

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИТОКА НАПОРНЫХ ВОД В КОТЛОВАНЫ СООРУЖЕНИЙ И ОТКРЫТЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

Доц. В. И. Давидович

1. Предварительные указания

Определение возможного притока воды представляет существенный практический интерес при проектировании котлованов сооружений или определений притоков к открытым горным выработкам, когда устройство котлованов или выработок связано с вскрытием водоносных напорных пластов. Существующие способы определения фильтрационного притока в этом случае, как правило, имеют целью наиболее точно установить указанную его величину на основании гидрогеологических характеристик гидравлическими или гидромеханическими методами.

Вместе с тем стремление установить наиболее точное значение фильтрационного притока далеко не всегда может быть оправдано по следующим соображениям. Значение притока представляет прежде всего интерес либо при составлении проекта производства и организации земляных работ, либо при установлении притока к горным выработкам при разработке месторождений полезных ископаемых, когда конечной целью является установление способов водоотлива, количества и производительности требуемых насосов, потребности в энергии и т. п.

Опыт проектирования производства строительных работ показывает, что фильтрационный приток можно установить с точностью до нескольких кубических метров в час, что дает достаточную возможность для определения необходимых водоотливных средств.

Таким образом, приближенное значение фильтрационного притока для указанных выше целей может быть признано приемлемым.

Ниже рассматривается случай притока в горную выработку или в котлован, устраиваемый в напорном водоносном горизонте. Рассмотрим, например, котлован траншейного типа (рис. 1). Его расчетная модель (рис. 2) характеризуется следующим образом. Подошва котлована совпадает с водоупором. Мощность водоносного слоя — T . Линия первоначального пьезометрического уровня проходит на высоте H над водоупором, при этом пьезометрический уровень располагается выше или ниже поверхности земли, но во всяком случае выше кровли водоносного пласта. Коэффициент откоса котлована, т. е. отношение заложения к высоте его, в пределах водоносного пласта обозначен

через $m = \operatorname{ctg} \varphi$. Водопроницаемость водоносного грунта принимает постоянной, характеризуемой коэффициентом фильтрации k .

После отрытия котлована или карьера до проектных отметок совпадающих с водоупором, фильтрационный приток из водоносного грунта в первый период будет находиться в условиях неустановившегося режима. Однако при непрерывной откачке воды через некоторое время в водоносном пласте возникнет установившееся движение.

В условиях достаточной мощности пласта депрессионная поверхность фильтрационного потока будет выходить на откос котлована в некоторой точке M (сечение 1—1), расположение которой над водоупором обозначено через h_0 . Следовательно, на участке потока, предшествующем сечению 1—1, будет безнапорное движение. При этом границы депрессионной поверхности определяются сечениями 1—1 и 2—2, где сечение 2—2 является местом соприкосновения кривой депрессии с водо непроницаемой кровлей. Этому участку фильтрационного потока будет предшествовать участок между сечениями 2—2 и 3—3, на котором движение будет напорным, характеризуемым соответствующей пьезометрической поверхностью, причем ее сечение 3—3 определяется областью влияния котлована. При установившейся откачке из котлована понижением первоначального пьезометрического уровня в сечении 3—3 можно пренебречь.

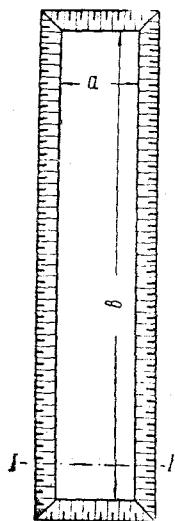


Рис. 1.

2. Приток в котлован траншейного типа

На рис. 1 схематически представлен план котлована траншейного типа. Характерным в его форме является незначительная по сравнению с длиной b ширина a . Это обстоятельство дает возможность полагать, что, установив приток q на единицу длины b , можно с достаточной точностью установить приток Q на всю длину $L = 2(a + b)$, полагая

$$Q = qL. \quad (1)$$

Поперечное сечение котлована 1—1 представлено на рис. 2¹. Обозначая через l_6 длину второго участка, на котором происходит безнапорное движение, через l_n длину третьего участка, на котором происходит напорное движение, будем иметь в виду, что

$$l = l_6 + l_n. \quad (2)$$

При этом l — предельная длина распространения влияния котлована на понижение первоначального пьезометрического уровня.

Рассмотрим фильтрационный расход на каждом из трех участков, показанных на рис. 2.

¹ На рис. 2 показана лишь половина сечения котлована, другая половина симметрична представленной.

Первый участок может рассматриваться по известной терминологии акад. Н. Н. Павловского [1] как низовой клин земляных плотин. Методам определения расхода через низовой клин, в зависимости от его очертания и принятой схемы фильтрации, уделялось достаточно внимания. Подробный анализ явления движения воды в низовом клине плотин произведен проф. А. А. Угинчус [2], который пришел к выводу, что в настоящее время существуют следующие три решения (имея в виду приток на единицу длины низового клина):

1) Павловский: $\frac{q}{kh_0} = \operatorname{tg} \varphi$;

2) Дахлер: $\frac{q}{kh_0} = \frac{\sin^2 \varphi}{2}$;

3) Казагранде: $\frac{q}{kh_0} = \sin \varphi$.

Проф. А. А. Угинчус показывает, что решение Дахлера преуменьшает пропускную способность низового клина, поэтому целесообразно его не рассматривать, а сопоставить лишь решения Павловского и

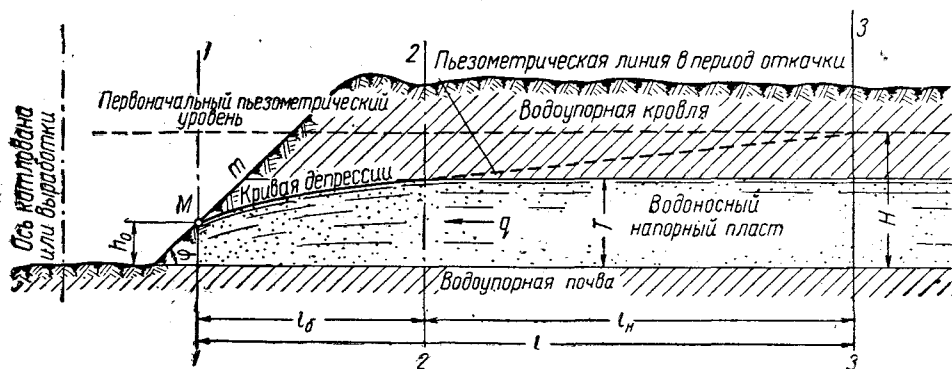


Рис. 2.

Казагранде, для чего, как видно из соответствующих решений, для наиболее часто встречающихся откосов котлованов следует сравнить $\operatorname{tg} \varphi$ и $\sin \varphi$.

Коэффициент откоса $m = \operatorname{ctg} \varphi$	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	$\sin \varphi$
2,0	26°30'	0,4986	0,4462
2,5	21°50'	0,4006	0,3719
3,0	18°25'	0,3330	0,3161
3,5	16°	0,2867	0,2756
4,0	14°	0,2493	0,2419

Данные приведенной таблицы дают основание полагать, что в рассматриваемом случае, учитывая возможную приближенность расчета, величины расходов по обоим методам практически приводят к одинаковым или весьма близким результатам. Фильтрационный расход, вычисленный по методу Павловского, должен быть несколько большим по сравнению с методом Казагранде (что, очевидно, идет в запас расчета); поэтому останавливаемся на решении Павловского и принимаем соответственно:

$$q = kh_0 \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

или, учитывая, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi} = m,$$

получаем окончательное выражение единичного расхода на первом участке:

$$q = \frac{k}{m} h_0. \quad (4)$$

На втором участке, между сечениями 1—1 и 2—2, происходит неравномерное движение в условиях горизонтального водоупора. При этом минимальная глубина грунтового потока в сечении 1—1 равна h_0 , максимальная в сечении 2—2, на границе между участками безнапорного и напорного движения равна T — мощности водоносного пласта. Поэтому в соответствии с известными формулами можно написать:

$$q = k \frac{T^2 - h_0^2}{2l_6}. \quad (5)$$

На третьем участке, между сечениями 2—2 и 3—3, происходит напорное движение в условиях постоянной мощности пласта T на протяжении l_n . Если отсчитывать пьезометрические напоры от отметки водоупора, то минимальным значением пьезометрического напора на этом участке будет T , а максимальным — H . Следовательно, фильтрационный расход на этом участке в соответствии с известными формулами выразится:

$$q = kT \frac{H - T}{l_n} \quad (6)$$

или, учитывая, что по формуле (2) $l_n = l - l_6$, получим:

$$q = kT \frac{H - T}{l - l_6}. \quad (7)$$

Таким образом, имеем три уравнения (4), (5) и (7) с тремя неизвестными q , h_0 и l_6 . Задача сводится к решению этих уравнений, т. е. к определению q ¹.

Пользуясь методом, изложенным в нашей работе [3], определим для этого предварительно из выражений (5) и (7) l_6 .

Из формулы (5) получим:

$$l_6 = \frac{k}{2q} (T^2 - h_0^2). \quad (8)$$

Определим l_6 из выражения (7):

$$l_6 = l - \frac{kT}{q} (H - T). \quad (9)$$

Приравнявая уравнения (8) и (9), исключаем из них величину l_6 и после преобразований получим:

$$q = \frac{k}{l} \left[TH - \frac{T^2}{2} - \frac{h_0^2}{2} \right]. \quad (10)$$

¹ В формулах (5) и (7) величину l_6 можно заменить через l_n ; принципиального значения это не имеет и, очевидно, при решении уравнений получается тот же результат.

Теперь, приравнявая выражения (10) и (4), мы имеем возможность исключить из рассмотрения q и после элементарных преобразований находим:

$$h_0^2 + 2 \frac{l}{m} h_0 + T^2 - 2TH = 0. \quad (11)$$

Решая это уравнение относительно h_0 , получим:

$$h_0 = \sqrt{\left(\frac{l}{m}\right)^2 + 2TH - T^2} - \frac{l}{m}. \quad (12)$$

Для определения искомой величины притока в котлован на единицу его длины q , очевидно, достаточно подставить значение h_0 по формуле (12) в уравнение (4). При этом окончательно устанавливаем следующее:

$$q = \frac{k}{m} \left[\sqrt{\left(\frac{l}{m}\right)^2 + 2TH - T^2} - \frac{l}{m} \right]. \quad (13)$$

Этой формулой и можно пользоваться при определении полного притока Q согласно выражению (1) (в разделе 4 приводится пример соответствующего подсчета).

3. О притоке в котлованы других форм

Приток q на единицу длины котлована, определенный по формуле (13), будет тем точнее, чем ширина котлована a будет меньше его длины b . При менее вытянутых формах прямоугольника можно приближенно, в качестве расчетной модели, заменить полигональный периметр котлована равновеликим ему периметром кругового очертания. Так, например, на рис. 3 показан квадратный котлован с периметром $L = 4a$ со стороной квадрата a . Расчетная модель котлована приведена на рис. 4. Форма такого котлована круглая, радиус его основания R_0 :

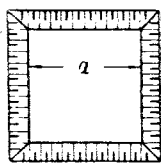


Рис. 3.

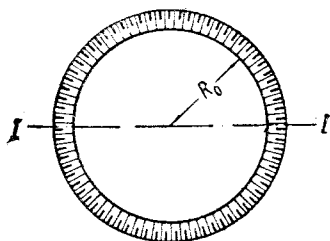


Рис. 4.

$$R_0 = \frac{L}{2\pi} = \frac{2a}{\pi}. \quad (14)$$

Приток к такому котловану происходит по радиусам, подобно притоку к грунтово-артезианскому колодцу.

На рис. 5 представлен поперечный разрез $I-I$, сделанный через центр котлована (рис. 4). Как видно на разрезе, физическая картина притока аналогична показанной на рис. 2, относящейся к котловану траншейного типа.

Действительно, рассматривая приток в условиях открытия котлована до водоупора, устанавливаем те же три характерных участка. При этом первый участок расположен от точки M выхода кривой депрессии на откос в сечении $I-I$ до подошвы откоса; второй участок, расположенный между сечениями $I-I$ и $2-2$, характеризуется безнапорным движением; наконец, третий участок, на котором происходит напорное движение, расположен между сечениями $2-2$ и $3-3$.

Следует отметить, что за величину R_0 принято для упрощен расчета расстояние от центра котлована до сечения 1—1—точ выхода кривой депрессии на откос. Обозначим расстояние от цент котлована до сечения 2—2 через R_r , радиус влияния котлована через R . Очевидно, величина R аналогична значению l для котлованов тра шейного типа.

На первом участке, в сечении 1—1, приток q на единицу длин поперечного сечения может быть определен по формуле (4), а полн приток в этом сечении будет:

$$Q = 2\pi R_0 q \quad (1)$$

или

$$Q = \frac{2\pi R_0 h_0 k}{m} \quad (1)$$

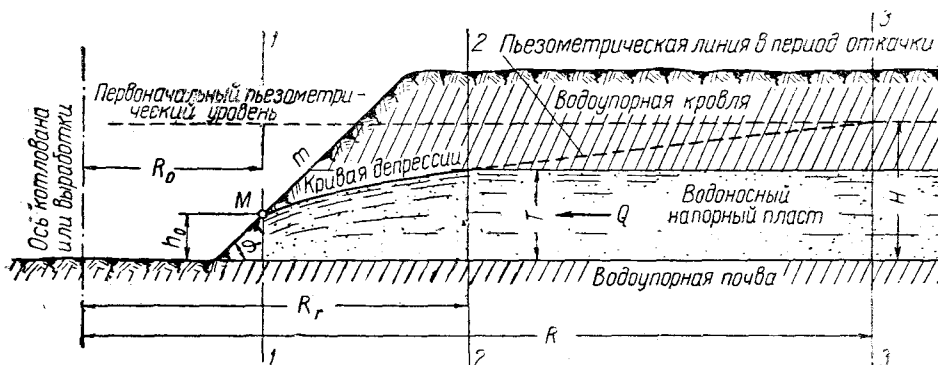


Рис. 5.

На втором участке, между сечениями 1—1 и 2—2, приток может быть установлен по известной формуле грунтового колодца:

$$Q = \pi k \frac{T^2 - h_0^2}{\ln \frac{R_r}{R_0}} \quad (17)$$

Наконец, на третьем участке, между сечениями 2—2 и 3—3, приток определяем по формуле артезианского колодца:

$$Q = 2\pi k T \frac{H - T}{\ln \frac{R}{R_r}} \quad (18)$$

Исключая при совместном рассмотрении выражений (17) и (18) $\ln R_r$, найдем:

$$\frac{Q}{\pi k} = \frac{2TH - T^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{R_0}} \quad (19)$$

Вместе с тем из уравнения (16) следует:

$$\frac{Q}{\pi k} = \frac{2R_0 h_0}{m} \quad (20)$$

Приравнивая формулы (19) и (20), получаем:

$$\frac{2R_0 h_0}{m} = \frac{2TH - T^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{R_0}}, \quad (21)$$

откуда

$$h_0^2 + \frac{2R_0}{m} \ln \frac{R}{R_0} h_0 + T^2 - 2TH = 0. \quad (22)$$

Решая это уравнение относительно h_0 и отбрасывая отрицательное значение корня, находим ординату выхода кривой депрессии на откос котлована:

$$h_0 = \sqrt{\left(\frac{R_0}{m} \ln \frac{R}{R_0}\right)^2 + 2TH - T^2} - \frac{R_0}{m} \ln \frac{R}{R_0} \quad (23)$$

или, переходя от натуральных логарифмов к десятичным,

$$h_0 = \sqrt{5,29 \left(\frac{R_0}{m} \lg \frac{R}{R_0}\right)^2 + 2TH - T^2} - \frac{2,3R_0}{m} \lg \frac{R}{R_0}. \quad (24)$$

Подставляя это значение h_0 в формулу (16), находим искомое выражение для притока в котлован:

$$Q = 6,28 \frac{R_0 k}{m} \left[\sqrt{5,29 \left(\frac{R_0}{m} \lg \frac{R}{R_0}\right)^2 + 2TH - T^2} - 2,3 \frac{R_0}{m} \lg \frac{R}{R_0} \right]. \quad (25)$$

4. Примеры расчета и выводы

Пример 1. Рассмотрим приток на единицу длины в котлован траншейного типа, характеризующийся следующими данными (рис. 2): откос котлована определяется коэффициентом $m = 1,75$, мощность водоносного слоя $T = 5,4$ м; первоначальный пьезометрический уровень $H = 7,6$ м; коэффициент фильтрации водоносного пласта $k = 70$ м/сутки; длина распространения влияния котлована, по гидрогеологическим данным, $l = 350$ м. Размеры котлована (рис. 1): длина $b = 100$ м, ширина $a = 8$ м.

Полный периметр $L = 2(a + b) = 2 \cdot 108 = 216$ м. Приток на единицу длины определяем по формуле (13):

$$q = \frac{70}{1,75} \left[\sqrt{\frac{350^2}{1,75} + 2 \cdot 5,4 \cdot 7,6 - 5,4^2} - \frac{350}{1,75} \right] = 5,2 \text{ м}^3/\text{сутки}$$

на 1 пог. м периметра котлована.

Полный приток

$$Q = qL = 5,2 \cdot 216 = 1120 \text{ м}^3/\text{сутки} \cong 47 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Пример 2. Пусть проектируемый котлован характеризуется следующими данными: форма котлована — квадратная, сторона его $a = 70$ м; полный периметр $L = 4 \cdot 70 = 280$ м; радиус R_0 эквивалентного котлована расчетной модели по формуле (14) будет:

$$R_0 = \frac{L}{2\pi} = \frac{280}{6,28} = 44,5 \text{ м.}$$

Пусть (рис. 5) пьезометрический напор $H = 16,0$ м; мощность водоносного артезианского пласта $T = 10,0$ м; коэффициент фильтрации грунта $k = 9$ м/сутки. Радиус влияния котлована, определяемый либо путем предварительных гидрогеологических исследований, либо с помощью экспериментальных формул, установлен в размере $R = 460$ м. Заметим попутно, что ошибка в определении радиуса влияния R мало сказывается на конечных результатах, поскольку в уравнение (25) радиус влияния входит под знак логарифма. Наконец, укажем, что коэффициент откоса котлована $m = 2$.

Подставляя эти данные в формулу (25), находим:

$$Q = 6,26 \frac{44,5 \cdot 9,0}{2} \left[\sqrt{5,29 \frac{44,5}{2} \cdot \frac{460^2}{44,5} + 2 \cdot 10 \cdot 16 - 10^2} - 2,3 \frac{44,5}{2} \lg \frac{460}{44,5} \right] = 2520 \text{ м}^3/\text{сутки} = 105 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Приведенный метод расчета притока в котлован и горные выработки, как указывалось выше, является по сравнению, например, с методами гидромеханическими — приближенным. Однако для определения водоотливных средств он может быть признан достаточно точным.

Этот метод может быть применен при установлении водопритока напорных вод в открытый карьер или в штрек, заложенный на водопоре. В этом случае, по данным М. В. Сыроватко [4], величины соответствующих фильтрационных расходов иногда выражаются весьма схематически и приближенно.

Изложенный метод был применен при проектировании организации и производства работ по строительству одной из гидростанций.

Поступило

15 июня 1951 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский Н. Н., О фильтрации воды через земляные плотины. Известия сектора гидротехники и гидротехнических сооружений Института мелиорации и гидротехники ВАСХНИЛ, 1931, вып. XXIV.
 2. Угинчус А. А., Фильтрация через земляные плотины. Стройиздат Наркомстроя, 1939.
 3. Давидович В. И., Об одном случае фильтрации в артезианском пласте, Труды лаборатории гидрогеологических проблем имени акад. Ф. П. Саваренского, АН СССР, 1948, т. III.
 4. Сыроватко М. В., Методика расчета притоков подземных вод к горным выработкам, Труды Государственного союзного геолого-разведочного треста Среднеазиатской геологической экспедиции, изд. АН УзССР, 1950.
-