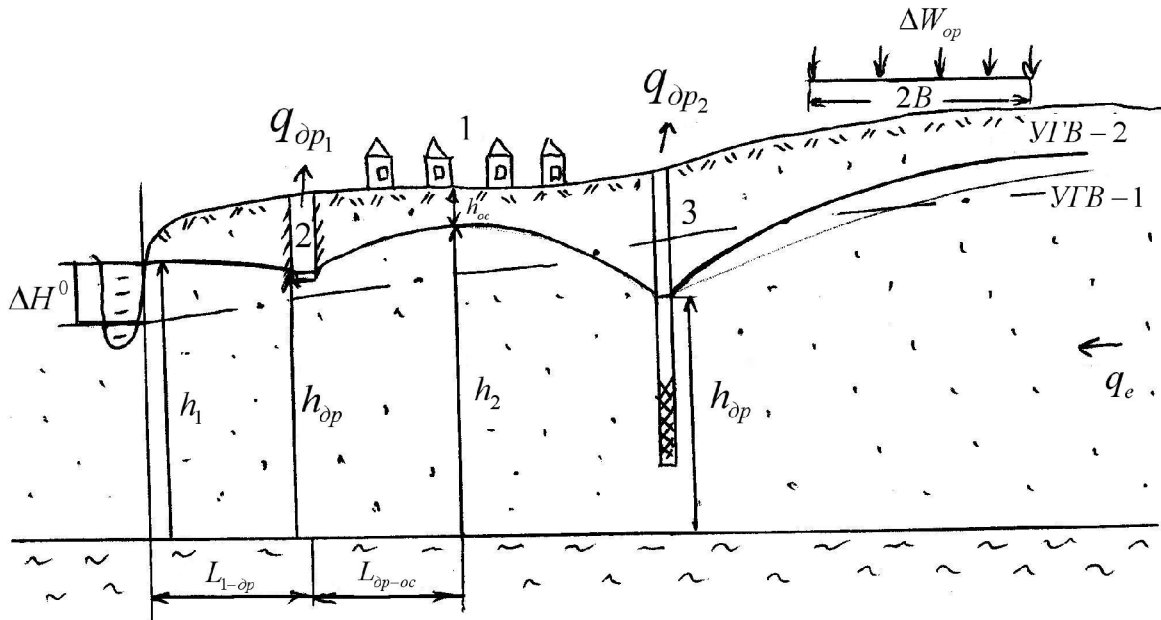


Рис. 19.2. Расчетная схема защитного дренажа

(1 – защищаемая территория; 2 – береговой горизонтальный дренаж; 3 – головной вертикальный дренаж; УГВ1 – естественный уровень подземных вод; УГВ2 – тоже под влиянием дренажа)

19.5.3. При расчетах горизонтального дренажа одним из основных показателей является глубина заложения дрен. Она зависит от мощности проницаемой толщи - h , прогнозного положения уровня на контуре совершенного дренажа h_{dp} и дополнительных потерь напора Δh_{dp} за счет несовершенства дрены, скачка уровня на стенке дрены Δh_0 (рис. 19.4)

$$z_{dp} = h - (h_{dp} - \Delta h_{dp} - \Delta h_0) \quad (19.5)$$

Дополнительные потери напора определяются по формуле

$$\Delta h_{dp} = \frac{q_{dp}}{k \cdot h_{dp}} \Delta L_{но} \quad (19.6)$$

где $\Delta L_{но}$ - показатель несовершенства дрены, определяется по формуле

$$\Delta L_{но} = 0,73 h_0 \lg \frac{2m_0}{nd_0} \quad (19.7)$$

Здесь m_0 - мощность потока под дренажем,

d_0 - диаметр смоченного периметра дрены.

В качестве плоскости сравнения здесь использована подошва водоносного пласта.

19.5.4. При расчетах вертикального контурного дренажа основными определяемыми показателями являются расстояние между скважинами 2σ и расход каждой скважины Q_0 , причем

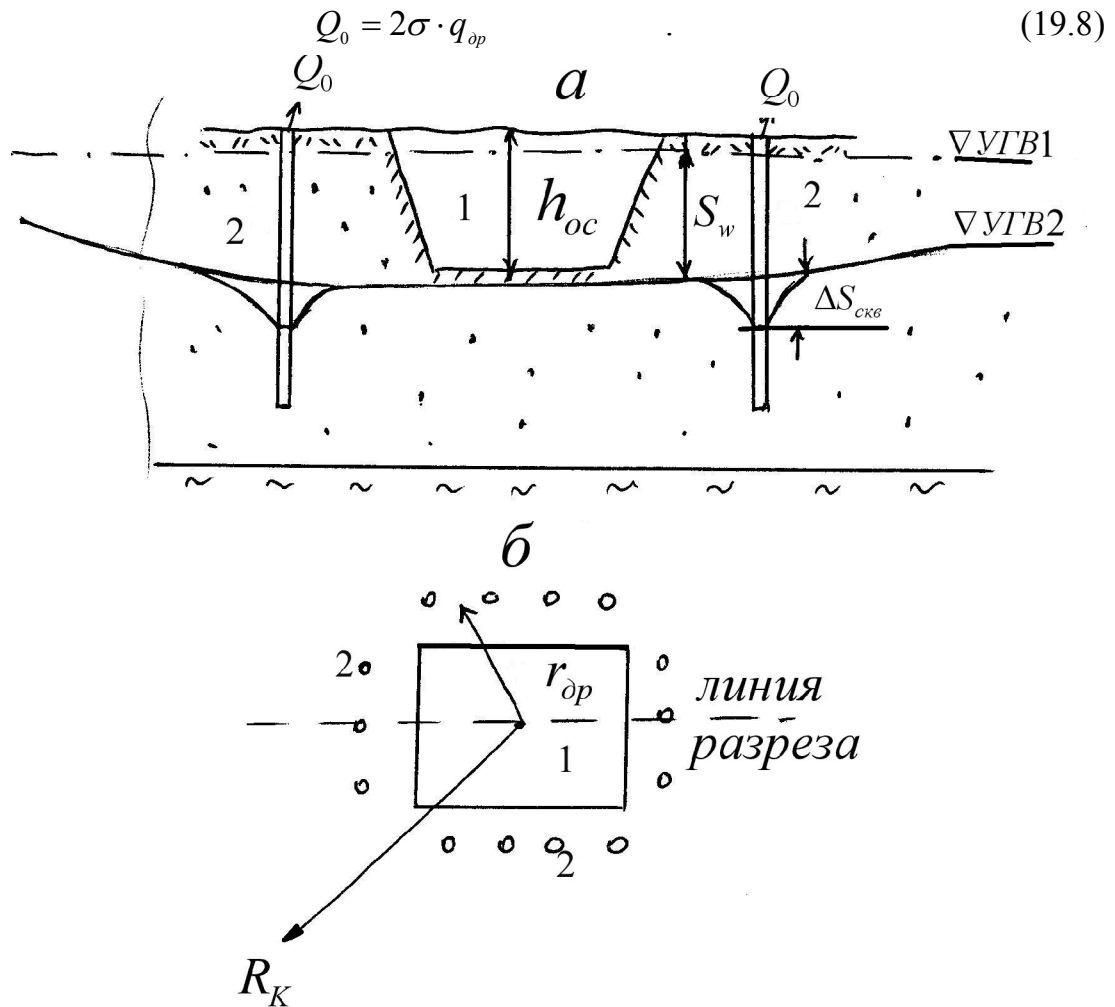


Рис. 19.3. Контурный вертикальный дренаж (а – разрез; б – план)

(1 – котлован; 2 – дренажные скважины; УГВ1 – естественный уровень подземных вод; УГВ2 – тоже под влиянием дренажа)

Расчет выполняется подбором для дренажной скважины, расположенной в наиболее неблагоприятных условиях с использованием формул (19.8) и (19.9):

$$(2h_{op} - S_0)S_0 = \frac{Q_0}{\pi \cdot k} \left(\ln \frac{\sigma}{\pi \cdot r_0} + \xi_{nc} \right) \quad (19.9)$$

где S_0 - допустимое понижение уровня в дренажной скважине. Обычно $S_0 = 0,5h_{op}$.

19.6. Преобладание осадков над испарением и оттоком на значительной по площади территории определяет целесообразность использования систематического дренажа. Наиболее характерными в этом отношении являются водораздельные плато с близким к поверхности земли залеганием уровня грунтовых вод. Определяющим условием обеспечения мелиоративного эффекта здесь является полное отведение избытка воды интенсивностью W с защищаемой территории. Основным результатом расчета сводится к определению расстояния между дренами и величины расхода, поступающего в дрена при заданном типе и конструкции дренажа.

для грунтовых вод
$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k} \left(\ln \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi} \cdot r_0} + 0,5\xi_{nc} \right)} \quad (19.13)$$

или для напорных вод
$$S = \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot m} \left(\ln \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi} \cdot r_0} + \xi_{nc} \right) \quad (19.14)$$

не превышало допустимого понижения, вычисляемого обычно как

$$S_{дон} \leq 0,5m + H_{изб} \text{ или } S_{дон} \leq 0,5h_e \quad (19.15)$$

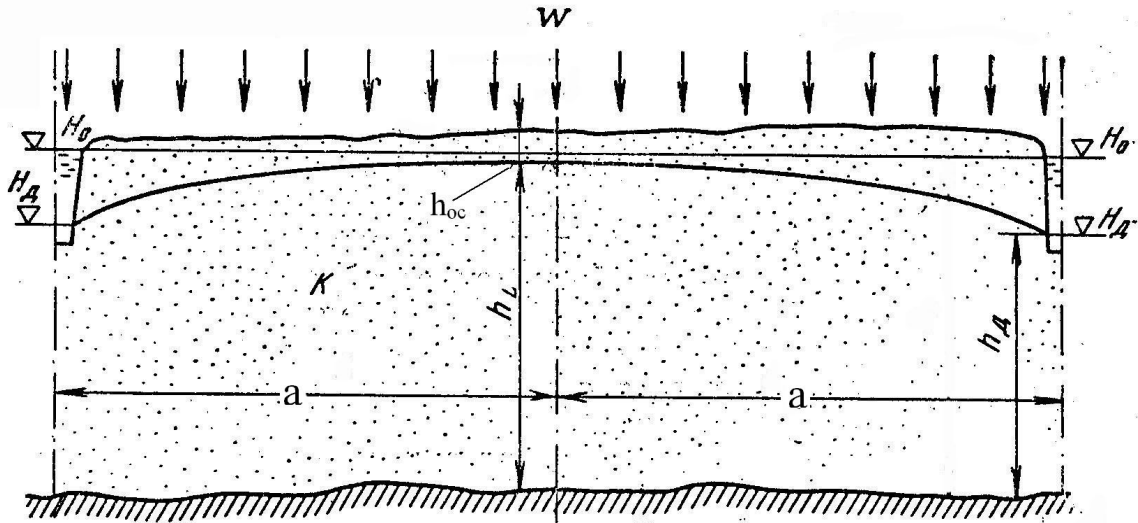


Рис. 19.5. Расчетная схема систематического дренажа

19.7. Особый случай использования дренажа – водопонижение при сооружении строительных котлованов или разработки месторождений полезных ископаемых (МПИ). В этих случаях часто используется контурный тип дренажа. Гидродинамический расчет такого дренажа выполняется аналогично расчетам взаимодействующих скважин. Отличие заключается в требовании обеспечения нормы осушения в пределах защищаемой территории котлована или МПИ. Оптимальная система дренажа обеспечивает это требование при минимальном количестве скважин и минимально возможном отборе воды из пласта этими скважинами.

19.8. При расчетах дренажа эффективно использовать метод фильтрационных сопротивлений (см. лекцию № 6). Под фильтрационным сопротивлением (аналогично электрическому сопротивлению) понимают отношение потерь напора ΔH к расходу потока Q , то есть:

$$\Phi = \frac{\Delta H}{Q} \quad [\text{сут}/\text{м}^2] \quad (19.16)$$

Фильтрационное сопротивление представляет собой удельные потери напора, отнесенные к 1 м³/сут расхода потока, так что общие потери могут быть определены как

$$\Delta H = Q \cdot \Phi \quad (19.17)$$

Во всяком сложном по структуре фильтрационном потоке можно выделить составляющие его участки с более или менее однородной структурой движения воды. Каждый из этих участков характеризуется своим фильтрационным

сопротивлением, не зависящим от структуры потока на сопредельных участках. Обычно выделяются следующие характерные участки и соответствующие им фильтрационные сопротивления:

1. Участок потока примыкающий к областям питания или разгрузки (границам пласта) и расположенный на некотором расстоянии от скважин или дрен. Фильтрационные потери напора здесь определяются только суммарным расходом потока, забираемого этими скважинами или дренами, независимо от их взаимного расположения и от того, являются они совершенными или несовершенными. То есть, при расчете потерь напора на удаленном от дренажа участке контурный дренаж может быть заменен совершенной траншеей вне зависимости от его реальной конструкции и расположения.

Фильтрационное сопротивление для этого участка определяется для условий плоско-параллельной фильтрации

$$\Phi_w = \frac{L}{k \cdot m \cdot B} \quad , \quad (19.18)$$

где L - расстояние до контура питания,

B - ширина потока к дрене.

Для условий плано-радиальной фильтрации

$$\Phi_w = \frac{\ln R_k / R_0}{2\pi \cdot k \cdot m} \quad , \quad (19.19)$$

где R_k - радиус влияния или радиус контура питания,

R_0 - радиус контурной системы скважин.

2. На участке вблизи скважин структура потока принципиально меняется, он становится радиальным (рис. 19.6). Фильтрационное сопротивление здесь зависит от взаимного расположения скважин, расстояния между ними и определяется зависимостью

$$\Phi_{скв} = \frac{\ln \frac{\sigma}{\pi \cdot r_0}}{2\pi \cdot k \cdot m} \quad , \quad (19.20)$$

где σ - полурасстояние между скважинами,

r_0 - радиус фильтра.

3. Непосредственно вблизи фильтра скважины или вблизи дрен определяющим является их конфигурация, степень совершенства по вскрытию водоносного пласта. Здесь величина фильтрационного сопротивления $\Phi_{нс}$ зависит от диаметра скважины или дрен, расположения водоприемной части относительно кровли и подошвы пласта, конструкции фильтровой части. Фильтрационное сопротивление, связанное с несовершенством вскрытия пласта скважинами $\Phi_{нс}$, рассмотрено в лекции № 12.

Общее фильтрационное сопротивление определяется как сумма сопротивлений на каждом из участков.

Использование метода фильтрационных сопротивлений правомерно при расстоянии между скважинами или дренами, не превышающем радиуса влия-

ния или радиуса контура питания потока, т.е. реально не превышающем расстояние до границ пласта. При этом число взаимодействующих скважин должно быть не менее трех. В пределах контурной системы дренажа должны наступить условия стационарной или квазистационарной фильтрации.

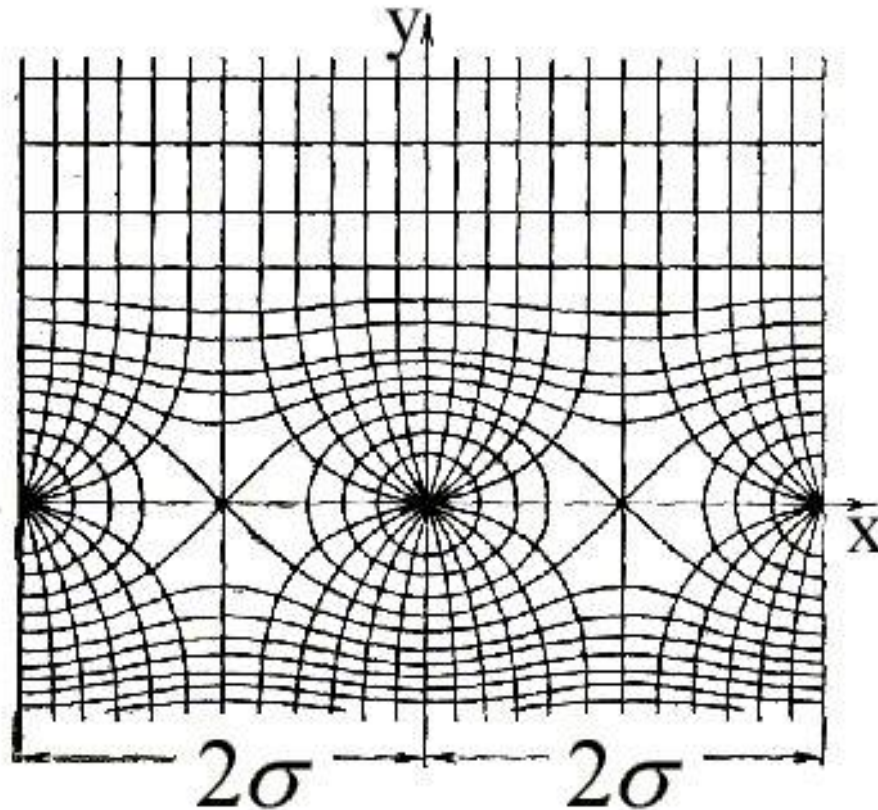


Рис. 19.6. Фильтрационное поле вблизи ряда скважин

Вопросы к лекции 19

1. Охарактеризуйте основные факторы подтопления территорий.
2. Какая гидродинамическая задача решается дренажными сооружениями?
3. Какие основные типы дренажей по расположению относительно защищаемой территории вы знаете?
4. В чем основное отличие гидродинамических расчетов водозаборов и дренажей?
5. Почему расчеты дренажей выполняются как правило для стационарного режима фильтрации?
6. Какой показатель обычно минимизируется и какой выступает в качестве ограничения при гидродинамическом расчете дренажа?
7. Что такое метод фильтрационных сопротивлений? Как формулируются его основные принципы?
8. Реализуйте принцип построения расчетных зависимостей методом фильтрационных сопротивлений для определения понижения в скважине для системы взаимодействующих несовершенных сква-

жин, расположенных в полуограниченном пласте с граничными условиями первого рода.

9. Какой физический смысл имеет фильтрационное сопротивление? Запишите примеры фильтрационных сопротивлений при расчете понижения в одной несовершенной скважине у несовершенной реки. Зависит ли величина фильтрационного сопротивления напорного потока от понижения уровня в пласте?
10. Каким образом видоизменяются уравнения для оценки стационарного и нестационарного подпоров, применительно к изучению фильтрации в зоне действия горизонтальных дрен?
11. В каких гидрогеологических условиях целесообразно использование вертикального систематического дренажа? Каким образом видоизменяются уравнения для гидродинамического расчета этого типа дренажа?

Лекция № 20. Основы изучения гидродинамического режима и баланса подземных вод

20.1. Учение о режиме и балансе является самостоятельным направлением в гидрогеологии. Результаты исследований режима и баланса используются для обоснования решаемых задач при оценке запасов подземных вод, обосновании инженерных мелиораций, прогнозов обводненности месторождений полезных ископаемых, подпора уровня в районе гидротехнических сооружений.

20.2. Режим – это текущая последовательность изменения показателей процесса фильтрации (уровня, расхода) во времени. Баланс – это количественная оценка всех приходящих на исследуемый расчетный участок и уходящих с него расходов воды. Эти расходы воды называются режимобразующими факторами. Уравнение режима и баланса имеет вид (рис. 19.1)

$$\mu \frac{\Delta H'}{\Delta t} = \frac{q_{np} - q_{om}}{\Delta x_{cp}} + W_a - W_{исп} \pm W_{гл} \quad , \quad (20.1)$$

где $\Delta H' = H_{2,s+2} - H_{2,s}$ - изменение уровня подземных вод за период Δt , м;

q_{np} , q_{om} - приток и отток латерального потока на расчетном участке длиной Δx_{cp} , м²/сут;

W_a , $W_{исп}$, $W_{гл}$ - инфильтрационное питание, испарение, глубинное перетекание в пределах расчетного участка, м/сут.

Левая часть уравнения (20.1) представляет собой показатель гидродинамического режима, правая его часть состоит из режимобразующих факторов, определяющих изменение режима. В том случае, если правая часть равна нулю, за расчетный период Δt изменения уровня нет ($\Delta H' = 0$) - стационарный режим, если правая часть больше нуля, то происходит подъем уровня, если меньше нуля, то снижение уровня. Г.Н. Каменский впервые связал типы режима подземных вод с количественной оценкой режимобразующих факторов.

20.3. Из (20.1) можно получить уравнение водного баланса путем умножения всех его членов на $\Delta x \cdot \Delta t$:

$$\mu \Delta H^t \Delta x = (q_{np} - q_{om}) \Delta t + (W_a - W_{исп} \pm W_{эл}) \Delta x \cdot \Delta t \quad (20.2)$$

Здесь $(q_{np} - q_{om}) \Delta t$ отражает изменение объема воды за счет подземного стока, $(W_a - W_{исп} \pm W_{эл}) \Delta x \cdot \Delta t$ - накопление (+) или расходование (-) объема воды за счет вертикального водообмена и $\mu \Delta H^t \Delta x$ - результирующая водного баланса, характеризующая накопление (+) или убыль (-) запасов воды в выделенном расчетном участке потока Δx за время Δt (емкостное регулирование). Полную связь баланса и режима уровня можно получить, если выразить элементы баланса в уравнении (20.2) через уровни подземных вод в разных сечениях:

$$q_{np} = k \cdot h_{cp} \frac{H_{3,s+1} - H_{2,s+1}}{\Delta x_{2-3}}, \quad q_{om} = k \cdot h_{cp} \frac{H_{2,s+1} - H_{1,s+1}}{\Delta x_{1-2}}, \quad (20.3)$$

где $H_{1,s+1}$, $H_{2,s+1}$, $H_{3,s+1}$ - уровни в расчетных сечениях на промежуточный по отношению к S и $S+2$ момент времени. Из уравнений (20.2) и (20.1) следует, что изменение уровня подземных вод есть результат взаимодействия элементов водного баланса потока.

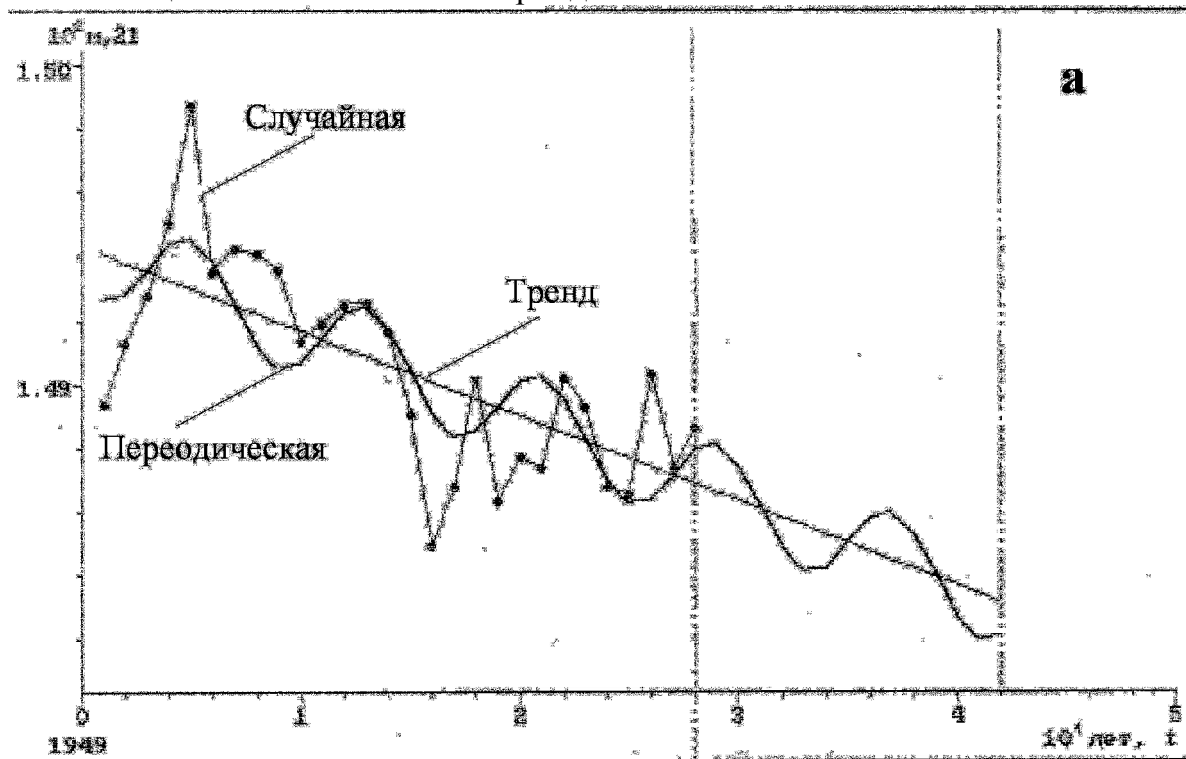
20.4. Структура режима обычно включает в себя три компонента, которые совместно проявляются в сезонном и многолетнем ходе изменения уровня: тренд, периодическая и случайная составляющие (рис. 20.1).

Трендом называется монотонное изменение уровня на протяжении значительного периода времени. Тренд формируется обычно под влиянием техногенных факторов. Возможно формирование тренда и под воздействием естественных факторов, связанных с проявлением многовековой цикличности земных процессов. Так как ограниченные периоды наблюдений за режимом подземных вод (продолжительностью 30-40 лет) оказываются существенно меньшими, чем длительность многовековых процессов, мы воспринимаем только часть этого длительного цикла, проявляющегося в виде монотонного последовательного снижения или повышения уровня.

Тренд может быть линейным и нелинейным. Существование линейного тренда, как это видно из уравнения (20.1), свидетельствует о неизменности действия режимообразующих факторов, т.е. правая часть уравнения не меняется, тогда и $\Delta H / \Delta t = const$. Тренд будет положительным при постоянном преобладании инфильтрации и притока и отрицательным – в случае преобладания оттока и испарения, глубинного оттока.

Генетическая природа периодических колебаний уровня связана с сезонными или многолетними изменениями режимообразующих факторов так, что их алгебраическая сумма меняет свой знак. В этом случае определенные периоды времени характеризуются положительным балансом подземных вод и $\Delta H / \Delta t > 0$, происходит подъем уровней. В последующий период баланс подземных вод оказывается отрицательным, т.е. расходные статьи $(q_{om} + W_{исп} \cdot \Delta x)$ преобладают над приходными $(q_{np} - W_a \cdot \Delta x)$, следовательно, $\Delta H / \Delta t < 0$ и происходит снижение уровня воды. Обычно проявляется сезонная (по сезонам го-

да) и многолетняя периодичность. Последняя чаще всего связана с деятельностью Солнца и имеет 11-летний период колебаний.



СЛУЧАЙНАЯ КОМПОНЕНТА

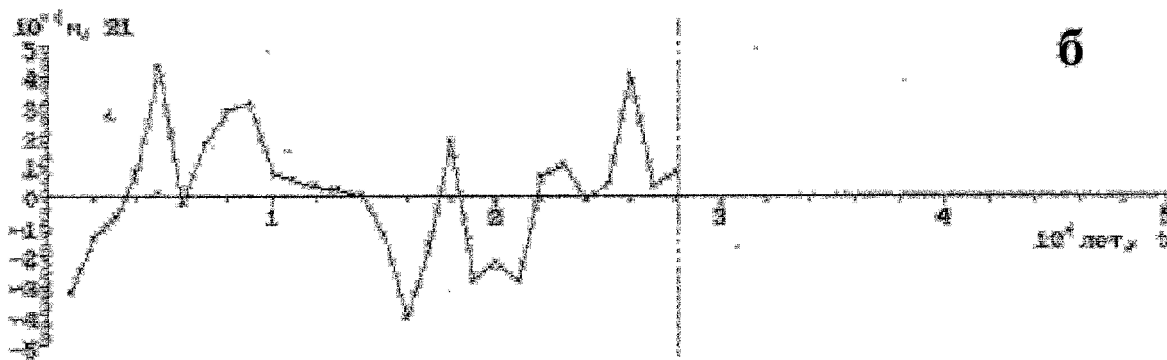


Рис. 20.1. Структура типового графика режима уровня подземных вод
(а — все составляющие изменение уровня компоненты; б — снятая отдельно случайная компонента)

Случайная составляющая изменения уровней связана с многообразием процессов, которые очень трудно изучить и практически невозможно предсказать. К числу таких процессов можно отнести выпадение катастрофически большого количества осадков, сопровождающееся увеличением инфильтрационного питания и подпором в реках, либо длительные засухи, приводящие к противоположному эффекту. Возникающие при этом изменения уровня не являются закономерными, хотя и происходят в полном соответствии с уравнением (20.1). Случайная составляющая служит мерой нашего незнания природных процессов, которые мы не можем изучить и предсказать.

Таким образом, любой длительный ряд наблюдений за уровнем подземных вод может быть представлен в виде

$$H(t) = H_{mp}(t) + H_{np}(t) + \varepsilon, \quad (20.4)$$

где $H_{mp}(t)$ - тренд,

$H_{np}(t)$ - периодическая составляющая,

ε - случайная составляющая.

20.5. При изучении режима используются стохастические и детерминированные модели. Конечной задачей является составление прогноза режима на расчетный период эксплуатации проектного инженерного сооружения.

Выделяют естественный и нарушенный типы режима. Естественный режим определяется преимущественным влиянием климата и гидрологии. Эти факторы проявляются в виде периодической и случайной составляющих режима уровней, изучение которых связано с использованием стохастических моделей. В формировании нарушенного режима ведущую роль играют техногенные воздействия, имеющие в основном детерминированный характер (водоотбор, орошение и т.п.). Поэтому нарушенный режим изучают с применением аналитических уравнений или моделирования.

20.6. На первом этапе исследований для выявления типа режима применяют комплекс вероятностно-статистических методов: тренд, гармонический, регрессионный анализы, автокорреляция. В результате этого выделяют основные компоненты режима: тренд, периодическую и случайную составляющие, определяют степень связи режима подземных вод с климатическими и гидрологическими факторами, а также связь режима изменения уровней на разных участках изучаемой территории, в разных водоносных горизонтах. Эти методы позволяют выполнить районирование территории по особенностям режима, выявить степень нарушения естественного режима техногенными воздействиями. Для естественного режима характерно преобладание периодической и случайной составляющей, для нарушенного – тренда.

На втором этапе выполняется количественная оценка режимообразующих факторов, как аналитическими методами, так и методом конечных разностей. В основе последнего лежит использование уравнения (20.2), записанного относительно $W \cdot \Delta x \cdot \Delta t$ и уравнение (20.3). При этом определяются основные элементы баланса, входящие в уравнение (20.2) по сезонам года, за каждый год и за весь период наблюдений. Метод конечных разностей применяется при наличии данных регулярных измерений уровня, проведенных на определенной системе наблюдательных скважин. Эти скважины должны быть расположены по потоку (по линии тока) подземных вод, на участке однородного строения пласта, в пределах одного района с одинаковым типом изменения режима уровня, выявленном на первом этапе исследования. Расстояние между скважинами должны обеспечивать значимую разницу в уровнях воды (не менее 0,3 м), то есть составлять, как правило, не менее 200 м. В качестве расчетных Δt используются периоды монотонного изменения уровня во всех скважинах расчетного створа (рис. 20.2 а, б).

С помощью этого метода рассчитывается величина питания грунтовых вод W , отвечающая времени Δt . Положительное значение W отвечает инфильтрации атмосферных осадков, отрицательное – суммарному испарению и транспирации. Метод позволяет исследовать баланс подземных вод в целом по сезонам года (уравнение 20.2) и определить среднегодовые и многолетние показатели режима и отдельных статей баланса.

В последнем случае осуществляется суммирование элементов баланса в следующем виде

$$\frac{\sum_{i=1}^n \mu \cdot \Delta H_i^t \cdot \Delta x}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{np} - q_{om}) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (W_a + W_{исп} \pm W_{эл}) \Delta x \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (20.5)$$

где 1,2..... n - порядковый номер и общее количество интервалов Δt_i за выбранный период наблюдений (год или несколько лет).

Соотношение элементов баланса позволяет выделить главные режимобразующие факторы и установить основные закономерности формирования режима подземных вод, оценить тенденции в его изменении на прогнозный период (рис. 20.2 в).

20.7. При расчетах расходов неустановившегося потока воды по формулам установившегося движения (20.3) возникает определенная погрешность. Чтобы эта погрешность была менее 10% (по С.Ф. Аверьянову [1]), необходимо соблюдать условие

$$f_0 = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \geq 0,80 \quad . \quad (20.6)$$

Из формулы (20.6) следует, что

$$\Delta x \leq 1,12 \sqrt{a \cdot \Delta t} \quad . \quad (20.7)$$

По этой формуле можно вычислить расстояние между скважинами, при котором можно описывать неустановившееся движение как последовательную смену установившихся течений, а для расчета расхода между сечениями на расстоянии Δx применять формулу Дарси.

20.8. Большая изменчивость естественного режима уровней характерна для грунтовых вод. Эти воды подвержены прямому воздействию метеорологических и гидрологических факторов. Условия формирования режима уровней связаны с различной расчлененностью рельефа, глубиной эрозионного вреза рек, естественной дренированностью территории. Важным фактором, определяющим режим уровней, является так же состав пород, слагающих зону аэрации, и водоносный горизонт, глубина до уровня воды. В трещиноватых и закарстованных породах колебания уровней характеризуются большими амплитудами (до 10 м).

Основными типами режима грунтовых потоков являются водораздельный и прибрежный.

Водораздельный (междуречный) тип режима характерен для территорий, удаленных от крупных поверхностных водотоков. Здесь развиты потоки, которые схематизируются как неограниченные в плане с параллельным во времени

перемещением поверхности грунтовых вод. Основными режимобразующими факторами являются инфильтрация атмосферных осадков и отток подземных вод, как латеральный по пласту, так и нисходящая фильтрация в нижележащие водоносные горизонты. При малых глубинах залегания воды одним из основных режимобразующих факторов становится испарение.

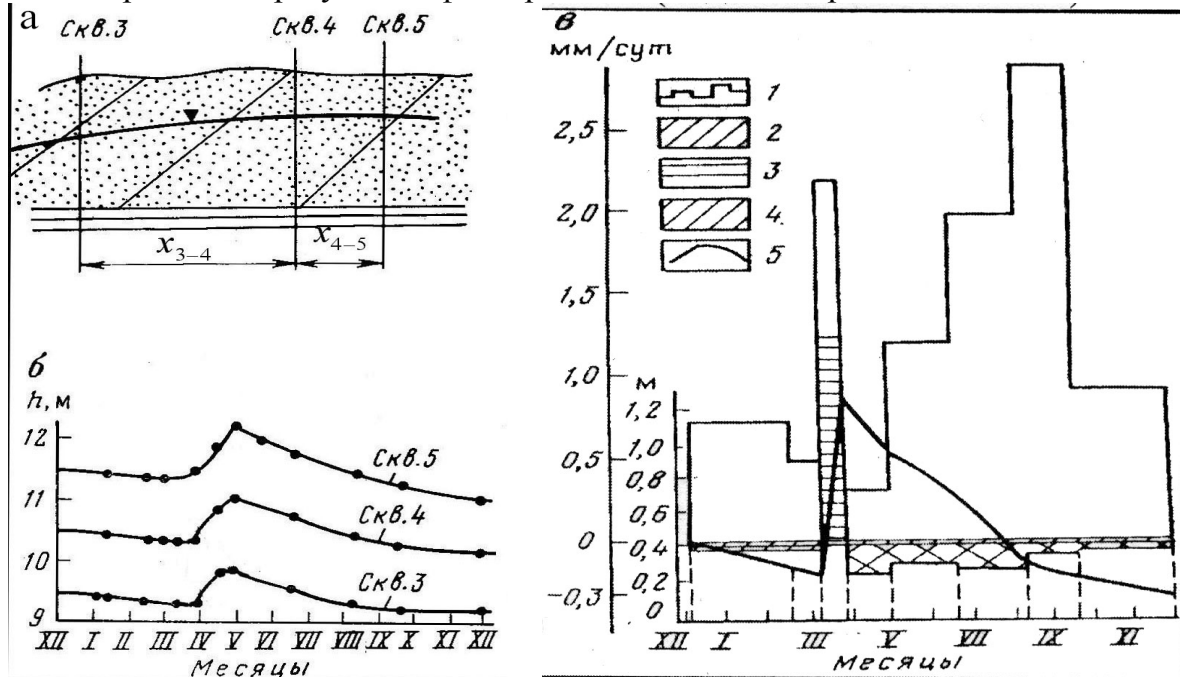


Рис. 20.2. Схематический гидрогеологический разрез с наблюдательными скважинами (а), графики колебания УГВ (б) и изменение элементов водного баланса (в)

(1 – осадки; 2 – подземный сток; 3 – инфильтрация; 4 – испарение; 5 – колебания УГВ в центральной скважине)

Наибольшая интенсивность инфильтрации характерна для периода весеннего снеготаяния, в летне-осенний период инфильтрационное питание практически полностью расходуется на испарение, в зимний период зона аэрации промерзает.

В долинах крупных и средних рек, имеющих хорошую гидравлическую связь с грунтовыми водами, развит прибрежный (террасовый) тип режима уровней. Эти потоки схематизируются в виде полуограниченных в плане. Основными режимобразующими факторами здесь являются приток-отток, положение уровня подземных вод преимущественно зависит от сезонных колебаний уровня в реке. Область распространения прибрежного типа режима ограничена проникновением изменения уровня, вызванного паводком на реке, вглубь берега. Величина этого проникновения зависит, главным образом, от уровнепроводности пласта и при типичных для грунтовых вод значениях $a = 500 - 3000 \text{ м}^2/\text{сут}$ составляет 400-1200 м.

Напорные воды, изолированные вышележащими водоупорами, характеризуются меньшей изменчивостью положения уровней. Здесь могут практически не наблюдаться сезонные колебания, но более отчетливо фиксируются многолетние колебания и тренд.

Вопросы к лекции № 20

1. Какие компоненты выделяют в структуре многолетнего ряда наблюдений за уровнем подземных вод?
2. Какое изменение уровня во времени называется трендом? Под влиянием каких факторов формируется тренд?
3. Под влиянием каких факторов формируется периодическая составляющая изменения уровня подземных вод? Проиллюстрируйте изменчивость этих факторов путем анализа уравнения водного баланса.
4. С какими факторами формирования режима связана случайная составляющая?
5. С какими типами режима подземных вод обычно связаны периодическая и случайная составляющая?
6. Какие элементы водного баланса определяют методом конечных разностей?
7. Какие требования предъявляются при организации режимной сети наблюдательных скважин (расположение, точность, частота и период наблюдений)?
8. Охарактеризуйте основные особенности водораздельного типа режима грунтовых вод? Какие расчетные схемы используются при анализе этого типа режима?
9. В чем основные причины ограниченного по площади распространения территории, где характерен прибрежный тип режима уровней грунтовых вод? Какие расчетные схемы используются при анализе этого типа режима?
10. Какие периоды колебаний более характерны для грунтовых, а какие – для напорных вод? С чем это связано?
11. Какие задачи ставятся перед статистической обработкой временных рядов?

Лекция № 21 Определение параметров пласта по данным наблюдений за режимом подземных вод

21.1. Наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод, направленные на определение параметров строения и питания (разгрузки) водоносных пластов, называются опытно-фильтрационными наблюдениями (ОФН). К параметрам строения пласта относят коэффициент фильтрации k (водопроницаемости T), гравитационную емкость μ , параметр перетока (k_0/m_0), параметр сопротивления ложа водотоков ($\Delta L_{\text{но}}$). К параметрам питания и разгрузки относят интенсивность инфильтрации ($+W_a$) или испарения ($-W_u$), глубинное питание ($-W_{\text{зл}}$), фильтрационные потери из каналов.

Типы определяемых параметров и типовые гидрогеологические условия показаны в таблице № 21.1.

21.2. Для расчетов в условиях стационарного режима фильтрации используется уравнение водного баланса, записанное для расчетного элемента площадью F в потоке подземных вод (рис. 21.1):

$$Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}} + (W_a - W_u - W_{\text{зл}}) \cdot F = 0, \quad (21.1)$$

где $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{от}}$ - расходы притока и оттока воды в расчетном элементе,

W_a , W_u , $W_{эл}$ - величины инфильтрационного питания, испарения с уровня грунтовых вод и глубинного питания в нижележащие водоносные горизонты. Эти величины предполагаются неизменными по площади.

Для количественной оценки составляющих уравнения (21.1) необходимо иметь данные наблюдений не менее чем в трех сечениях (наблюдательных скважинах), расположенных по потоку подземных вод (рис. 21.1):

$$(k \cdot h)_{1-2} \frac{H_1 - H_2}{\Delta l_{1-2}} B_{1-2} - (k \cdot h)_{2-3} \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}} B_{2-3} + (W_a + W_u - W_{эл}) \cdot B_{1-3} \frac{\Delta l_{1-3}}{2} = 0. \quad (21.2)$$

Здесь $(k \cdot h)_{1-2}$, $(k \cdot h)_{2-3}$ и B_{1-2} , B_{2-3} - среднее значение водопроводимости и ширины между сечениями 1–2 и 2–3,

H_1 , H_2 , H_3 , Δl_{1-2} , Δl_{2-3} - уровни и расстояния между соответствующими сечениями.

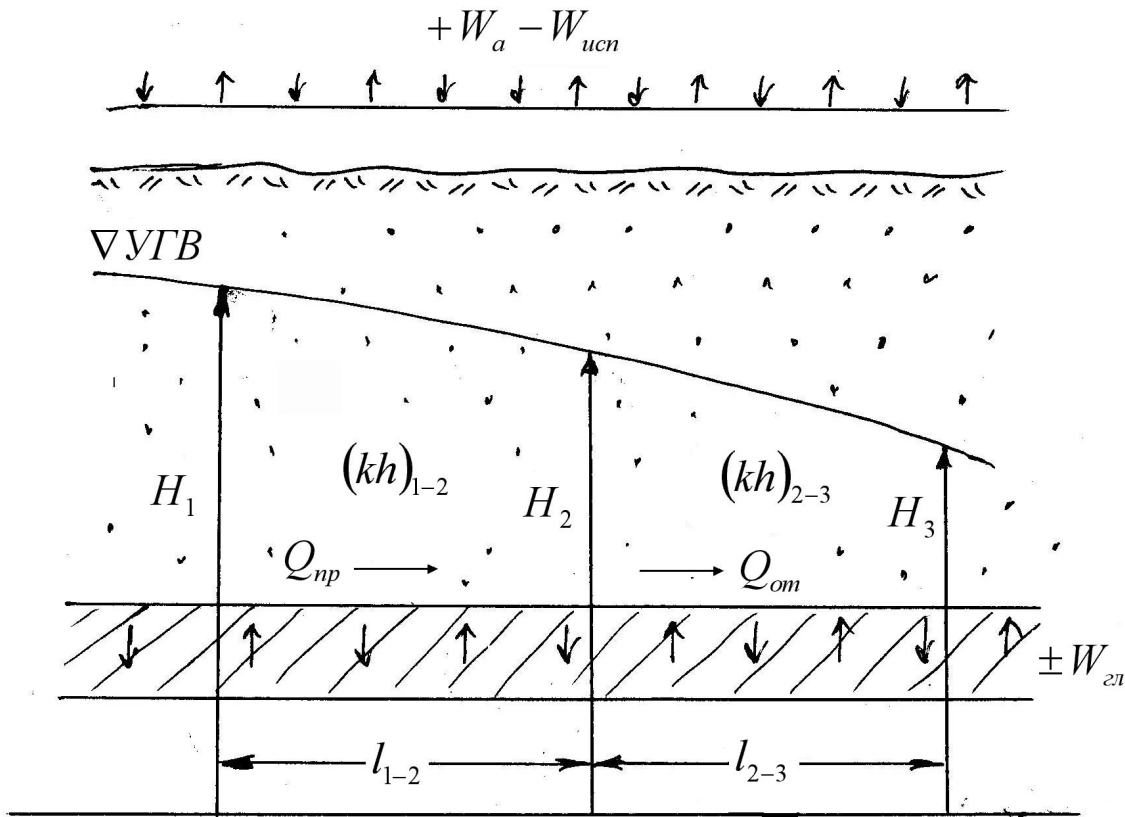


Рис. 21. 1. Расчетная схема к уравнению водного баланса

В качестве расчетных значений H обычно используются среднегодовые данные или наблюдения, выполненные в межень, когда уровни достигают своего минимума и некоторое время остаются неизменными.

21.2.1. При отсутствии вертикального водообмена ($W_a = W_{эл} = 0$), последний член в формуле (21.2) равен нулю и она приобретает вид характерный для ленты тока в гидродинамической сетке:

$$(k \cdot h)_{1-2} \frac{H_1 - H_2}{\Delta l_{1-2}} B_{1-2} - (k \cdot h)_{2-3} \frac{H_2 - H_3}{\Delta l_{2-3}} B_{2-3} = 0 \quad (21.3)$$

Типовые условия определения гидродинамических параметров

<i>Гидрогеологические условия</i>	<i>Определяемые параметры</i>
Стационарный режим фильтрации	
1. Грунтовые воды на водоразделах	Интенсивность инфильтрации ($W_a - W_u$) и глубинного перетока ($W_{эл}$)
2. Грунтовые воды в области разгрузки	Водопроводимость пласта (T), сопротивление ложа водотока ($\Delta L_{но}$)
Нестационарный режим фильтрации	
3. Сезонные и многолетние изменения уровня грунтовых вод на водоразделах	Интенсивность инфильтрации (W), гравитационная емкость (μ), глубинное перетекание ($W_{эл}$)
4. Изменения уровня грунтовых вод в долине реки	Гравитационная емкость (μ), интенсивность инфильтрации ($W_a - W_u$)

По формуле (21.3) может быть определено изменение величины водопроницаемости пласта вдоль потока подземных вод

$$\frac{(k \cdot h)_{2-3}}{(k \cdot h)_{1-2}} = \frac{H_1 - H_2}{H_2 - H_3} \frac{B_{1-2}}{B_{2-3}} \frac{\Delta l_{2-3}}{\Delta l_{1-2}} = \frac{I_{1-2} \cdot B_{1-2}}{I_{2-3} \cdot B_{2-3}} \quad (21.4)$$

21.2.2. В условиях хорошей изученности фильтрационных свойств основного пласта по формуле (21.2) можно оценить величину вертикального водообмена. При этом положительные величины W следует связывать с наличием инфильтрационного питания. При получении отрицательных значений W следует обратить внимание на глубину до уровня грунтовых вод. При близком его залегании к поверхности земли (до 2 м) полученное значение скорее всего характеризует испарение с поверхности грунтовых вод. При глубоком его залегании (глубже 2-3 м), полученное отрицательное W характеризует глубинное питание - $W_{эл} = \frac{k_0 \cdot \Delta H_0}{m_0}$ в нижезалегающие водоносные пласты.

21.2.3. Для прибрежных участков водоносного горизонта формула (21.3) преобразуется следующим образом (рис. 21.2):

$$(k \cdot h)_{1-2} \frac{H_2 - H_1}{\Delta l_{1-2}} - (k \cdot h)_{p-1} \frac{H_1 - H_p}{\Delta l_{p-1} + \Delta L_{но}} = 0, \quad (21.5)$$

где $\Delta L_{но}$ - показатель, характеризующий дополнительные потери напора, которые связаны с деформацией потока под влиянием несовершенства вреза реки в водоносный горизонт и закальматированность русла реки.

В случае однородного строения пласта из (21.5) величина $\Delta L_{но}$ определяется простой формулой:

$$\Delta L_{но} = \frac{H_1 - H_p}{H_2 - H_1} \Delta l_{1-2} - \Delta l_{p-1} \quad (21.6)$$

Необходимым условием для использования уравнения (21.6) является расположение скв. 1 на расстоянии исключающем влияние несовершенства вреза реки ($\Delta l_{p-1} > h_{cp}$).

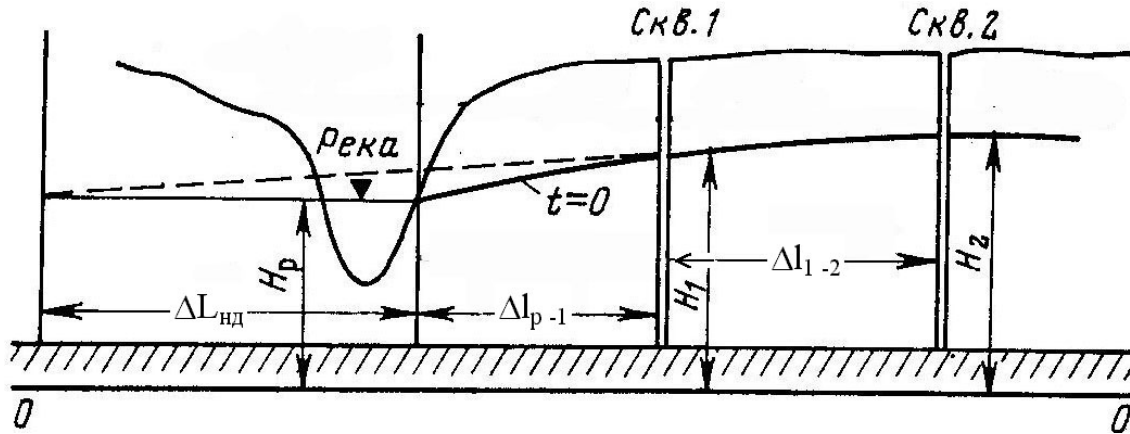


Рис. 21. 2. Расчетная схема определения параметра $\Delta L_{но}$ (по В.М. Шестакову)

21.3. Применение аналитических решений для определения параметров в условиях нестационарного режима предполагает, что уровнепроводность и питание подземных вод остаются неизменными по площади. При этом должны соблюдаться условия (20.6) и (20.7).

В условиях нестационарного режима фильтрации используется решение дифференциального уравнения для полуоткрытого пласта с инфильтрационным питанием. В общем случае при изменении уровня воды в реке это решение имеет вид (см. лекцию № 17):

$$\Delta H(x, t) = \Delta H^0 \cdot R(\lambda) + \frac{W \cdot t}{\mu} [1 - R(\lambda)] \quad (21.7)$$

где $\Delta H(x, t)$ - изменение уровня в сечении x за период Δt ,
 ΔH^0 - изменение уровня на урезе реки;

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{a t}} \quad (21.8)$$

Здесь x - расстояние от уреза реки до расчетного сечения,

$$a = \frac{kh}{\mu} \text{ - уровнепроводность,}$$

μ - водоотдача.

21.3.1. В период зимней межени в результате промерзания зоны аэрации можно считать $W = 0$. Тогда уравнение (21.7) упрощается

$$\Delta H(x, t) = \Delta H^0 \cdot R(\lambda) \quad (21.9)$$

или

$$R(\lambda) = \frac{\Delta H(x, t)}{\Delta H^0} \quad (21.10)$$

Выбрав участок следующего после стационарного положения монотонного во времени изменения уровня в реке и в расчетном сечении (наблюдательная скважина), определяют ΔH^0 , $\Delta H(x, t)$, далее находят $R(\lambda)$, по таблице определяют λ и по зависимости (21.8) находят

$$a = \frac{x^2}{4\lambda^2 \Delta t} \quad (21.11)$$

Если река имеет несовершенный врез, то вместо x принимаем $(x + \Delta L_{\text{вод}})$.
(21.12)

21.3.2. При наличии данных наблюдений по двум скважинам, расположенным по линии тока (обычно в створе перпендикулярном реке), сведения о гидрологическом режиме реки иметь не обязательно. В этом случае в качестве граничного условия выступает нижняя по потоку скважина, в которой принимают $x = 0$ и $\Delta H_1(0, t) = \Delta H^0$, для верхней по потоку скважины за x принимается расстояние между скважинами, а изменение уровня соответствует $\Delta H(x, t)$. В этом случае нет необходимости учета несовершенства вреза реки.

21.3.3. При известных значениях уровнепроводимости пласта a и водоотдачи μ может быть определена величина инфильтрационного питания W по видоизмененной формуле (21.7):

$$W = \frac{\mu}{t} \frac{\Delta H(x, t) - \Delta H^0 \cdot R(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (21.13)$$

23.3.4. Данные наблюдений за режимом уровня в трех сечениях (скважинах) по потоку подземных вод позволяют независимо найти величину как уровнепроводности пласта a , так и величину W/μ . Полагаем, что нижняя по потоку скважина – граничное условие. Здесь $x = 0$ и $\Delta H(0, t) = \Delta H^0$. Тогда в двух других скважинах имеем (рис. 21.3):

$$\Delta H(x_1, t) = \frac{W\Delta t}{\mu} [1 - R(\lambda_1)] + \Delta H^0 \cdot R(\lambda_1) \quad (21.14)$$

и

$$\Delta H(x_2, t) = \frac{W\Delta t}{\mu} [1 - R(\lambda_2)] + \Delta H^0 \cdot R(\lambda_2) \quad , \quad (21.15)$$

$$\text{где } \lambda_{1,2} = \frac{x_{1,2}}{2\sqrt{a \cdot \Delta t}} \quad (21.16)$$

Вычтем (21.15) из (21.14):

$$\Delta H(x_1, t) - \Delta H(x_2, t) = [R(\lambda_1) - R(\lambda_2)] \cdot \left(\Delta H^0 - \frac{W \cdot \Delta t}{\mu} \right) \quad (21.17)$$

$$\text{Обозначим } \Delta R(\lambda, \bar{\lambda}) = R(\lambda_1) - R(\lambda_2) \quad , \quad (21.18)$$

$$\text{причем } \bar{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{x_1}{x_2} \quad \text{и} \quad (21.19)$$

$$\Delta^2 H(x, t) = \Delta H(x_1, t) - \Delta H(x_2, t) \quad .$$

Из формулы (21.17)выразим:

$$\frac{W \cdot \Delta t}{\mu} = \Delta H^0 - \frac{\Delta^2 H(x, t)}{\Delta R(\lambda, \bar{\lambda})} \quad , \quad (21.20)$$

а из формулы (21.14):

$$R(\lambda_1) = \frac{\Delta H(x_1, t) - \frac{W \cdot \Delta t}{\mu}}{\Delta H^0 - \frac{W \cdot \Delta t}{\mu}} \quad . \quad (21.21)$$

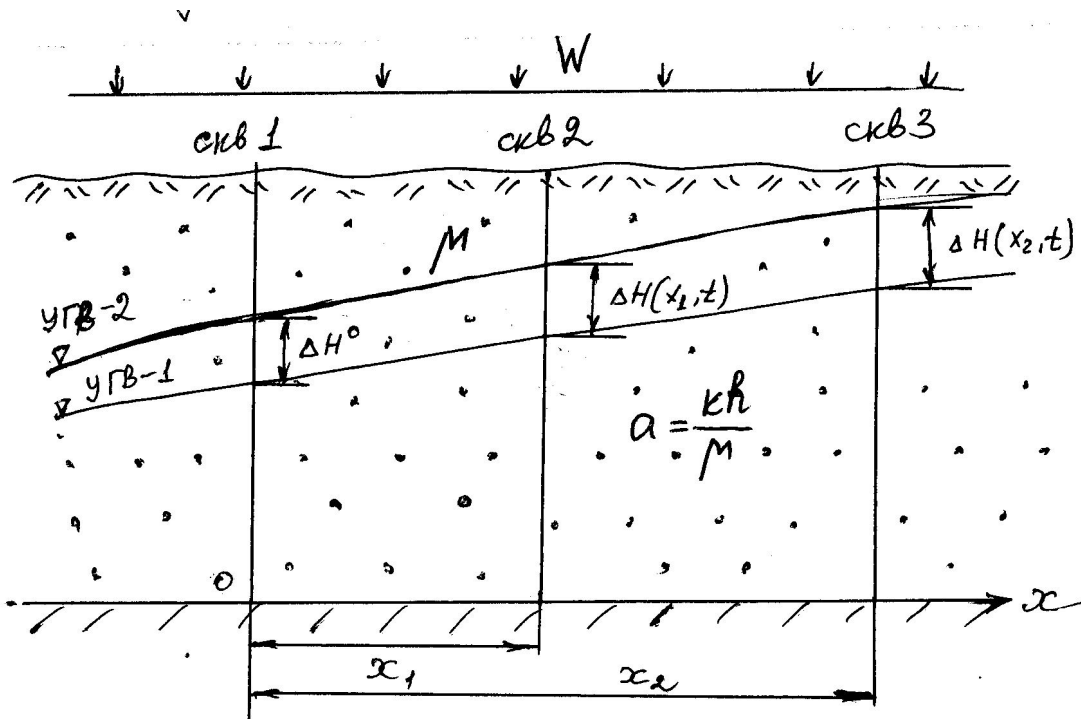


Рис. 21. 3. Расчетная схема определения параметра W/μ и a по трем сечениям в условиях нестационарного режима фильтрации

Имея ввиду (21.20), перепишем (21.21) в виде

$$R(\lambda_1) = \left[\Delta H(x_1, t) - \Delta H^0 \right] \frac{\Delta R(\lambda, \bar{\lambda})}{\Delta^2 H(x, t)} + 1 \quad . \quad (21.22)$$

Задача решается методом итераций (последовательных приближений).

Задаемся из соображений наибольшего правдоподобия значением $a = \frac{kh}{\mu}$. На-

пример, полагая $k = 5$ м/сут, $h = 10$ м, $\mu = 0,1$, получим $a = 500$ м²/сут. Определяем для конкретных условий λ_1 , λ_2 , $R(\lambda_1)$, $R(\lambda_2)$ и далее по формуле (21.22) находим новое значение $R(\lambda_1)$, по таблице определяем λ_1 и по формуле (21.11) вычисляем уточненное a_1 . Полученное a_1 используем для повторного цикла расчета и тем же порядком расчетов определяем второе уточненное значение a_2 . Уточнения следует прекратить, если выполняется условие

$$\left| 1 - \frac{a_i}{a_{i+1}} \right| \leq \varepsilon \quad , \quad (21.23)$$

где a_i и a_{i+1} предыдущее и текущее уточненное значение уровня не проводности,

ε - допустимая ошибка вычисления параметра a . Обычно можно принять $\varepsilon = 0,1$.

После этого, используя уравнение (21.20), находим величину W/μ .

Из анализа формулы (21.20) следует, что если в верхних по потоку скважинах изменения уровня за период Δt одинаковые, $\Delta H(x_1, t) = \Delta H(x_2, t)$, то

$W = \frac{\Delta H^0 \cdot \mu}{\Delta t}$. В этом случае оттока нет и пласт можно рассматривать как неограниченный в плане. В том случае, если нет изменения уровня в нижней по потоку скважине ($\Delta H^0 = 0$), имеем расчетную схему полуоткрытого пласта с $H = const$. Тогда из формулы (21.20) получим

$$\frac{W \cdot \Delta t}{\mu} = - \frac{\Delta^2 H(x, t)}{\Delta R(\lambda, \bar{\lambda})} \quad (21.24)$$

и

$$R(\lambda_1) = 1 + \frac{\Delta H(x_1, t) \cdot \Delta R(\lambda, \bar{\lambda})}{\Delta^2 H(x, t)}, \quad (21.25)$$

то есть вычисления упрощаются.

Вопросы к лекции № 21

1. В условиях плоскопараллельной стационарной фильтрации по какому параметру гидродинамической сетки можно выявить изменения величины водопроводимости пласта?
2. Какой параметр может быть определен по среднегодовым значениям уровня подземных вод в однородном пласте по створу вдоль потока на водоразделе?
3. Какой параметр может быть определен по значениям меженных уровней подземных вод по створу перпендикулярному урезу реки?
4. Какие допущения приняты при выводе формулы (21.6)?
5. Какие обратные задачи можно решать на основе уравнений плоскопараллельной стационарной и нестационарной фильтрации?
6. Какая исходная информация необходима для определения инфильтрационного питания по уравнению в конечных разностях?
7. На основе анализа формулы (21.13) запишите уравнение для определения величины инфильтрационного питания на водоразделах (далеко от реки)?
8. Какой период с характерным изменением уровня следует выбирать для определения величины уровня не проводности?
9. Какие факторы влияют на точность определения параметров при стационарном режиме фильтрации?
10. Какие существуют ограничения на расположение наблюдательных скважин, данные по которым используются для определения параметров, при нестационарном режиме фильтрации?