

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Г. Н. КАМЕНСКИЙ

ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД В МЕЖДУРЕЧНОМ МАССИВЕ

(Представлено академиком А. Д. Архангельским 16 X 1938)

Поверхность грунтовых вод в междуречном массиве при инфильтрации сверху атмосферных осадков принимает форму кривой, исследование которой позволяет решать ряд практических задач о фильтрации из водохранилищ через водораздельный массив и о подпоре грунтовых вод (1, 2, 3). Фильтрация через водораздел может возникнуть например при устройстве плотины на реке, отделенной нешироким водоразделом от другой реки с более низким уровнем или неширокой лукой от нижнего бьефа той же реки, что имеет место например в районе Куйбышевского гидротехнического узла.

Для любого сечения грунтового потока в междуречном массиве (фиг. 1) можно написать:

1) для левой части междуречья

$$q = kh \frac{dh}{dx}, \quad (1)$$

2) для правой части междуречья

$$q = -kh \frac{dh}{dx}, \quad (2)$$

где q — единичный расход грунтового потока, k — коэффициент фильтрации, h — уровень грунтовых вод, измеряемый от горизонтального основания водоносного пласта, x — расстояние от левой реки.

Расход грунтового потока может быть выражен в другом виде на основании учета питания потока инфильтрацией атмосферных осадков:

1) для левой части междуречья

$$q = \omega (a - x), \quad (3)$$

2) для правой части междуречья

$$q = \omega (x - a), \quad (4)$$

где ω — величина инфильтрации, т. е. слой воды, просачивающейся сверху в единицу времени, a — расстояние от реки до водораздела.

Приравнивая правые части уравнений (1) и (3), а также (2) и (4), получим для левой и правой части междуречья общее дифференциальное уравнение:

$$kh \frac{dh}{dx} + \omega x - \omega a = 0. \quad (5)$$

Разделив переменные и проинтегрировав последнее уравнение в пределах от начального сечения на урезе реки до сечения на расстоянии x от уреза, получим:

$$h^2 = h_1^2 + 2 \frac{w}{k} ax - \frac{w}{k} x^2, \quad (6)$$

где h_1 — уровень грунтовых вод на урезе реки.

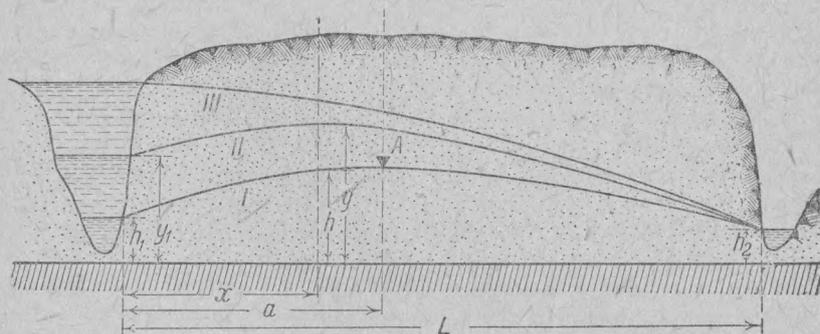
Приравняв в полученном уравнении $x=L$, ширине всего междуречья, и $h=h_2$, уровню воды в другой реке, определим расстояние до водораздела:

$$a = \frac{L}{2} - \frac{k}{w} \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}. \quad (7)$$

Подставив это значение a в уравнение (6), получим для кривой депрессии грунтовых вод в междуречном массиве уравнение:

$$h^2 = h_1^2 + \frac{w}{k} Lx - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} x - \frac{w}{k} x^2. \quad (8)$$

Вопрос о фильтрации через водораздел может быть решен, если будет определено положение водораздела грунтовых вод при подпоре реки, что может быть выполнено на основании уравнения (7).



Фиг. 1.

Если $a > 0$, то при подпоре реки будет существовать водораздел грунтовых вод, и фильтрации из водохранилища не будет. При $a = 0$ будем иметь критическое положение водораздела, который будет находиться на урезе подпертой реки. При дальнейшем возрастании уровня воды в последней будет уже развиваться фильтрация из водохранилища в одну сторону, в нижний бьеф. Критическое положение уровня водохранилища h_1 может быть определено из формулы (7) при $a_1 = 0$:

$$h_1 = \frac{w}{k} L^2 + h_2^2. \quad (9)$$

Величина $\frac{w}{k}$ может быть при этом вычислена непосредственно из данных о величине инфильтрации и водопроницаемости пород или из уравнения (8) путем подстановки вместо h уровня воды h_n в какой-либо скважине, находящейся вблизи водораздела на расстоянии x_n от уреза водохранилища. Для определения расхода грунтового потока, идущего из подпертого водохранилища в другой бассейн, составим уравнение грунтового потока, учитывая, что в любом сечении на расстоянии от водохранилища расход потока q_x будет складываться из фильтрации в берег водохранилища, имеющей расход q_1 , и инфильтрации атмосферных осадков wx , присоединяющейся к потоку на пути x :

$$q_x = q_1 + wx. \quad (10)$$

Подставляя вместо q_x его значение из дифференциального уравнения Дюпюи, имеем:

$$-kh \frac{dh}{dx} = q_1 + \omega x.$$

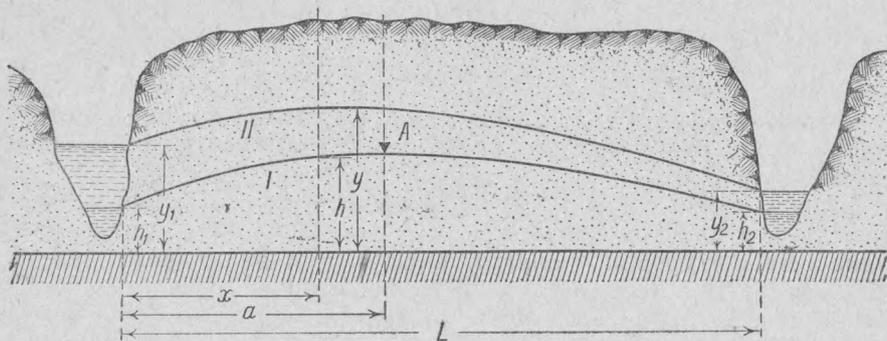
Разделив переменные и проинтегрировав последнее уравнение в пределах от начального сечения на урезе водохранилища и до сечения на расстоянии x от уреза, получим:

$$h^2 = h_1^2 - 2 \frac{q_1}{k} x - \frac{\omega}{k} x^2. \quad (11)$$

Полагая в этом уравнении $x = L$ и $h = h_2$, получим выражение для q_1 :

$$q_1 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} - \omega \frac{L}{2}. \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) являются более общим выражением расхода грунтового потока, чем известная формула Дюпюи. Последняя получается из них, как частный случай при $\omega = 0$.



Фиг. 2.

С помощью формулы (12) вопрос о фильтрации через водораздел выясняется следующими соображениями. В зависимости от соотношения величин уравнения (12) могут быть три случая:

- 1) $q_1 > 0$;
- 2) $q_1 = 0$;
- 3) $q_1 < 0$.

В первом случае будет иметь место фильтрация из водохранилища; в третьем — обратное явление, т. е. питание водохранилища грунтовыми водами; второй случай представляет собой промежуточное состояние потока, когда фильтрация из водохранилища, а также и питание последнего грунтовыми водами будут равны 0.

Формула (12) может быть применена для определения подъема уровня грунтовых вод при подпоре (фиг. 2), для чего составим два уравнения:

- 1) до подпора:

$$h^2 = h_1^2 - 2 \frac{q_1}{k} x - \frac{\omega}{k} x^2,$$

- 2) после подпора:

$$y^2 = y_1^2 - 2 \frac{q_1'}{k} x - \frac{\omega}{k} x^2.$$

Вычитая из второго первое, получим:

$$y^2 - h^2 = y_1^2 - h_1^2 + 2 \frac{x}{k} (q_1 - q_1').$$

Пользуясь формулой (12), определяем значение величины $q_1 - q_1'$, что характеризует собой изменение расхода грунтового потока на урезе водохранилища:

$$q_1 - q_1' = k \frac{(h_1^2 - h_2^2) - (y_1^2 - y_2^2)}{2L}. \quad (13)$$

Подставив это выражение в предыдущее уравнение и сделав преобразования, получим окончательно для нового положения уровня грунтовых в исследуемом пункте формулу:

$$y^2 = h^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L-x}{L} + (y_2^2 - h_2^2) \frac{x}{L}. \quad (14)$$

При этом h и ω сократились, так как мы принимаем строение пласта однородным и инфильтрацию неизменной. Уравнение (14) имеет место при подъеме уровней рек с обеих сторон исследуемого массива.

Более обычным в практике случаем будет подпор лишь с одной стороны массива, т. е. когда $y_2 = h_2$. В этом случае последний член в правой части уравнения (14) исчезает, и мы получаем:

$$y^2 = h^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L-x}{L}. \quad (15)$$

Формула (14) применима также к случаю, когда в зоне подпора за исследуемым участком находится сухая балка или овраг, в котором уровень грунтовых вод до подпора стоял ниже поверхности земли. Если после подпора в этом месте грунтовые воды поднимутся до поверхности земли, то овраг их будет дренировать и будет играть роль второй реки, снижая несколько величину подпора. В этом случае расчет по обычной формуле Дюпюи дает преувеличение и вычисленный по ней уровень грунтовых вод после подпора оказывается выше земной поверхности.

В данном случае при расчете за величину h_2 принимаем уровень грунтовых вод под дном оврага до подпора; за y_2 — высоту возможного подъема того же уровня в овраге, т. е. высоту дна оврага над водопором; за L — расстояние от реки до оврага.

В случае, если при подпоре урез реки перемещается, формулы должны несколько видоизмениться. Но можно воспользоваться ими в неизменном виде, измеряя уровень воды h до подпора в сечении на урезе будущего водохранилища, где для этой цели закладывается скважина. Расстояния x и L в этом случае измеряются от этой скважины.

Если положить в уравнении (15) $\frac{L-x}{L} = 1$, что имеет место в том случае, когда L очень велико сравнительно с x , то уравнение (15) перейдет в расчетную формулу подпора грунтовых вод по Дюпюи:

$$y^2 = h^2 + y_1^2 - h_1^2. \quad (16)$$

Формулы (14) и (15) были выведены несколько иначе Т. М. Васи-лициным, который путем опытов в фильтрационном лотке показал их большую точность. Нами были выполнены контрольные расчеты для створов наблюдательных скважин в Москве, что также дало вполне положительные результаты.

В заключение отметим, что описанные формулы, устанавливая зависимость формы поверхности грунтовых вод от характера строения и дренирования междуречья, могут служить теоретической основой для постановки гидрогеологического исследования в целях выяснения задач фильтрации и подпора грунтовых вод в районе гидротехнических сооружений, а в некоторых случаях могут прямо дать конкретное численное решение этих задач.

Поступило
17 X 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Г. Н. Каменский, Н. А. Корчебоков и К. И. Разин, Движение подземных вод в неоднородных пластах (1935). ² Г. Н. Каменский, Основы динамики подземных вод, ч. II (1935). ³ Н. Биндемин, Разведка недр, 13 (1937).