

551.49

К-59

УКРАЇНСЬКА АКАДЕМІЯ НАУК
ТРУДИ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЇ, ВИП. VII

UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES
MEMOIRS OF THE INSTITUTE OF GEOLOGY, ISSUE VII

В. С. КОЗЛОВ
кандидат наук, доцент

**ВИЗНАЧЕННЯ ВОДОПРОНИКНОСТІ ПОРІД
ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПОЛЬОВИХ
ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

РОЗРАХУНКОВІ ФОРМУЛИ

V. S. KOSLOV
Candidate of Sciences, Lecturer

**DETERMINATION OF THE WATER
PERMEABILITY OF ROCKS DURING
FIELD HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS**

CALCULATION FORMULAS

ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОЇ АКАДЕМІЇ НАУК
КИЇВ — 1935

2243

MEMOIRS OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES
SERIALS

U. S. GEOLOGICAL SURVEY

WASHINGTON, D. C.

DETERMINATION OF THE
PERMEABILITY OF ROCKS
DURING FIELD HYDROLOGICAL
WORKS

CALCULATION FORMULAS

BY
W. H. DUNN

NUMBER 10 OF THE FIRST SERIES
1910

UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES
MEMOIRS OF THE INSTITUTE OF GEOLOGY, ISSUE VII

V. S. KOSLOV
candidate of Sciences, lecturer

DETERMINATION OF THE WATER
PERMEABILITY OF ROCKS
DURING FIELD HYDROGEOLOGICAL
I N V E S T I G A T I O N S

CALCULATION FORMULAS

EDITED BY M. G. VITKALSKIY, MEMBER OF THE ACADEMY

PUBLISHING OFFICE OF THE UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES
KYIW — 1935

П

В. С. КОЗЛОВ
кандидат наук, доцент

проверено
1966 г.

ВИЗНАЧЕННЯ
ВОДОПРОНИКНОСТІ ПОРІД
ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПОЛЬОВИХ
ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

РОЗРАХУНКОВІ ФОРМУЛИ

2943
Гідрогеологія

✓

W

✓

○

Бібліографічний опис цього видання ввійшло в „Довідник українського друку“, „Харківському репертуарі“ та інших періодичних Українській книжкової справи.

Відп. редактор-акад. *М. С. Козловський*
Літредактор *Б. Козловський*
Учений коректор *І. Коган*
Техкер *Є. Каганов*

Друкується з розпорядження Української Академії Наук.
Неодмінний секретар УАН акад. *О. В. Палладін*.

Передмова

Щоб визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту при обробленні польових гідрогеологічних досліджень, треба обрати методи визначення і розрахункові залежності. Обираючи той чи інший метод або розрахункову формулу, доводиться натрапляти на серйозні труднощі, бо методи ці дуже різноманітні. Треба сказати, що систематизованого матеріалу з цього питання немає, і технічному персоналові (гідрогеологам та гідротехнікам) доводиться користуватись розрізненими літературними джерелами, які часто одне одному суперечать. Відшукування відповідної літератури, її розгляд, вибір потрібних розрахункових формул і уніфікація розмірностей — робота досить забарна. Трапляється, що ця робота не дає потрібних наслідків і виявляється, що підрахунки невірні, бо під час камерального оброблення не були взяті на увагу ті або інші особливості умов експериментальних досліджень. Ця робота ставить своїм завданням зібрати і систематизувати розрахункові формули для більшості тих випадків практики, з якими найчастіше доводиться мати справу робітникам дослідницьких партій. *Для цього авторові довелося відповідно добрати розрахункові формули з російської та іноземної літератури, в основному — ті, які до певної міри витримують критику, а також і вивести цілий ряд формул для різних випадків практики.*

При групуванні формул прийнята певна класифікація одиничних колодязів. Колодязі можна поділити на ґрунтові, артезіанські та ґрунтово-артезіанські.

Під терміном „ґрунтові колодязі“ звичайно розуміють такі колодязі, рух води до яких відбуватиметься при наявності вільної поверхні, тобто кривої депресії. Протилежно до цих колодязів будемо розрізняти артезіанські, або так звані (за старою термінологією) напірні колодязі. Рух вод до таких колодязів відбувається у водоносному шарі, що лежить між двома водонепроникними верствами, де вода перебуває під гідростатичним тиском, утворюючи криву піезометричних напорів.

Якщо рівень води в артезіанському колодязі при відкачуванні буде нижчий, ніж верхня водотривка верства, то можливе існування обох видів руху рідини, з вільною і невольною поверхнею; такий колодязь зветься ґрунтово-артезіанським.

Ґрунтові, артезіанські та ґрунтово-артезіанські колодязі таксамо можна поділити на „досконалі“ і „недосконалі“, залежно від глибини колодязя у проникному шарі і розміщення його фільтруючих частин.

„Досконалыми“, або „повними“, звать колодязі, опущені до водонепроникної верстви, яка підстелює ґрунтовий потік і стінки якої по всій висоті в ґрунтовому потоці є проникні для води.

„Недосконалыми“, або „неповними“, колодязями звать такі, в яких дно не доходить до водонепроникної верстви, що підстелює водоносний шар; стінки такого колодязя можуть бути проникні для води або повністю, або частково по глибині колодязя. Живитись колодязь може крізь дно і стінки, або тільки крізь дно, або тільки крізь стінки.

За характером живлення колодязі можна поділити на водовіддаючі і водопоглинаючі.

Водовіддаючими звать такі колодязі, в які, коли з них відкачують воду, надходить вода з водоносного шару. Водопоглинаючими, або абсорбуючими, називають такі колодязі, які віддають наливану в них з поверхні воду водоносному шарові.

Залежно від фільтраційних особливостей перерахованих видів колодязів методи їх розрахунку будуть різні.

Користуючись рівняннями, слід мати на увазі, що в цій роботі всюди дано зведений коефіцієнт фільтрації ґрунту — K . Якщо бажано перейти до дійсного коефіцієнта фільтрації K_p (віднесеного до пор ґрунту), треба зведений коефіцієнт фільтрації поділити на активну пористість ґрунту

$$p, \text{ тобто } K_p = \frac{K}{p}.$$

Розмірність величин при користуванні рівнянням повинна бути прийнята однорідною, наприклад, K — см/сек , Q — $\text{см}^3/\text{сек}$, t — сек ; H , h , S , r_0 , R та ін. в см або всі величини в м/сек , $\text{м}^3/\text{сек}$ та м . Якщо не додержувати в рівняннях однорідної розмірності, правильність користування ними порушується.

Слід мати також на увазі, що в рівняннях фігурує натуральний логарифм чисел — $\ln N$; користуючись логарифмічною лінійкою або даними таблиць логарифмів, де даються десяткові логарифми, логарифм взятого числа треба помножити на модуль 2,3 (точніше 2,303), бо $\ln N = 2,3 \lg N$.

1. Грунтові колодязі

§ 1. Досконалі ґрунтові колодязі

Для визначення коефіцієнта проникності водоносних порід колодязями, що доходять до водонепроникних верств, можна скористатися формулами Дююї-Тіма, Смеркера і Шезі, залежно від пористості породи.

1) При фільтрації води в пористих ґрунтах (піщаних, піщано-глинистих) користуються формулою Дююї-Тіма:

а) У випадку водовіддаючого колодязя цю формулу одержують з диференціального рівняння:

$$Q = \omega V = K\omega l = 2\pi Krz \frac{dz}{dr},$$

де:

$\omega = 2\pi rz$ — фільтруюча поверхня;

$V = K \frac{dz}{dr}$ — середня швидкість фільтрації за Дююї.

Відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від r_1 до r_2 і z — в границях від h_1 до h_2 :

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi K \int_{h_1}^{h_2} z dz.$$

Маємо:

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = \pi K (h_2^2 - h_1^2).$$

Звідси

$$K = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi (h_2 + h_1)(h_2 - h_1)}, \quad (1)$$

де:

h_1 і h_2 — висота рівня води в контрольних свердловинах;

r_1 і r_2 — віддаль їх від осі колодязя.

З цієї формули визначаємо зведений коефіцієнт фільтрації, спостерігаючи рівень по двох контрольних свердловинах.

Коли спостерігають по одній контрольній свердловині і колодязю, то в попередній формулі треба покласти:

$$r_1 = r_0 \text{ і } r_2 = r_1; \quad h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1,$$

де:

h_0 — глибина води в колодязі;

r_0 — радіус колодязя.

При граничних значеннях, коли

$$r_1 = r_0, r_2 = R, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = H,$$

формула (1) набере вигляду:

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{(H^2 - h_0^2)}, \quad (1a)$$

де:

R — границя діяння колодязя;

H — глибина водоносного шару.

б) Для водопоглинаючого колодязя розрахункове рівняння дістанемо з диференціального рівняння:

$$Q = K\omega I = -2\pi Krz \frac{dz}{dr}.$$

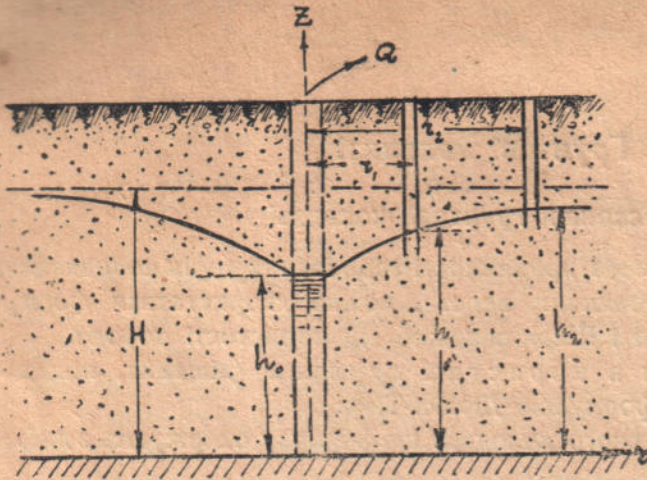


Рис. 1.

Відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від r_1 до r_2 і z — в границях від h_1 до h_2 :

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi K \int_{h_1}^{h_2} z dz.$$

Маємо:

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = -\pi K (h_2^2 - h_1^2).$$

Звідси:

$$K = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi (h_1^2 - h_2^2)} = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi (h_1 + h_2) (h_1 - h_2)}. \quad (2)$$

З цієї формули визначаємо коефіцієнт фільтрації, спостерігаючи знижений рівень по двох контрольних свердловинах.

Якщо замірюють рівні по одній контрольній свердловині і колодязі, то в попередньому рівнянні треба покласти:

$$r_1 = r_0, r_2 = r_1, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1$$

2) При фільтрації води в породах з чималою шпаруватістю (гравелистих, крупнопіщаних) розрахунок провадять за формулою Смеркера.

а) Для водовіддаючого колодязя це рівняння дістаємо з диференціального рівняння:

$$Q = K\omega I^{\frac{1}{m}} = 2\pi rz \left(\frac{I}{C} \right)^{\frac{1}{m}} = 2\pi rz \left(\frac{dz}{dr} \right)^{\frac{1}{m}}$$

де

$K = \left(\frac{1}{C} \right)^{\frac{1}{m}}$. Тут m — показник степеня, який указує, що між швидкістю

й ухилом є нелінійна пропорціональна залежність.

Підносимо обидві частини рівності до степеня m , відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від довільного r до ∞ (бо радіус діяння колодязя дуже великий, порівнюючи з віддалю r до контрольної свердловини) і z — в границях від довільного z до H :

$$Q^m \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^m} = \frac{(2\pi)^m}{C} \int_z^H z^m dz.$$

Одержимо:

$$\frac{Q}{m-1} \cdot \frac{1}{r^{m-1}} = \frac{(2\pi)^m}{C} \frac{(H^{m+1} - z^{m+1})}{m+1}.$$

Звідси

$$C = \frac{m-1}{m+1} (2\pi)^m \cdot \frac{H^{m+1} - z^{m+1}}{Q^m} \cdot r^{m-1}. \quad (3)$$

Визначити коефіцієнт C з цього рівняння не можливо, бо в ньому два невідомі C і m .

Для визначення цих коефіцієнтів треба провести щонайменше два відкачування Q_1 і Q_2 при двох зниженнях $z = h_1$ і $z = h_2$.

В цьому випадку з останнього рівняння можна написати два вирази для коефіцієнта C .

Припускаючи, що їх значення різняться між собою дуже мало, порівнюємо їх і, скорочуючи в обох частинах рівняння однакові члени, одержуємо:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^m = \frac{H^{m+1} - h_1^{m+1}}{H^{m+1} - h_2^{m+1}}. \quad (4)$$

В цьому рівнянні єдиним невідомим є величина m , яку можна звідси визначити. А через те, що рівняння (4) розв'язати в явному вигляді відносно m не можна, то, щоб знайти m , застосовують графічний метод розв'язування, бо аналітичний метод добору дуже складний.

Позначаючи через $f(m)$ ліву частину останнього рівняння $\left[f(m) = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^m \right]$, а через $\varphi(m)$ праву частину $\left[\varphi(m) = \frac{H^{m+1} - h_1^{m+1}}{H^{m+1} - h_2^{m+1}} \right]$, задаємося значеннями $m = 1; 1,25; 1,5; 1,75$ і $2,0$ і будуємо криві $f(m)$

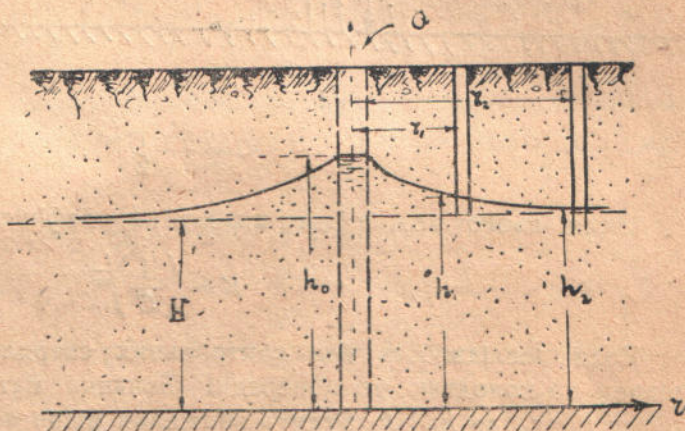


Рис. 2.

та $\varphi(m)$, відкладаючи числове значення цих функцій по осі абсцис, а значення m по осі ординат.

Точка перетину цих кривих, спроектована на осі ординат, очевидно, і дасть шукане значення m , при якому обидві частини останнього рівняння будуть тотожні.

Знайшовши значення коефіцієнта m , можна обчислити значення коефі-

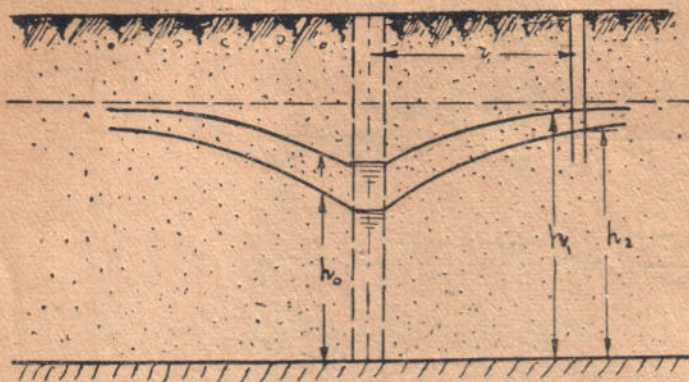


Рис. 3.

цієнта C з рівняння (3) при даному зниженні $z = h_1$ і відкачуванні Q_1 .

Користуючись рівнянням (3), можна визначити для C два значення C_1 і C_2 з даних двох відкачувань, де $z = z_1$ і $Q = Q_1$, а також $z = z_2$ і $Q = Q_2$, а потім взяти середнє C :

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2}.$$

Після цього можна вже визначити коефіцієнт фільтрації K , а саме:

$$K = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (5)$$

Коли досліджують без контрольних свердловин і спостерігають за рівнем по колодязю, то попередні рівняння матимуть місце при заміні в них $r = r_0$, де h_1 і h_2 будуть зниження рівня води в колодязі.

б) Для водопоглинаючого колодязя дослідження аналогічні. Виходять з диференціального рівняння:

$$Q = K\omega l = 2\pi r z \left(\frac{l}{C}\right)^{\frac{1}{m}} = 2\pi r z \left(\frac{-dz}{C}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

Підносячи обидві частини рівняння до степеня m і поділяючи змінні, інтегрують рівняння r в границях від r до ∞ і z — в границях від z до H :

$$Q^m \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^m} = -\frac{(2\pi)^m}{C} \int_z^H z^m dz,$$

звідки визначають вираз для C :

$$C = \frac{m-1}{m+1} (2\pi)^m \cdot \frac{z^{m+1} - H^{m+1}}{Q^m} \cdot r^{m-1}. \quad (6)$$

Для визначення числових величин m і C треба мати не менше двох відкачувань, і тоді з попереднього можна написати рівняння:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^m = \frac{h_1^{m+1} - H^{m+1}}{h_2^{m+1} - H^{m+1}} \quad (7)$$

Розв'язуючи це рівняння графічно (як і в попередньому випадку), знайдемо m . Коефіцієнт C визначаємо з виразу (6) для $Q = Q_1$ і $z = h_1$ та $Q = Q_2$ і $z = h_2$, які підставляємо в формулу для K .

Все сказане про водовіддаючий колодязь справедливе і для колодязя водопоглинаючого.

3) Для тріщинуватих порід користуються формулою Шезі.

а) У випадку водовіддаючого колодязя виходять з такого диференціального рівняння:

$$Q = K\omega \sqrt{T} = 2\pi Krz \left(\frac{dz}{dr}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

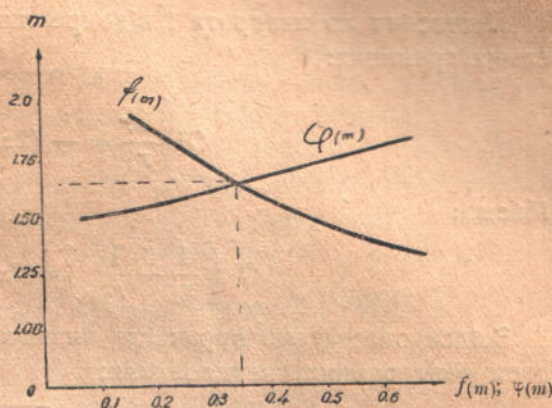


Рис. 4.

Підносячи обидві частини рівняння до квадрата, відокремлюючи змінні й інтегруючи r в границях від r_1 до r_2 і z — в границях від h_1 до h_2 , маємо:

$$Q^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = (2\pi K)^2 \int_{h_1}^{h_2} z^2 dz,$$

звідки одержимо:

$$Q^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (2\pi K)^2 \cdot \frac{h_2^3 - h_1^3}{3}.$$

Звідси для визначення коефіцієнта проникності по двох контрольних свердловинах маємо:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{h_2^3 - h_1^3}}, \quad (8)$$

Визначаючи коефіцієнт фільтрації по колодязю і одній контрольній свердловині, треба в рівнянні (8) покласти:

$$r_1 = r_0; r_2 = r_1; h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1.$$

Якщо контрольних свердловин немає, то в формулі (8) треба покласти:

$$r_1 = r_0; r_2 = R; h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = H.$$

Нехтуючи, крім того, членом $\frac{1}{R}$, як величиною малою проти $\frac{1}{r_0}$, матимемо:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{r_0(H^3 - h_0^3)}}. \quad (9)$$

б) У випадку водопоглинаючого колодязя виходимо з диференціального рівняння:

$$Q = K_{\omega} \sqrt{T} = 2\pi Krz \left(-\frac{dz}{dr} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Підносячи до квадрата і відокремлюючи змінні, інтегруємо вираз в тих самих границях:

$$Q^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = - (2\pi K)^2 \int_{h_1}^{h_2} z^2 dz.$$

Маємо:

$$Q^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (2\pi K)^2 \cdot \frac{h_1^3 - h_2^3}{3}.$$

Звідси одержуємо вираз для визначення коефіцієнта проникності по двох контрольних свердловинах:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{h_1^3 - h_2^3}} \quad (10)$$

Якщо коефіцієнт фільтрації треба визначити з показів рівнів колодязя та однієї контрольної свердловини, то в формулі (10) треба покласти:

$$r_1 = r_0; \quad r_2 = r_1; \quad h_1 = h_0 \quad \text{і} \quad h_2 = h_1.$$

Коли контрольних свердловин немає, то, вважаючи в рівнянні (10)

$$r_1 = r_0, \quad r_2 = R, \quad h_1 = h_0 \quad \text{і} \quad h_2 = H$$

і нехтуючи величиною $\frac{1}{R}$, як малою проти $\frac{1}{r_0}$, маємо аналогічно до (9) рівняння:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{r_0(h_0^3 - H^3)}} \quad (11)$$

§ 2. Недосконалі ґрунтові колодязі

Наведемо формули для визначення коефіцієнта фільтрації при дослідженні з допомогою „недосконалих“ колодязів, тобто таких колодязів, в яких дно не доходить до водонепроникної підстелюючої верстви. Стінки колодязя можуть бути проникні для води по глибині частково або цілком, і живлення такого колодязя може відбуватися або крізь дно та стінки, або тільки крізь дно, або тільки крізь стінки.

При відкачуванні води з „недосконалого“ колодязя прибування води до колодязя відбуватиметься не з усієї товщі водоносної верстви, а в межах деякої глибини шару, яка зветься активним водоносним шаром. Глибину активної зони H_0 можна визначити з таблиці Замаріна, із співвідношення знижень рівня в свердловині S_0 до глибини колодязя у водоносному шарі H_1 .

При $S_0 = 0,2H_1$	$H_0 = 1,3(S_0 + h_0) = 1,3 H_1$
„ $S_0 = 0,3H_1$	$H_0 = 1,5H_1$
„ $S_0 = 0,5H_1$	$H_0 = 1,7H_1$
„ $S_0 = 0,8H_1$	$H_0 = 1,85H_1$

П. І. Шипенко для визначення глибини активного шару дає рівняння, складаючи його на підставі формул Форхгеймера і Дююї. Ці рівняння наведемо нижче, розглянувши спочатку формулу Форхгеймера.

1. Колодязь працює дном і стінками. Для недосконалих колодязів, які працюють крізь дно і стінки, проф. Форхгеймер запропонував емпіричну формулу, що виявляє залежність між величинами досконалого і недосконалого колодязів при умові однакового забору з них води.

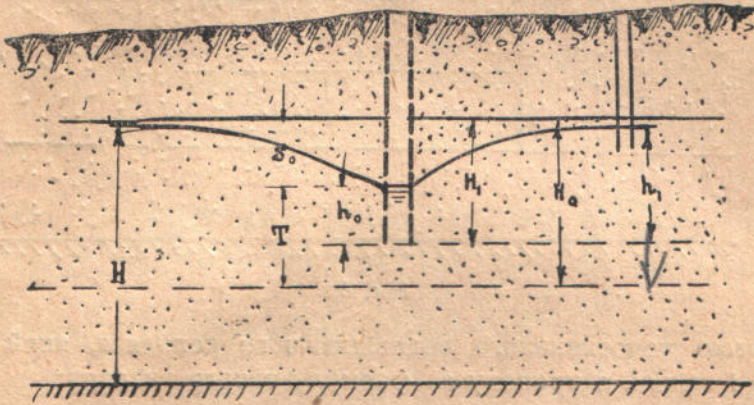


Рис. 5.

При живленні колодязя водою активного водоносного шару формула набере вигляду:

$$\frac{H_0^2 - T^2}{H_0^2 - b_0^2} = \sqrt{\frac{T}{h_0 - 0,5r_0}} \sqrt[4]{\frac{T}{2b_0 - h}}$$

де b_0 — глибина води у відповідному досконалиму колодязі.

Підставляючи замість $H_0^2 - b_0^2$ його значення з формули (11) досконалого колодязя і замінюючи b_0 на T під коренем четвертого степеня, щоб уникнути неявності виразу, дістаємо формулу для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту з допомогою недосконалого водовіддаючого ґрунтового колодязя:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_0^2 - T^2)} \sqrt{\frac{T}{h_0 + 0,5r_0}} \sqrt[4]{\frac{T}{2T - h_0}}, \quad (12)$$

позначення для якої подані на рис. 5.

Застосовуючи цю саму поправку Форхгеймера для водовіддаючого недосконалого колодязя до ґрунтового водопоглинаючого колодязя, можна записати формулу для коефіцієнта фільтрації:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (T^2 - H_0^2)} \sqrt{\frac{T}{h_0 + 0,5 r_0}} \sqrt[4]{\frac{T}{2T - h_0}} \quad (13)$$

При визначенні коефіцієнта фільтрації по одній контрольній свердловині і колодязю треба в формулах (12) і (13) покласти $R = r_1$ та $H_0 = h_1$ де h_1 — глибина води в контрольній свердловині, відлічуючи від площини, проведеної через дно колодязя. *по Уатсону і інш. в кривій зоні*

Крім цього рівняння, Кожені для підрахунку коефіцієнта фільтрації

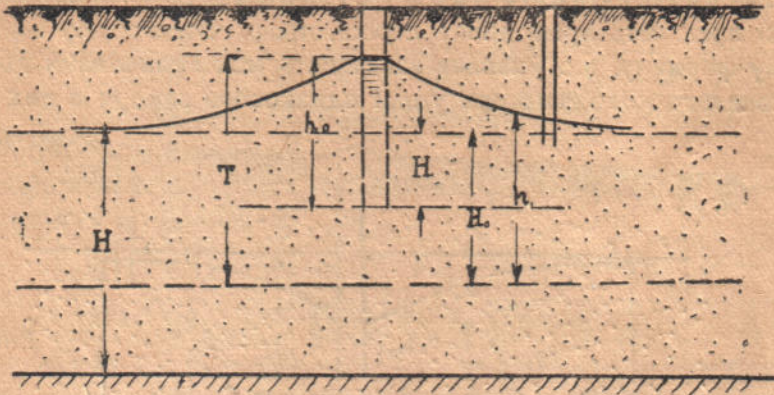


Рис. 6.

з допомогою недосконалого водовіддаючого колодязя, який живиться кризь дно і стінки, запропонував формулу такого вигляду:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_1^2 - h_0^2) \left\{ 1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2H_1}} \xi + \frac{4\xi}{\pi} \cdot \frac{H_1 - h_0}{H + h_0} f(\varepsilon) \right\}}$$

де:

$$f(\varepsilon) = \varepsilon (-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 1});$$

$$\varepsilon = \frac{r_0}{H_1 - h_0} \ln \frac{R}{r_0};$$

$$\xi = \cos \frac{\pi}{2} \frac{H_1}{H};$$

H — грубина водоносного шару;

H_1 — глибина колодязя в водоносному шарі;

h_0 — глибина води в колодязі.

Однак треба сказати, що це рівняння, будши дуже громіздким і потребує великих обчислень, мало придатне для практики.

Крім наведених формул, для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту з допомогою колодязя, який працює стінками і дном, можна (як це і робить Замарін) скласти рівняння при фільтрації кризь стінки з рівняння (1а) і при фільтрації кризь дно — з рівняння (32):

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{\pi K (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} + \frac{2\pi K (H - h_0)}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R}},$$

розв'язуючи яке відносно K , одержуємо:

$$K = \frac{Q}{\frac{\pi (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} + \frac{2\pi (H - h_0)}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R}}},$$

де:

H — глибина колодязя в водоносному шарі;

h_0 — глибина води в колодязі.

Якщо знехтувати членом $\frac{1}{R}$, як величиною малою проти $\frac{1}{r_0}$, то:

$$K = \frac{Q}{\frac{\pi (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} + 2\pi (H - h_0) r_0}. \quad (14)$$

Для плоского дна колодязя з рівнянь (1а) і (40) можна скласти рівняння для визначення коефіцієнта фільтрації:

$$K = \frac{Q}{\frac{\pi (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} + 4 (H - h_0) r_0}. \quad (14a)$$

Для еліптичної форми дна колодязя рівняння (1а) та (42) дають:

$$K = \frac{Q}{\frac{\pi (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} (2 + \pi) (H - h_0) r_0}. \quad (14b)$$

П. І. Шипенко визначає глибину активної зони так.

Вираз для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту недосконалим колодязем Шипенко подає в такому вигляді:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi H_0 S \sqrt{\frac{2T - h_0}{T}} \sqrt{\frac{h_0 + 0,5r_0}{T}}},$$

а рівняння для досконалого колодязя, що доходить до активної зони, подає в такому вигляді:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_0^2 - T^2)}.$$

Припускаючи, що коефіцієнти фільтрації при дослідженні цими коло-

дзяжми будуть рівні, П. І. Шипенко прирівнює ці рівняння і переписує вираз у такій формі:

$$2H_0 \left[1 - \sqrt[4]{\frac{2(H_0 - S) - h_0}{H_0 - S}} \cdot \sqrt[4]{\frac{h_0 + 0,5 r_0}{H_0 - S}} \right] = S,$$

де $T = H_0 - S$.

З цього виразу глибину активного шару визначають способом добору. Підрахунок за методом П. І. Шипенка дає порівнюючи добрі наслідки.

2. Колодязь працює стінками. При живленні недосконалого колодязя крізь стінки задачу щодо визначення активної зони, в межах якої відбувається живлення колодязя водою, треба розв'язувати на підставі попередніх даних. Правда, глибина активної зони для колодязя, що живиться крізь дно і стінки, і колодязя, що живиться крізь стінки, буде різна, але через відсутність будьяких з цього питання емпіричних залежностей доводиться застосовувати співвідношення Е. А. Замаріна або формулу П. І. Шипенка, відкидаючи в ній під коренем член $0,5 r_0$, що враховує живлення крізь дно.

На підставі своїх експериментів Форхгеймер встановив залежність, що подає співвідношення між величинами досконалого і недосконалого водовіддаючих колодязів, які живляться тільки крізь стінки, при умові однакового забору з них води:

$$\frac{H_0^2 - T^2}{H^2 - b_0^2} = \sqrt{\frac{T}{r_0}} \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{2T - h_0}},$$

де b_0 — глибина води у відповідному досконалому колодязі.

Підставляючи замість $H_0^2 - b_0^2$ його значення з формули (1) досконалого колодязя, одержуємо для визначення коефіцієнта фільтрації для колодязя, що живиться крізь стінки таку формулу:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_0^2 - T^2)} \sqrt{\frac{T}{h_0}} \sqrt[4]{\frac{T}{2T - h_0}}. \quad (15)$$

Застосовуючи цю саму поправку Форхгеймера для водовіддаючого недосконалого колодязя до водопоглинаючого, можна написати формулу для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту K :

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (T^2 - H_0^2)} \sqrt{\frac{T}{h_0}} \sqrt[4]{\frac{T}{2T - h_0}}. \quad (16)$$

Коли для визначення коефіцієнта фільтрації спостерігають за рівнем по контрольній свердловині і колодязю, то в формулах (15) і (16) треба покласти:

$$R = r_1 \text{ і } H_0 = h_1.$$

Крім рівняння Форхгеймера для недосконалого колодязя, що живиться крізь стінки, наведемо наближену формулу Кожені, яка тут написана відносно коефіцієнта фільтрації в прийнятих позначеннях:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_1^2 - h_0^2) \left(1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2H_1} \cdot \cos \frac{\pi H_1}{2H}} \right)}, \quad (17)$$

де:

H_1 — глибина від незниженого рівня ґрунтових вод до дна колодязя;
 H — глибина водоносного шару.

Рівняння (17) можна записати в простішому вигляді:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (H_1^2 - h_0^2) A}, \quad (17a)$$

де A являє собою вираз $1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2H_1} \cdot \cos \frac{\pi H_1}{2H}}$, що стоїть у других дужках знаменника.

Застосовуючи цей самий коефіцієнт Кожені, можна для водопоглинаючих колодязів написати рівняння:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (h_0^2 - H_1^2) A}. \quad (18)$$

Щоб полегшити підрахунок, Кожені обчислює коефіцієнт A , який подаємо в такій таблиці:

$\frac{r_0}{H_1} \backslash \frac{H_1}{H}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	2,56	2,54	2,49	2,39	2,26	2,12	1,92	1,71	1,48	1,24	1,0
0,05	2,11	2,09	2,05	1,99	1,895	1,78	1,65	1,50	1,34	1,172	1,0
0,01	1,495	1,489	1,471	1,441	1,401	1,350	1,291	1,225	1,153	1,077	1,0
0,0075	1,431	1,425	1,410	1,384	1,349	1,304	1,253	1,196	1,133	1,067	1,0
0,005	1,351	1,347	1,340	1,313	1,284	1,248	1,206	1,159	1,108	1,055	1,0
0,0025	1,248	1,250	1,235	1,221	1,200	1,175	1,145	1,112	1,077	1,039	1,0
0,001	1,156	1,154	1,149	1,139	1,126	1,112	1,092	1,071	1,048	1,024	1,0
0,0005	1,111	1,109	1,105	1,099	1,090	1,078	1,065	1,050	1,034	1,017	1,0
0,0001	1,05	1,049	1,047	1,044	1,040	1,035	1,029	1,022	1,015	1,008	1,0

У своїх прикладах Кожені активної зони не обчислює і з його матеріалів можна судити, що поширення діяння колодязя на ґрунтовий потік при відкачуванні взято на увагу коефіцієнтом A .

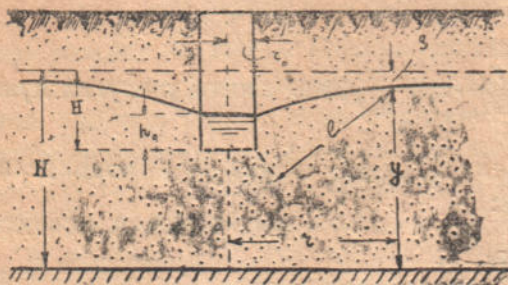
При визначенні коефіцієнта фільтрації на основі спостережень рівнів у колодязі та в контрольній свердловині в рівнянні треба покласти $R = r_1$ і $H_1 = h_1$, а на підставі рівнів у двох контрольних свердловинах:

$$r_0 = r_1, R = r_2, h_0 = h_1 \text{ і } H_1 = h_2.$$

3) Колодязь працює дном. Якщо коефіцієнт фільтрації ґрунту визначають з допомогою колодязя, що працює дном, то жодної з вищевказаних формул для цього випадку застосовувати не можна.

Для колодязя, який живиться крізь дно, при вільному рівні і водоносному шарі обмеженої габрибини Кожені пропонує наближене рівняння, яке у звичайних позначеннях (розв'язане відносно K) буде:

$$K = \frac{Q}{4r_0^2 \cos \frac{\pi H_1}{2H} \left\{ -\ln \frac{R}{r_0} + \sqrt{\left(\ln \frac{R}{r_0}\right)^2 + \left(\frac{H-h_0}{r_0}\right)^2} \right\}}, \quad (19)$$



де:

H — габрибина водоносного шару;

H_1 — габрибина колодязя, заглибленого у водоносний шар;

h_0 — габрибина води в колодязі.

При визначенні K на основі заміряних рівнів у колодязі та в контрольній свердловині у формулі (19) треба покласти:

$$R = r_1 \text{ і } H_1 = h_1,$$

Рис. 7.

де h_1 — габрибина води від горизонту в свердловині до площини, яка проходить крізь дно колодязя.

При визначенні K на підставі замірів рівнів у двох контрольних свердловинах у формулі (19) треба покласти:

$$r_0 = r_1, R = r_2, h_0 = h_1 \text{ і } H_1 = h_2.$$

Форхгеймер для колодязів, що живляться крізь плоске дно, при безмежному водоносному шарі припускає користування рівнянням, виведеним ним для такого самого колодязя при невільному рівні води.

Це рівняння для K має вигляд:

$$K = \frac{Q}{4(H_1 - h_0)r_0} = \frac{Q}{4S_0r_0}. \quad (20)$$

Застосовування цього рівняння не зовсім вірне, бо для потоку з вільною і невільною поверхнею рух рідини (розподіл тисків, швидкостей, їх напрямків) буде різний. Застосовування цієї формули для розгляданого випадку дасть тільки грубо наближене значення коефіцієнта фільтрації.

Форхгеймер пропонує й інше рівняння для визначення коефіцієнта фільтрації, який можна обчислити, експлуатуючи установки.

При відкачуванні (або наливанні) деякої кількості води в ґрунтовому потоці в даний момент часу t_1 можна зафіксувати рівень води в будь-якій точці. Якщо припинити відкачування води або раптово відкачати її дуже багато, то рівень для моменту часу t_2 зміниться. Підраховуючи об'єм води в порах ґрунту в межах цих двох положень кривої депресії (з урахуванням коливань рівня води в колодязі), Форхгеймер виводить

рівняння для визначення проникності з допомогою експлуатації установки. Він виходить з такого рівняння для зниження рівня води в будь якій точці (через громіздкість виводу подаємо його схематично):

$$S = H - y = \frac{Q^2}{2\pi K \sqrt{r^2 + (H_1 - S)^2}}$$

звідки:

$$r^2 + (H_1 - S)^2 = \frac{Q^2}{4\pi^2 K^2 S^2}$$

Об'єм лійки зниження буде $\int \pi r^2 dS$, а саме:

$$\int \left[\frac{Q^2}{4\pi K^2 S^2} - \pi(H_1 - S)^2 \right] dS = -\frac{Q^2}{4\pi K^2 S} + \frac{\pi}{3} (H_1 - S)^3 + C$$

Якщо S_1 та S_2 є зниження горизонту води для моментів часу t_1 та t_2 , то при внутрішньому діаметрі колодязя d , зовнішньому діаметрі D і пористості p рівняння матиме такий вигляд:

$$Q(t_2 - t_1) = \frac{pQ^2}{4\pi K^2} \left(\frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1} \right) - \frac{p\pi}{3} \left[(H_1 - S_2)^3 - (H_1 - S_1)^3 \right] + \frac{\pi}{4} (d^2 + pD^2) (S_1 - S_2)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно K , вираз для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту з допомогою експлуатації установки буде:

$$K = \frac{Q}{2} \sqrt{\frac{p}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1}}{Q(t_2 - t_1) + \frac{p\pi}{3} \left[(H_1 - S_2)^3 - (H_1 - S_1)^3 \right] - \frac{\pi}{4} (d^2 - pD^2) (S_1 - S_2)}}$$

Як показує сама формула, розрахунок по ній досить забарний.

II. Артезіанські колодязі

Артезіанською називають таку воду, яка міститься у водоносному шарі між двома водонепроникними верствами і дає піезометричний рівень, який перевищує геометричну висоту верхньої водонепроникної верстви. Опущений в такий водоносний шар колодязь називають артезіанським, розрізняючи, аналогічно до попереднього, артезіанські колодязі досконалі і недосконалі.

§ 1. Досконалі артезіанські колодязі

Для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту з допомогою досконалого артезіанського колодязя можна скористатися формулами Дюпюї, Сирекера і Шезі залежно від породи, в якій відбувається рух підземної води.

1) При фільтрації води в пористих ґрунтах користуються формулою Дюпюї.

а) Для водовіддаючого колодезя формулу виводять на підставі диференціального рівняння руху води:

$$Q = K\omega I = 2\pi K a r \frac{dz}{dr},$$

де a — глибина волоносної верстви.

Відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від r_1 до r_2 та z — в границях від h_1 до h_2 :

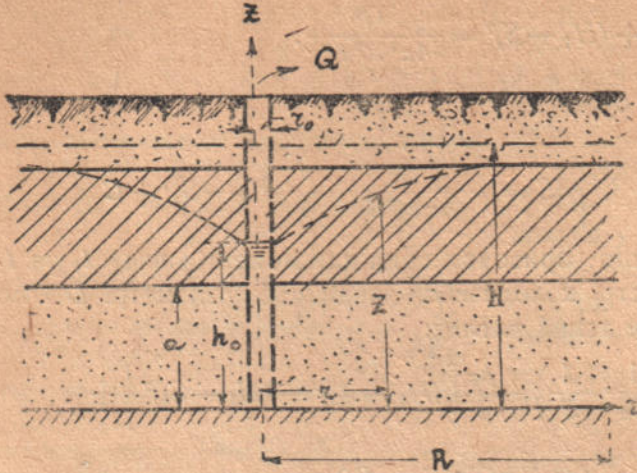


Рис. 8.

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi K a \int_{h_1}^{h_2} dz.$$

Маємо:

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi K a (h_2 - h_1),$$

звідки:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{h_2 - h_1} \quad (21)$$

На основі цього рівняння і визначають кое-

фіцієнт фільтрації ґрунту по двох контрольних свердловинах.

В тому випадку, коли спостерігають за рівнем по одній контрольній свердловині і колодезю, в рівнянні (21) треба покласти:

$$r_1 = r_0, r_2 = r_1, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1.$$

При граничних значеннях, коли $r_1 = r_0$, $r_2 = R$, $h_1 = h_0$ і $h_2 = H$, формула набере вигляду:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \cdot \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{H - h_0}, \quad (21a)$$

де H — піезометрична висота над водонепроникною верствою до відкачування.

б) Для водопоглинаючого колодезя рівняння виводять аналогічно:

$$Q = K\omega I = -2K a r \frac{dz}{dr},$$

де

$$\frac{dz}{dr} < 0.$$

Відокремлюючи змінні й інтегруючи в тих самих границях, маємо:

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi K a (h_1 - h_2).$$

Звідси вираз для K при визначенні по двох контрольних свердловинах буде:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{h_1 - h_2} \quad (22)$$

Порівнюючи формули (21) і (22), бачимо, що в них для водовіддаючого й водопоглинаючого колодязів h_1 та h_2 міняються місцями.

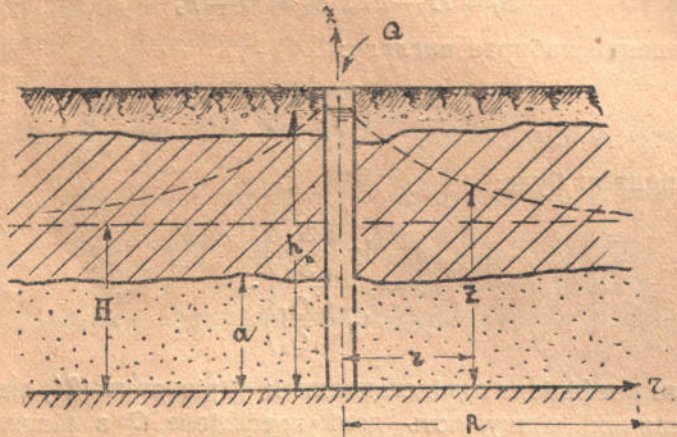


Рис. 9.

2) Якщо рух води відбувається в гравелистих породах і при таких градієнтах, де рівняння Дююї застосовувати не можна, підрахунок коефіцієнта фільтрації треба провадити за формулою Смрекера.

Диференціальне рівняння руху ґрунтової води буде:

$$Q = \omega V = 2\pi r a K l^{\frac{1}{m}} = 2\pi r a \left(\frac{l}{C} \right)^{\frac{1}{m}} = 2\pi r a \left(\frac{1}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{dz}{dr} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Підносимо обидві частини рівняння до степеня m , відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від r до ∞ і z — в границях від z до H :

$$C \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^m} = \left(\frac{2\pi a}{Q} \right)^m \cdot \int_z^H dz.$$

Одержуємо:

$$\frac{C}{(m-1)r^{m-1}} = \left(\frac{2\pi a}{Q} \right)^m (H-z),$$

звідки:

$$C = \left(\frac{2\pi a}{Q} \right)^m (H-z) (m-1) r^{m-1}. \quad (23)$$

Показник степеня m , що входить в це рівняння, визначають таким чином.

З досліджуваного колодязя відкачують або дістають при самовиливанні послідовно два дебїти Q_1 та Q_2 і замірюють відповідно до дебїтів зниження піезометричного рівня. Написавши з виразу (23) для двох

дебітів два рівняння, порівнюють їх між собою, бо C мало змінюється з дебітом:

$$\frac{H-h_1}{H-h_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^m.$$

При

$$S_1 = H - h_1 \text{ і } S_2 = H - h_2$$

попереднє рівняння набирає вигляду:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^m,$$

звідки коефіцієнт m буде:

$$m = \frac{\lg \left(\frac{S_1}{S_2} \right)}{\lg \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)}. \quad (24)$$

Визначивши коефіцієнт m підставленням у рівняння (24) відомих з експерименту величин, відшуковують далі коефіцієнт C з рівняння (23) для двох дебітів і знижень; після цього беруть їх середнє арифметичне:

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2}. \quad (25)$$

Знаючи C , коефіцієнт фільтрації ґрунту знаходять з рівняння:

$$K = \left(\frac{1}{C} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (26)$$

В тому випадку, коли досліджують без контрольних свердловин і спостерігають над рівнем по колодязю, попередні рівняння матимуть місце при заміні в них $r = r_0$, а h_1 та h_2 — зниження рівнів води в колодязі, які відповідають дебітам Q_1 та Q_2 .

3) Для артезіанських вод у тріщинуватих породах підрахунок провадять за формулою Шезі.

а) Для водовіддаючого колодязя диференціальне рівняння руху буде:

$$Q = \omega \cdot V = 2\pi K a r \left(\frac{dz}{dr} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Підносимо обидві частини рівняння до квадрата, відокремлюємо змінні й інтегруємо r в границях від r_1 до r_2 і z — в границях від h_1 до h_2 :

$$\int_{h_1}^{h_2} dz = \left(\frac{Q}{2\pi K a} \right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$

Одержуємо:

$$h_2 - h_1 = \left(\frac{Q}{2\pi K a} \right)^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Звідси зведений коефіцієнт проникності при визначенні по двох контрольних свердловинах буде:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \sqrt{\frac{1}{\frac{r_1}{h_2} - \frac{r_2}{h_1}}} \quad (27)$$

Якщо визначають по одній контрольній свердловині і колодязю, то в рівнянні (26) треба покласти:

$$r_1 = r_0, r_2 = R, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = H.$$

При граничних значеннях, коли $r_1 = r_0$ і $r_2 = R$, рівняння набере вигляду:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \sqrt{\frac{1}{\frac{r_0}{H} - \frac{R}{h_0}}} \quad (27a)$$

Це рівняння можна спростити, нехтуючи членом $\frac{1}{R}$, як величиною малою проти $\frac{1}{r_0}$, і тоді воно набере вигляду:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \sqrt{\frac{1}{r_0(H - h_0)}} \quad (28)$$

б) Для водопоглинаючого колодязя диференціальне рівняння руху буде:

$$Q = -2\pi Kar \left(\frac{dz}{dr} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Цей вираз після піднесення до квадрата, відокремлення змінних та інтегрування в тих самих границях, що і для водовіддаючого колодязя, дасть:

$$K = \frac{Q}{2\pi a} \sqrt{\frac{1}{\frac{r_1}{h_1} - \frac{r_2}{h_2}}} \quad (29)$$

Порівнюючи (27) і (29), бачимо, що формули для водовіддаючого і водопоглинаючого колодязів відрізняються тільки переставленням величин h_1 та h_2 . Всі дальші зауваження щодо водовіддаючого колодязя правдиві і для водопоглинаючого колодязя.

§ 2. Недосконалі артезіанські колодязі

На практиці доводиться дуже часто мати справу з артезіанськими недосконалими колодязями.

1) Насамперед наведемо рівняння для колодязя, що проходить не крізь усю товщу водоносного шару (рис. 10).

Розрахунок таких колодязів, як зазначає Кожені, можна провадити з допомогою точного розв'язання формули течії Муската, яку він запропонував для встановлення розподілу електричного потенціалу в широких циліндричних пластинках при частково проникному електроді. Остаточна формула потоку для практичного застосування, однак, дуже складна.

Кожені пропонує емпіричну формулу, яка дає наслідки, що дуже близько відповідають даним обчислень за Мускатом. Ця формула Кожені для дебіту недосконалого артезіанського колодязя має вигляд:

$$Q = \frac{2\pi K(H_1 - h_0)a_1}{\ln \frac{R}{r_0}} \left(1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2a}} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a}} \cos \frac{\pi a_1}{2a} \right),$$

де:

a — глибина водоносного шару;

a_1 — заглиблення колодязя у водоносний шар;

H_1 — глибина від дна колодязя до незниженої піезометричної висоти;

h_0 — глибина води в недосконалому колодязі.

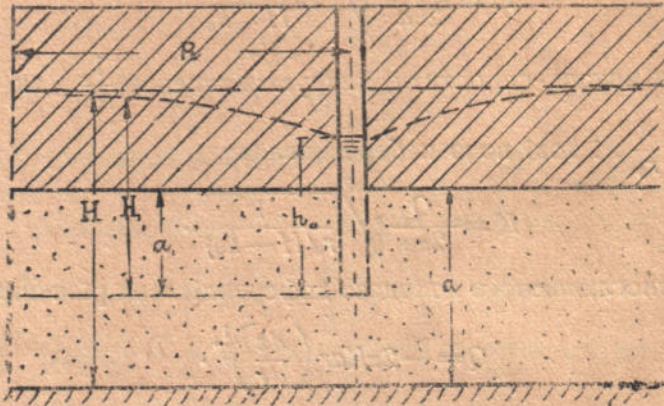


Рис. 10.

Якщо позначити через A член, що стоїть у крайніх дужках:

$$A = 1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2a}} \sqrt{\frac{a_1}{a}} \cos \frac{\pi a_1}{2a}, \quad (30)$$

то для недосконалого колодязя вираз для визначення коефіцієнта фільтрації таких ґрунтів, де можливо застосувати закон Дарсі, можна написати:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi a_1 (H_1 - h_0) A}. \quad (31)$$

При визначенні коефіцієнта фільтрації по двох спостережуваних свердловинах у формулі (31) треба покласти:

$$r_0 = r_1, R = r_2, h_0 = h_1 \text{ і } H_1 = h_2,$$

де h_1 та h_2 вимірюються від площини, проведеної через дно колодязя.

В тому випадку, коли колодязь водопоглинаючий, формула (31) матиме місце при взаємному переставлянні в ній членів H_1 та h_0 .

2) Артезіанський колодязь, який доходить до водоносного шару і працює дном.

Розгляньмо випадок, коли колодязь опущений крізь непроникну

верству і доведений до верху водоносного шару, в якому вода перебуває під гідростатичним тиском.

Живитиметься такий колодязь тільки крізь дно, бо стінки його — у водонепроникній верстві.

Продуктивність такого колодязя при одному й тому зниженні рівня змінюватиметься залежно від окреслення граничної фільтруючої поверхні і зв'язана з найменшим вихідним перекроєм.

Колодязь може мати біля дна сітку, яка перешкоджатиме попаданню в колодязь ґрунту, але її може і не бути. Сітка ця може бути найрізноманітнішої форми: півсферична, еліптична, плоска. Розрахункові формули для цих випадків будуть різні, через що й наведемо їх тут.

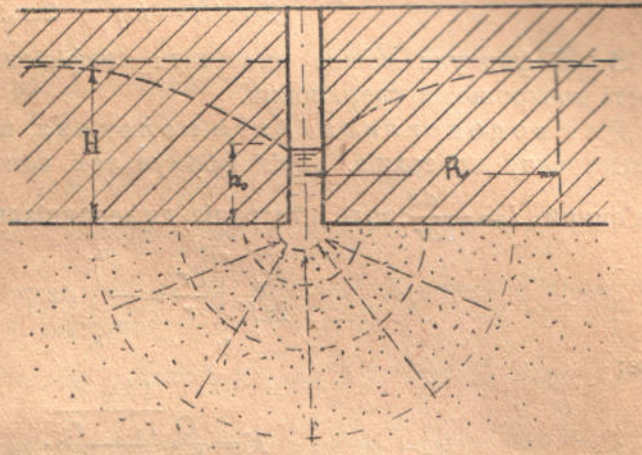


Рис. 11.

а) Якщо водовіддаючий колодязь має півсферичну поверхню фільтруючого дна, то формулу для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту виводять так.

Фільтруюча півсферична поверхня буде:

$$\omega = 2\pi r^2;$$

швидкість фільтрації за Дюпюї:

$$V = K \frac{dz}{dr}.$$

Отже фільтраційна витрата

$$Q = \omega V = 2\pi r^2 \cdot K \frac{dz}{dr}.$$

Відокремлюючи змінні й інтегруючи r в границях від r_1 до r_2 і z — від h_1 до h_2 , одержуємо:

$$\frac{Q}{2\pi K} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \int_{h_1}^{h_2} dz.$$

Після перетворення дістанемо:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \left. \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right|_{h_2 - h_1} \quad (32)$$

З цієї формули визначають коефіцієнт фільтрації по двох спостережених свердловинах. Якщо спостерігають по одній контрольній свердловині і колодязю, то в формулі (32) треба покласти:

$$r_1 = r_0, r_2 = r_1, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1.$$

В граничних позначеннях, якщо в (32) замінити

$$r_1 = r_0, r_2 = R, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = H$$

і якщо знехтувати членом $\frac{1}{R}$, як величиною малою проти $\frac{1}{r_0}$, формула матиме вигляд:

$$K = \frac{Q}{2\pi r_0 (H - h_0)} = \frac{Q}{2\pi r_0 S_0}. \quad (33)$$

З цієї формули можна визначити коефіцієнт фільтрації і при відсутності контрольних свердловин.

Для водопоглинаючого колодязя, що працює дном і має півсферичну поверхню, вивід формул той самий, тільки градієнт буде від'ємний $I = -\frac{dz}{dr}$; тоді інтеграція диференціального рівняння

$$\frac{Q}{2\pi K} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{h_1}^{h_2} dz$$

дає:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}{h_1 - h_2}. \quad (34)$$

Формули (32) і (34) різняться переставленням членів h_1 та h_2 .

В граничних позначеннях, при $r_1 = r_0, r_2 = R, h_1 = h_0$ і $h_2 = H$ та при нехтуванні членом $\frac{1}{R}$, як величиною малою проти $\frac{1}{r_0}$, формула матиме такий вигляд:

$$K = \frac{Q}{2\pi (h_0 - H) r_0} = \frac{Q}{2\pi S_0 r_0}, \quad (35)$$

тобто одержимо те саме рівняння (33).

б) Щоб вивести рівняння для колодязів з півсферичним окресленням дна в гравелистих породах, виходимо з формули Смрекера.

Диференціальне рівняння

$$Q = 2\pi r^2 K \left(\frac{dz}{dr} \right)^m$$

після піднесення до степеня m і відокремлення змінних інтегрується в границях від довільного r до ∞ та від довільного z до H :

$$\left(\frac{Q}{2\pi K} \right)^m \int_r^\infty \frac{dr}{r^{2m}} = \int_z^H dz.$$

Це дає:

$$\left(\frac{Q}{2\pi K} \right)^m \frac{1}{(2m-1)r^{2m-1}} = H - z,$$

звідки

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt[m]{\frac{1}{(2m-1)(H-z)r^{2m-1}}}. \quad (36)$$

Щоб знайти коефіцієнт, потрібно не менш як два відкачування Q_1 та Q_2 , при яких буде зниження $z = h_1$ і $z = h_2$.

Прирівнюючи коефіцієнти K для двох знижень, як ми це робили раніш (за Смеркером), після скорочення співвідношення одержуємо:

$$\frac{H - h_1}{H - h_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^m.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно m і позначаючи $H - h_1 = S_1$ та $H - h_2 = S_2$, одержуємо вираз для визначення m :

$$m = \frac{\lg \left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\lg \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}. \quad (37)$$

Обчисливши m , вираховуємо K_1 та K_2 для двох знижень з формули (36) і потім беремо середнє значення

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2}.$$

У випадку водопоглинаючого колодязя в формулах глибини h_1 і h_2 взаємно міняються місцями.

в) Для тріщинуватих порід коефіцієнт проникності визначається простіше, ніж у попередньому випадку.

Диференціальне рівняння

$$Q = 2\pi r^2 K \left(\frac{dz}{dr}\right)^2$$

інтегрується в границях: r — від r_1 до r_2 та z — від h_1 до h_2 :

$$\left(\frac{Q}{2\pi K}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^4} = \int_{h_1}^{h_2} dz;$$

це дає

$$\left(\frac{Q}{2\pi K}\right)^2 \frac{1}{3} \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}\right) = h_2 - h_1.$$

Звідси одержуємо, спостерігаючи над рівнем по двох контрольних свердловинах, вираз для коефіцієнта проникності:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{3} \frac{1}{h_2 - h_1} \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}\right)}. \quad (38)$$

Для визначення K по одній контрольній свердловині і колодязю в формулі (38) треба покласти:

$$r_1 = r_0, r_2 = r_1, h_1 = h_0 \text{ і } h_2 = h_1.$$

г) Якщо колодязь має плоске фільтруюче дно або взагалі позбавлений сітки в дні, яка не пропускає ґрунту в колодязь, то формули будуть інші. Надходить вода в такий колодязь буде крізь меншу

фільтруючу поверхню, ніж у попередньому випадку; тому і приплив води при одному й тому зниженні буде менший. Теоретично такі колодязі дослідив Форхгеймер. Він установив, що лінії течії будуть гіперболи, уявною віссю яких є вісь колодязя, а їх фокуси збігаються з краями колодязя. Там таки, на краях колодязя, лежать фокуси поверхень рівного тиску, які являють собою поверхні еліпсоїда обертання.

Форхгеймер розглянув випадок, коли можна застосувати закон Дарсі, і показав, що для кожного еліпсоїда зниження висоти піезометричного напору являє собою такий вираз:

$$H - z = \frac{Q}{2\pi K r_0} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{b}{r_0} \right) \frac{Q}{2\pi r_0} \operatorname{arctg} \frac{r_0}{b}, \quad (39)$$

де b означає вертикальну піввісь.

Найбільше зниження напору буде біля стінок колодязя при фільтрації води крізь плоску граничну поверхню. В цьому випадку менша піввісь еліпса дорівнює нулеві, $b = 0$, отже з рівня (39) матимемо:

$$H - h_0 = \frac{Q}{4K r_0},$$

звідки знаходимо вираз для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту:

$$K = \frac{Q}{4(H - h_0)r_0} = \frac{Q}{4S_0 r_0}. \quad (40)$$

Досить інтересно порівняти це рівняння з рівнянням (33), для колодязя з півсферичним дном.

Це останнє рівняння (40) не зміниться і для водопоглинаючого колодязя. Для того щоб написати рівняння для обчислення K по двох точках, треба у попередньому (39) рівнянні замість вертикальної півосі b завести горизонтальну піввісь a меридіанного еліпса, і тоді:

$$H - z = \frac{Q}{2\pi K r_0} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{r_0} \right),$$

або

$$\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{r_0} = \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi K r_0}{Q} (H - z) \right],$$

або

$$\frac{r_0}{a} = \sin \frac{2\pi K r_0}{Q} (H - z).$$

А що більша піввісь a є не що інше, як змінне r , то вираз для коефіцієнта фільтрації при $r = r_1$ і $z = h_1$ буде:

$$K = \frac{Q}{2\pi r_0 (H - h_1)} \operatorname{arcsin} \frac{r_0}{r_1}. \quad (41)$$

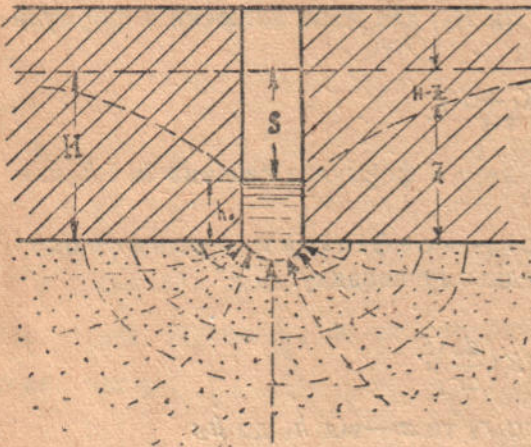


Рис. 12.

д) У тому випадку, коли фільтруюче дно колодязя має еліптичну форму (з фільтруючою поверхнею, середньою приблизно між півсферичною та плоскою), то розрахункову формулу можна написати, взявши середнє значення дебітів з формул (33) та (40); це для коефіцієнта фільтрації дає:

$$K = \frac{Q}{(2 + \pi) r_0 S_0} \quad (42)$$

Звичайно в середніх щодо проникності грунтах відбувається вимивання часточок ґрунту біля дна колодязя, і завдяки цьому утворюється деяка угнута в ґрунт гранична фільтруюча поверхня, що являє собою ніби еліпсоїд обертання.

е) Для колодязя, що працює дном, при граничній глибині водоносного шару (протилежно до попередніх випадків) Тевене дає формулу, виходячи з диференціального рівняння:

$$dQ = 2\pi r K \frac{S_0}{H + 2r} dr;$$

інтегруючи цей вираз для r в границях від 0 до a , Тевене одержав:

$$Q = \pi K r_0 S_0 \ln \left(1 + \frac{2a}{H} \right),$$

звідки значення для коефіцієнта фільтрації буде:

$$K = \frac{Q}{\pi r_0 S_0 \ln \left(1 + \frac{2a}{H} \right)} \quad (43)$$

Хоча вивід рівняння (43) має під собою хитку теоретичну підставу (в частині складеного диференціального рівняння), проте деякі автори вважають, що воно досить добре відбиває дані експерименту і цілком придатне для практичних підрахунків.

ж) Колодязь опущений нижче водонепроникної верстви. Для колодязя, опущеного нижче водонепроникної верстви, який працює дном та стінками (рис. 14), К. І. Добровольський виводить рівняння для пористих і тріщинуватих порід великої глибоки.

Рівняння виведене для водопоглинаючого колодязя, але нижче ми покажемо, як ним користуватися для колодязя водовіддаючого.

Теоретичні дані Добровольського такі. Він припускає, що кожного моменту фільтруюча поверхня має форму, близьку до півеліпсоїда обер-

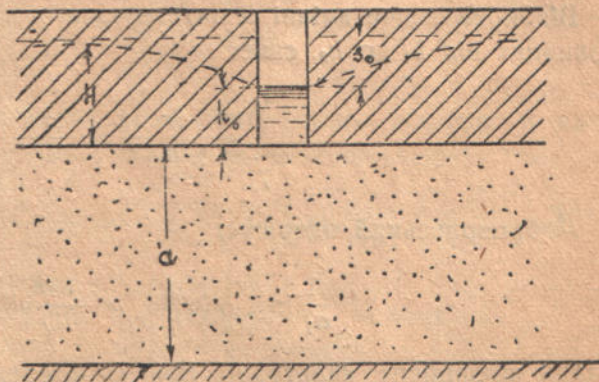


Рис. 13.

тання. Ця поверхня складається з циліндра площею $\omega_1 = 2\pi r a_1$ та півсферичної поверхні $\omega_2 = 2\pi r^2$, тобто

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 = 2\pi r (r + a_1).$$

Дальші висновки базуються на цьому.

а) Для пористого середовища диференціальне рівняння для витрати буде:

$$Q = V\omega = 2\pi K (r + a_1) r \frac{dz}{dr}.$$

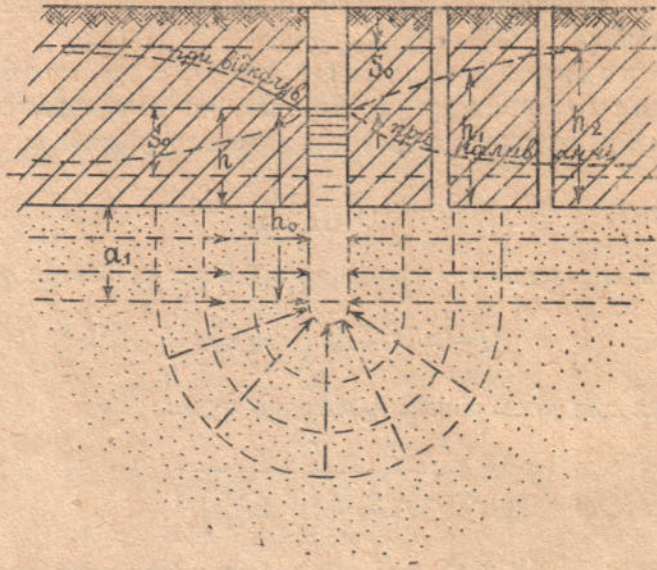


Рис. 14.

Відокремлюючи змінні й інтегруючи r в границях від r_1 до r_2 і z — в границях від h_1 до h_2 , саме:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{(r + a_1)r} = \frac{2\pi K}{Q} \int_{h_1}^{h_2} dz,$$

Добровольський одержує:

$$\frac{1}{a_1} \ln \frac{(r_1 + a_1)r_2}{(r_2 + a_1)r_1} = \frac{2\pi K}{Q} (h_2 - h_1),$$

звідки коефіцієнт фільтрації при спостереженні по двох контрольних свердловинах для водовіддаючого колодязя буде:

$$K = \frac{Q}{2\pi a_1 (h_2 - h_1)} \ln \frac{(r_1 + a_1)r_2}{(r_2 + a_1)r_1}. \quad (44)$$

Для водопоглинаючого колодязя в формулі (44) треба h_2 та h_1 поміняти місцями.

Якщо спостереження над рівнями провадять по одній контрольній свердловині та колодязю, то треба покласти в формулі:

$$h_1 = h, \quad h_2 = h_1, \quad r_1 = r_0 \text{ і } r_2 = r_1.$$

При відсутності контрольних свердловин формула набере вигляду:

$$K = \frac{Q}{2\pi a_1 S_0} \ln \frac{(r_0 + a_1)R}{(R + a_1)r_0}, \quad (44a)$$

де S_0 — різниця рівнів води природного в ґрунті і піезометричного в колодязі.

В такому вигляді формула правдива і для водовіддаючого і для водопоглинаючого колодязів.

Границю діяння R визначають на основі таких міркувань. Якщо Ω являє собою загальну кількість води, яка проходить за весь час експерименту, то об'єм води в порах змоченого ґрунту при такому русі води буде:

$$\frac{2}{3} \pi (R + a_1) R^2 p = \Omega.$$

Розкриваючи дужки і перетворюючи, К. І. Добровольський одержує:

$$R^3 + R^2 a_1 = 0,478 \frac{\Omega}{p},$$

звідки R визначається в кожному окремому випадку при відповідних чисельних значеннях через пробні підставлення, тобто добором.

Визначити коефіцієнт фільтрації з рівняння (44) простіше, ніж з рівняння (44a).

б) Для тріщинуватих порід на підставі тих самих засновків диференціальне рівняння витрати буде:

$$Q = \omega V = 2\pi K (r + a_1) r \sqrt{\frac{dz}{dr}}.$$

Відокремлюючи змінні й інтегруючи в тих самих границях:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{(r + a_1)^2 r^2} = \left(\frac{Q}{2\pi K} \right)^2 \int_{h_1}^{h_2} dz,$$

К. І. Добровольський одержує вираз, розв'язання якого відносно K дає:

$$K = \frac{Q}{2\pi a_1} \sqrt{\frac{S_0}{\frac{2r_2 + a_1}{r_2(r_2 + a_1)} - \frac{2r_1 + a_1}{r_1(r_1 + a_1)} + \frac{2}{a_1} \ln \frac{r_2(r_1 + a_1)}{r_1(r_2 + a_1)}}, \quad (45)$$

де S_0 — різниця рівнів. При цьому:

$S_0 = h_2 - h_1$ — в свердловинах при водовіддаючому колодязі і

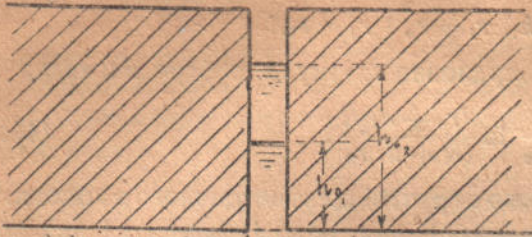
$S_0 = h_1 - h_2$ — „ „ „ водопоглинаючому „

4) Коефіцієнт фільтрації ґрунту може бути визначений на основі відновлення рівня води в колодязі, коли припинити короткочасне відкачування. Форхгеймер наводить такий приклад обчислення для колодязя з плоским дном.

Протягом часу dt в колодязь надійде така кількість води:

$$Q dt = \pi r_0^2 dh_0.$$

Підставляючи замість Q його значення з рівняння (40) і відокремивши змінні, Форхгеймер одержує:



$$dt = \frac{\pi r_0}{4K} \cdot \frac{dh_0}{H - h_0}$$

Для моменту часу t_1 зниження рівня води в колодязі складає:

$$S_{0_1} = H - h_{0_1},$$

а для часу t_2 зниження при відновленні буде:

$$S_{0_2} = H - h_{0_2}.$$

Рис. 15.

Інтегруючи останнє рівняння в зазначених границях,

Форхгеймер одержує вираз для коефіцієнта фільтрації K :

$$K = \frac{\pi r_0}{4(t_2 - t_1)} \ln \frac{H - h_{0_1}}{H - h_{0_2}}. \quad (46)$$

Тут $t_2 - t_1$ є час, протягом якого відновиться рівень води в колодязі з глибини h_{0_1} до глибини h_{0_2} . При невеликому розмірі колодязя виміряти час та глибини треба якнайстаранніше, щоб уникнути великого розходження обчисленого коефіцієнта фільтрації з дійсним.

III. Грунтово-артезіанські колодязі

Попередні рівняння для артезіанського досконалого колодязя правдиві тільки для такого зниження кривої піезометричного напору, при якому для будьякої точки на кривій зберігається для досконалого колодязя умова $z > a$, яка буде при $h_0 > a$ (рис. 16), а для недосконалого колодязя — $z > a_1$, яка буде при $h_0 > a_1$ (рис. 10). При неперервному, тривалому і дуже сильному відкачуванні рівень води в колодязі може спуститися нижче верхньої водотривкої верстви. В тій ділянці, де піезометрична висота перевищує верхню границю водоносної верстви, рух води відбуватиметься при наявності кривої піезометричного

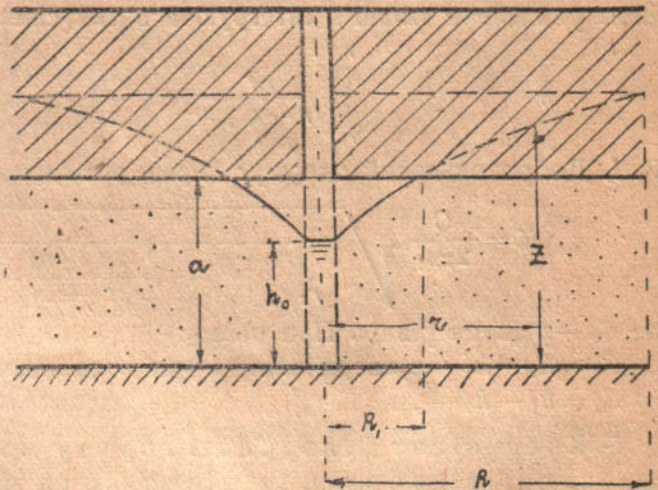


Рис. 16.

напору, а на ділянці близько колодязя — при наявності вільної поверхні. Ось чому і колодязь ми назвали ґрунтово-артезіанським.

Розрахункову формулу для визначення коефіцієнта фільтрації водоносного шару можна скласти з рівнянь руху для ділянки з вільною і невільною поверхнями.

§ 1. Фільтрація в пористих ґрунтах

Для ґрунтів, де можна застосовувати закон Дарсі, рівняння дистанемо таким чином.

Якщо позначити через R_1 віддаль від осі колодязя до тієї точки, де крива депресії відходить від верхньої водотривкої верстви, а через R — радіус діяння колодязя, то на підставі рівняння (1a) для ділянки ґрунтового потоку в границях від r_0 до R_1 правдивим буде рівняння:

$$a^2 - h_0^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R_1}{r_0},$$

звідки можна визначити R_1 :

$$\ln R_1 = \ln r_0 + \frac{\pi K(a^2 - h_0^2)}{Q}.$$

В границях від R до R_1 рух води відбуватиметься у водоносній верстві під гідростатичним тиском, і тут на підставі (21a) правдиве буде рівняння

$$H - a = \frac{Q}{2\pi a K} \ln \frac{R}{R_1}.$$

Підставляючи сюди значення $\ln R_1$ з попереднього виразу, для визначення K з граничних величин матимемо рівняння:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi(2Ha - a^2 - h_0^2)}. \quad (47)$$

Для водопоглинаючого колодязя H та h_0 поміняються місцями, в решті формула не зміниться.

Якщо одна контрольна свердловина закладена в ділянці ґрунтової води, а друга — в ділянці води артезіанської, то рівняння буде:

$$K = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi(2h_2 a - a^2 - h_1^2)}. \quad (47a)$$

Якщо обидві контрольні свердловини закладені в ділянці води артезіанської, то підраховуватимемо з формули (19), а якщо обидві закладені в ділянці води з вільною поверхнею, — то з формули (1).

§ 2. Фільтрація в гравелистих породах

Для ґрунтово-артезіанського колодязя в породах з великою шпаруватістю при складанні рівняння виходять із закону Смрекера, і тоді питання розглядають цілком аналогічно до попереднього.

За границями R_1 рідина перебуватиме під гідростатичним тиском, отже в цій ділянці правдиве рівняння (22), де $R_1 \leq r \leq R$.

Ліва границя прикладності рівняння артезіанських вод буде при $r = R_1$, коли $z = a$; підставляючи ці значення в рівняння (22), з нього можна визначити R_1 :

$$R_1^{m-1} = \left(\frac{Q}{2\pi a} \right)^m \frac{C}{(m-1)(H-a)}. \quad (48)$$

Вираз для R_1 ми повинні підставити в рівняння для руху рідини при наявності вільної поверхні, але написаним у границях від r до R_1 .

Диференціальне рівняння руху (див. I, § 1, п. 2) інтегруємо для r в границях від довільного r до R_1 та для z — від довільного z до a :

$$Q^m \int_r^{R_1} \frac{dr}{r^m} = \frac{(2\pi)^m}{C} \int_z^a z^m dz;$$

це дає

$$\frac{Q^m}{m-1} \left(\frac{1}{r^{m-1}} - \frac{1}{R_1^{m-1}} \right) = \frac{(2\pi)^m}{C} \frac{(a^{m+1} - z^{m+1})}{m+1}.$$

Підставляючи сюди раніше знайдене значення R_1^{m-1} , після перетворень одержимо рівняння:

$$C = \left(\frac{2\pi}{Q} \right)^m (m-1) \left[\frac{(a^{m+1} - z^{m+1})}{m+1} + a^m (H-a) \right] r^{m-1}, \quad (49)$$

що, як бачимо, відрізняється від рівняння (3) додатковим членом в квадратних дужках.

Для визначення коефіцієнтів m та C треба не менше двох відкачувань, тобто Q_1 та Q_2 , а це дає два зниження $z = h_1$ та $z = h_2$. Згідно з цим значенням можна написати два вирази для C з формули (49), прирівнюючи праві частини яких (а це при визначенні m можна вважати припустимим, бо значення C між собою різняться дуже мало), аналогічно до (4) одержуємо:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^m = \frac{a^{m+1} - h_1^{m+1} + a^m (m+1)(H-a)}{a^{m+1} - h_2^{m+1} + a^m (m+1)(H-a)}. \quad (50)$$

З цього рівняння визначаємо коефіцієнт m графічно, аналогічно до розв'язання за формулою (4), наведеного вище (I, § 1, п. 2). Побудувавши графік (рис. 4) і знайшовши коефіцієнт m , знаходимо значення коефіцієнтів C_1 та C_2 з формули (50), які відповідають зниженню h_1 та h_2 рівня в контрольній свердловині при відкачуванні Q_1 та Q_2 . Далі зна-

ходимо середнє значення коефіцієнта $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$ і, нарешті, значення коефіцієнта фільтрації з формули (5):

$$K = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

Цей підрахунок щодо визначення коефіцієнта фільтрації справедливий тільки в тому випадку, коли контрольна свердловина, по якій вимірюють рівень, перебуває у водоносному шарі, де є крива депресії. В тому випадку, коли контрольна свердловина встановлена за границями R_1 ($R > r > R_1$), в ділянці води артезіанської, формули для визначення коефіцієнта фільтрації будуть інші.

Для води артезіанської в цьому випадку диференціальне рівняння руху (див. II, § 1, п. 2) інтегрують в границях r від R_1 до r та z — від a до z :

$$C \int_{R_1}^r \frac{dr}{r^m} = \left(\frac{2\pi a}{Q}\right)^m \int_a^z dz;$$

це дає:

$$\frac{1}{R_1^{m-1}} - \frac{1}{r^{m-1}} = \left(\frac{2\pi a}{Q}\right)^m (z-a) \frac{(m-1)}{C}. \quad (51)$$

В цей вираз треба підставити значення R_1 , одержане з рівняння руху води при наявності кривої депресії. Для цього в рівнянні (3) припускаємо $r = R_1$ при $z = a$ і, вважаючи, що радіус діяння колодязя для випадку руху ґрунтової води так само великий, як і для випадку води артезіанської, з рівняння (3) маємо:

$$\frac{1}{R_1^{m-1}} = \frac{m-1}{m+1} \left(\frac{2\pi}{Q}\right)^m \frac{1}{C} (H^{m+1} - a^{m+1}).$$

Підставляючи це значення $\frac{1}{R_1^{m-1}}$ в рівняння (51), після перетворень одержуємо:

$$C = \left(\frac{2\pi}{Q}\right)^m (m-1) r^{m-1} \left[\frac{H^{m+1} - a^{m+1}}{(m+1) a^m} - (z-a) \right]. \quad (52)$$

Для визначення коефіцієнта по двох зниженнях рівня в свердловині $z = h_1$ і $z = h_2$, при відкачуваннях Q_1 та Q_2 , розв'язання провадять аналогічно до попереднього. Напишемо для цих значень на основі рівняння (52) два вирази для C ; прирівнюючи останні, маємо:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^m = \frac{H^{m+1} - a^{m+1} - a^m (m+1) (h_1 - a)}{H^{m+1} - a^{m+1} - a^m (m+1) (h_2 - a)}, \quad (53)$$

що, як видно, відрізняється від (50). Визначивши на основі цього рівняння графічно коефіцієнт m , можна вирахувати коефіцієнти C_1 та C_2 з формули (52), які відповідають зниженням h_1 та h_2 при відкачуваннях Q_1 та Q_2 .

Визначивши $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$, знаходимо значення коефіцієнта фільтрації з формули (5):

$$K = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

Такий метод підрахування коефіцієнта фільтрації слід застосовувати в тому випадку, коли спостережна свердловина встановлена в ділянці води артезіанської для ґрунтово-артезіанського колодязя.

§ 3. Рух води в тріщинуватих породах

Тепер наведемо розрахункові формули для ґрунтово-артезіанського колодязя в тріщинуватих породах.

Тут до речі відзначити, що слово „ґрунтово“ взагалі не відповідає тріщинуватим породам, проте прийняту термінологію „ґрунтово-артезіанський“ зберігаємо і для тріщинуватих порід, розуміючи тут, як і раніше, такий колодязь, при якому артезіанська вода поблизу колодязя переходить у потік з вільною поверхнею.

Визначення коефіцієнта фільтрації, вірніше коефіцієнта проникності, можливе для трьох характерних випадків розміщення свердловин.

Перший випадок, — коли одна спостережна точка міститься в ділянці води ґрунтової, а друга — в ділянці води артезіанської; другий випадок, — коли обидві точки спостереження містяться в ділянці води ґрунтової, і третій випадок, — коли обидві точки містяться в ділянці води артезіанської.

При розгляді ґрунтово-артезіанського колодязя в тріщинуватих породах ми виходимо з формули Шезі.

Рівняння кривої депресії для цього випадку справедливе для r в границях від r_0 до R_1 , а для z — від h_0 до a . В цьому випадку диференціальне рівняння руху (див. I, § 1, п. 3) інтегрують в указаних границях:

$$Q^2 \int_{r_0}^{R_1} \frac{dr}{r^2} = (2\pi K)^2 \int_{h_0}^a z^2 dz,$$

звідки:

$$Q^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_1} \right) = (2\pi R)^2 \cdot \frac{(a^3 - h_0^3)}{3}. \quad (54)$$

Рівняння кривої піезометричних напорів буде правдивим для r в границях від R_1 до R_2 , коли z змінюється від a до H .

Диференціальне рівняння руху (див. II, § 1, п. 3) інтегрують в границях для z від a до H та для r — від R_1 до R :

$$\int_a^H dz = \left(\frac{Q}{2\pi Ka} \right)^2 \int_{R_1}^R \frac{dr}{r^2}, \text{ себто}$$

$$(H - a) = \left(\frac{Q}{2\pi Ka} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R} \right). \quad (55)$$

Підставляючи значення R_1 з формули (54) в останнє (55) рівняння, після перетворень одержуємо вираз для визначення K за граничними величинами:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R}}{\frac{a^3 - h_0^3}{3} + a^2(H - a)}}. \quad (56)$$

Як бачимо, це рівняння відмінне від рівнянь (8) і (9) для ґрунтових колодязів і від рівняння (27) — для артезіанських і являє собою поєднання їх.

Якщо одну свердловину встановлено в ділянці води ґрунтової, а другу — води артезіанської, то підрахунок щодо визначення коефіцієнта проникності провадимо з формули:

$$K = \frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}{\frac{a^3 - h_1^3}{3} + a^2(h_2 - a)}} \quad (57)$$

В тому випадку, коли обидві спостережні свердловини містяться в ділянці води ґрунтової, обчислення робимо за формулою (8), якщо ж обидві свердловини містяться в ділянці води артезіанської, то — з формули (27).

IV. Водопоглинаючі шурфи

На практиці дуже поширене дослідження фільтраційних властивостей ґрунту з допомогою водопоглинаючих шурфів. Проте, обробляючи матеріали, дослідники доводиться натрапляти на великі труднощі у виборі розрахункової формули для визначення за даними спостережень коефіцієнта фільтрації ґрунту. Різні дослідники (Болдирев, Вайполін, Пьоришкін, Семьонов, Троянський, Новіков, Добровольський, Замарін, Біндеман та автор) дають різні методи для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту. Всі ці методи дуже різноманітні і дають найрізноманітніші значення для коефіцієнта фільтрації.

Не спиняючись на перших шістьох методах, які, на наш погляд, не дають правильного поставлення і тлумачення питання, наведемо коротко останні чотири методи, що їх можна порівнювати при розрахунках. Розгляд цих методів стосується шурфів, в які безперервно подають воду, підтримуючи в них при цьому певний і постійний горизонт.

§ 1. Метод Добровольського

К. І. Добровольський для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту переносить формули для водовіддаючого артезіанського колодязя, що працює дном, при півсферичній його поверхні, на водопоглинаючі шурфи.

Отже, згідно з методом Добровольського, формула (32) визначає K для пористих ґрунтів за даними спостережень в двох контрольних свердловинах.

Якщо позначити різниці рівнів Δh для пограничних значень, при $r_1 = r_0$ та $r_2 = R$, рівняння Добровольського матиме такий вигляд:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \frac{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R}}{\Delta h} \quad (58)$$

Величину R визначають з рівняння

$$W = \frac{2}{3} \pi R^3 p,$$

де:

W — сумарний об'єм ґрунту, в який профільтрувалася вода;
 p — пористість ґрунту.

Звідси:

$$R = 0,782 \sqrt{\frac{W}{p}} \quad (59)$$

При визначенні коефіцієнта фільтрації по контрольній свердловині і шурфу в формулі (58) треба покласти $R = r_1$, де r_1 — віддаль від центра шурфа до контрольної свердловини.

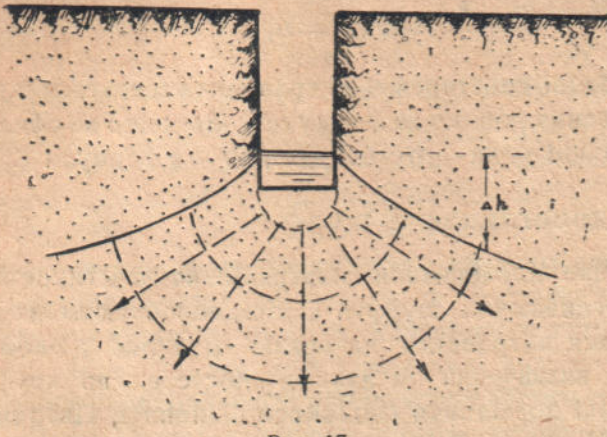


Рис. 17.

Для тріщинуватих порід рівняння можна написати, за Добровольським, згідно з виразом (38), але для водопоглинаючого шурфа; рівняння це при граничних визначеннях матиме такий вигляд:

$$K = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2}}, \quad (60)$$

де Δh — різниця рівнів.

Величину R , як і раніш, визначають з рівняння (59).

Якщо спостерігають по двох контрольних свердловинах, то в рівнянні (60) треба покласти:

$$r_0 = r_1 \text{ і } R = r_2,$$

де:

r_1 та r_2 — віддалі до контрольних свердловин;

Δh — різниця горизонтів води в них.

Для однієї контрольної свердловини в формулі (60) треба замінити $R = r_1$.

Відзначмо, що застосування цих формул для шурфів є неточним. По-перше, при виводі рівняння прийнято, що живий перекрій являє собою півсферичну поверхню, в той час як в дійсності він набагато менший. Подруге, граничний перекрій при $r = r_0$, згідно з рівнянням, являтиме собою також півсферичну поверхню, в той час як в дійсності він буде плоский. Потретьє, коли вода, що фільтрується з шурфа досягне горизонту ґрунтових вод або водонепроникної верстви, станеться перерозподіл тисків швидкостей та їх напрямів, отже прийнятий Добровольським півсферичний живий перекрій потоку зміниться.

Відзначені хиби написаних рівнянь свідчать про потребу обережно застосовувати формули, які можуть дати лиш наближену характеристику для K .

§ 2. Метод Замаріна

Е. А. Замарін розглядає фільтраційний, що не встановився, рух води, яка надходить із шурфа в ґрунт. Він робить припущення, що, за винят-

ком сильно водопроникних ґрунтів, розтікання води буде дуже близьке формою до кулі. Вода, що надходить в ґрунт, переміщуватиметься у відповідні моменти часу t_1, t_2, t_3 і т. д. на величину x_1, x_2, x_3 і т. д., займаючи положення I, II, III і т. д. (рис. 18).

При цьому Замарін припускає, що градієнти, віднесені до цих моментів часу, будуть:

$$I_1 = \frac{h_0 + x_1}{x_1}, \quad I_2 = \frac{h_0 + x_1 + x_2}{x_1 + x_2} \text{ і т. д.}, \quad (61)$$

де h_0 — глибина води в шурфі.

При збільшенні шляху фільтрації градієнт наближатиметься асимптотично до одиниці.

Швидкість розтікання води можна підрахувати, знаючи перейдений шлях $x_1, x_1 + x_2$ і т. д. і моменти часу t_1, t_2, t_3 і т. д.

$$v_1 = \frac{x_1}{t_1}; \quad v_2 = \frac{x_2}{t_2 - t_1} \text{ і т. д.} \quad (62)$$

Із знайдених швидкостей (62) та ухилів (61) визначають коефіцієнт фільтрації ґрунту із співвідношення:

$$K_1 = \frac{v_1}{I_1}; \quad K_2 = \frac{v_2}{I_2} \text{ і т. д.} \quad (63)$$

Визначення коефіцієнта фільтрації ґрунтується на тому припущенні, що подавану в шурф воду поглинають вільні пори ґрунту в об'ємі сферичної форми розтікання.

Об'єм вільних пор ґрунту, наприклад, між кривою I та кривою II, вважають рівним кількості води, що просочується в ґрунт у межах двох положень I і II фільтраційного руху. Замість (62) можна за Замаріним, підрахувати середні швидкості фільтрації таким способом. Приміром, середню швидкість руху від кривої I до кривої II знаходять з відношення звібраної кількості води до добутку часу просочування та арифметичної

середньої поверхні I та II, саме $V = \frac{W}{t \cdot F_{\text{сеп}}}$.

Щоб визначити коефіцієнт фільтрації, треба знати сферу розтікання води.

Щоб знайти першу сферу, задачу розв'язують добором, а щоб знайти інші — наведеними нижче рівняннями. Вводять такі позначення:

W — об'єм води, що просочується в ґрунті з шурфа;

p — пористість ґрунту;

m — його вологість;

δ — питома вага часточок ґрунту;

a_0 — глибина води в шурфі;

r_0 — радіус шурфа;

$R_1, R_2 \dots R_n$ — радіуси сфер розтікання;

$b_1, b_2, \dots b_n$ — піднесення положення сфери над горизонтом води в шурфі.

Для добору першої сфери треба задатися величиною її радіуса R_1 ; далі підраховують об'єм за такими формулами:

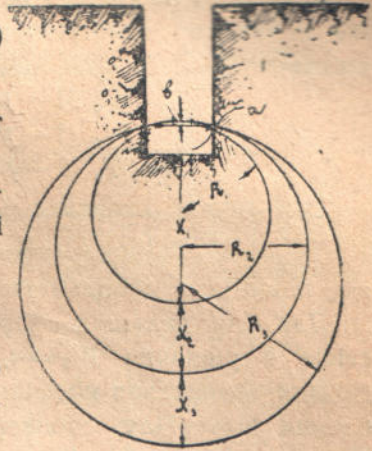


Рис. 18.

для сфери $W_1 = 4,19 R_1^3$;

для води в шурфі $W' = 3,14 r_0^2 a$;

для сегмента над сферою $W'' = 0,52 b (3r_0 + b_1^2)$,

де: $b_1 = R_1 - \sqrt{R_1^2 - r_0^2}$.

Коли позначити W_0 — об'єм бруто ґрунту в сфері, то: $W_0 = W_1 - W' - W''$ і об'єм пор дорівнюватиме $W_0 p$. Частина пор зайнята водою; цю початкову вологість ґрунту Замарін знаходить із таких співвідношень:

$W_0 (1 - p)$ — об'єм часточок ґрунту;

$W_0 (1 - p) \delta$ — вага їх і

$W_0 (1 - p) \delta m$ — об'єм води, що складає вологість ґрунту.

Тоді можна написати рівняння:

$$W_1 = W_0 [p - (1 - p) \delta m],$$

яке повинне задовольняти обране значення R_1 .

Для всіх дальших сфер (другої і т. д.) добір радіуса провадять простіше з рівняння $W_2 = 4,19 (R_2^3 - R_1^3) [p - (1 - p) \delta m]$ і т. д.

Для визначення коефіцієнта фільтрації Замарін дає два способи оброблення матеріалу спостережень. За першим способом знаходять $W_1, W_2 \dots$, радіуси $R_1, R_2 \dots$ та поверхні сфер розтікання $F_1, F_2 \dots$ з рівнянь:

$$F_1 = 6,28 R_1 (2 R_1 - b_1);$$

$$F_2 = 6,28 R_2 (2 R_2 - b_2).$$

Далі знаходять швидкості $V_2, V_3 \dots$ з рівнянь:

$$V_2 = \frac{2 W_2}{(F_1 + F_2) t_2}; \quad V_3 = \frac{2 W_3}{(F_2 + F_3) t_3} \text{ і т. д.}$$

Знаючи швидкості та ухили, знаходять коефіцієнти фільтрації $K_2, K_3 \dots$

Другим способом знаходять середні шляхи фільтрації $x_1, x_2, x_3 \dots$ поміж сферами:

$$x_1 = \frac{V_1}{t_1}; \quad x_2 = \frac{V_2}{t_2},$$

далі ухили — з рівняння (61) і нарешті коефіцієнти K — з рівняння (63).

Підходячи критично до наведеного методу, можна сказати таке. В основу свого розгляду Замарін кладе припущення про наявність сферичної форми розтікання фільтраційної води, в той час як в дійсності ця форма може бути найрізноманітніша. Градієнт Замарін обчислює для середини шурфа в найбільше відтягнутій частині сфер і поширює величину градієнта на всю сферичну поверхню фільтраційного руху.

§ 3. Метод Біндемана

Н. Н. Біндеман, вважаючи метод Замаріна в основному за правильний, поширює питання, враховуючи витрату на капілярне розсмоктування і вважаючи, на підставі власних експериментів, зволожену поверхню за еліпсоїд обертання. Цей еліпсоїд у піщаних ґрунтах витягнений, а в глинистих — трохи сплющений. Формується він під впливом гравітаційних

та капілярних сил при олорі просочуванню від тertia з поверхніми часточок ґрунту і опору з боку повітря, що в порах ґрунту. Коли капілярний підйом припинений і досягнуто границі горизонтальних розмірів еліпса, правильність його порушується; форма стає яйцевидною, витягнутою вниз.

Біндеман відзначає, що при стабілізації горизонтальної осі еліпса витрата води з шурфа встановлюється постійна. Це пояснює він тим, що в формулі $Q = K \omega I$ при малій глибині води в шурфі градієнт змінюється надто мало, а тому при Q, K і I сталих — перекрій потоку ω , нормальний напрямові струмин, залишається сталим.

Цю величину живого перекрою для гравітаційного руху Біндеман визначає так.

Якщо:

h — глибина просочування, визначуванна свердлінням після закінчення експерименту;

$r = (R - c)$ — радіус фільтраційного перекрою;

c — вектор капілярного підняття води, то радіус кола R , що являє собою горизонтальну піввісь еліпса b , можна визначити з рівняння еліпсоїда:

$$b = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{w}{\pi a}},$$

де w — об'єм зволоженого ґрунту.

При розмірах півосей еліпса $b = R$ і $a = \frac{h + a_0 + c}{2}$, де a_0 — глибина води в шурфі,

$$R = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{w}{(h + a_0 + c)}}.$$

Об'єм зволоженого ґрунту $w = \frac{\Omega}{p_0}$, де:

Ω — загальна кількість води, що профільтрувалася в ґрунт на кінець експерименту, а

$$p_0 = p \varphi_1^B = \varphi_2^B = \frac{A \varphi_2}{A(\varphi_1 + \varphi_2) + 1}.$$

Тут:

φ_1 — середня природна вологість ґрунту до інфільтрації;

φ_2 — середня частка зволоження ґрунту інфільтраційними водами, поданими в частках за вагою від ваги сухого ґрунту;

A — питома вага часточок ґрунту;

B — об'ємна вага сухого ґрунту.

Визначення φ_1 та φ_2 провадять за зразками ґрунту, взятими перед експериментом і після нього.

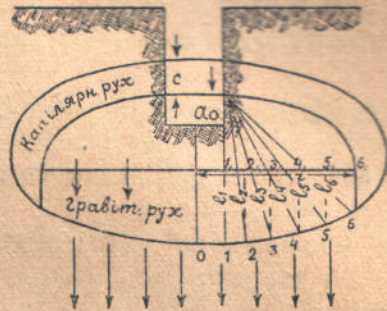


Рис. 19.

Підставляючи в формулу для R значення $\omega = \frac{\Omega}{p_0}$, Біндеман визначає площу круга частини еліпсоїда, яка являє собою живий перекрій ґрунтового потоку:

$$\omega = \pi (R - c)^2 = 3,14 \left(0,69 \sqrt{\frac{\Omega}{p_0 (h + a_0 + c)}} - c \right)^2. \quad (64)$$

Далі Біндеман складає рівняння для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту. При цьому він виходить з рівняння Цункера:

$$V = K \frac{c + a_0 + h - d}{l},$$

але написаного для даних умов:

$$V = K \frac{c + a_0 + h_{\text{сер}} - d}{l_{\text{сер}}},$$

де:

d — опір повітря, вираженого висотою стовпа води;

$l_{\text{сер}}$ — середня довжина шляху струмин;

$h_{\text{сер}}$ — середня глибина просочування.

А що $\frac{a_0 + h_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} = I_{\text{сер}}$, то формулу можна написати так:

$$V = K \left(I_{\text{сер}} + \frac{c - d}{l_{\text{сер}}} \right). \quad (65)$$

Опір повітря d за Цункером:

$$d = \frac{V l_e}{K_e}, \quad (66)$$

де:

V — швидкість руху води;

l_e — висота колони повітря до зони, де повітряний тиск дорівнює атмосферному;

K_e — коефіцієнт повітропроникності ґрунту, а саме

$$K_e = \frac{K \eta}{\eta_e} = K \beta, \quad (67)$$

де β є відношення η — в'язкості води до η_e — в'язкості повітря.

Об'єднуючи формули (65), (66) та (67), Біндеман одержує:

$$K = \frac{V \left(1 + \frac{l_e \beta}{l_{\text{сер}}} \right)}{I_{\text{сер}} + \frac{c}{l_{\text{сер}}}}. \quad (68)$$

Припускаючи, що висоту витискуваного повітря l_e можна прирівняти до середньої довжини шляху $l_{\text{сер}}$ інфільтраційних течій і приймаючи

температуру ґрунту рівною 10° (цьому відповідає $\beta = 0,0135$), Біндеман одержує:

$$K = \frac{1,0135 \cdot V}{I_{\text{сер}} + \frac{c}{I_{\text{сер}}}} \quad (69)$$

При збільшенні глибини просочування формула наближається до рівняння Дарсі: $K = \frac{V}{I}$.

Для визначення в формулі (69) $I_{\text{сер}}$ та $l_{\text{сер}}$ Біндеман вживає графічне розв'язання, подаючи вертикальний перекрій еліпсоїда.

На рис. 19 радіус r розбивається на довільне парне число однакових відтинків і добуті точки 0, 1, 2, 3, 4, 5 та 6 проєктують вертикально на криву еліпса.

Для одержаних точок 0, 1, 2, 3, 4, 5, та 6 Біндеман визначає гідравлічний градієнт; для цього він з'єднує прямими ці точки з шурфом (точку 1 — зо дном, точку 6 — з горизонтом води в ньому, а решту точок — через рівні інтервали стінки), одержуючи довжину шляху інфільтрації $l_0, l_1, l_2, l_3 \dots$ та глибини цих точок $h_0, h_1, h_2, h_3 \dots$ від дна шурфа. В цьому випадку гідравлічні градієнти будуть:

$$I_0 = \frac{h_0 + a_0}{l_0}, \quad I_1 = \frac{h_1 + a_0}{l_1},$$

$$I_2 = \frac{h_2 + a_0}{l_2} \text{ і т. д.}$$

Далі Біндеман визначає величину середнього градієнта, що впливає при інфільтрації через перекрій ω , і в наслідок цього знаходить вираз для:

$$I_{\text{сер}} = 0,074 (I_1 + I_2 + 3I_3 + 2I_4 + 5I_5 + 1,5I_6) \quad (70)$$

$$l_{\text{сер}} = 0,074 (l_1 + l_2 + 3l_3 + 2l_4 + 5l_5 + 1,5l_6).$$

Для визначення коефіцієнта фільтрації з формули (69) треба в ній замінити швидкість через витрату Q і площу перекрою ω ; $V = \frac{Q}{\omega}$, де ω — беруть за рівнянням (64).

Роблячи це підставлення, Біндеман остаточно одержує таку формулу для визначення коефіцієнта фільтрації:

$$K = 0,323 \frac{Q}{\left(0,69 \sqrt{\frac{\Omega}{\rho_0 \varepsilon}} - c\right)^2 \left(I_{\text{сер}} + \frac{c}{I_{\text{сер}}}\right)}, \quad (71)$$

де ε — довжина вертикальної осі обертання еліпса.

Для піску, в якому можна знехтувати капілярними силами c , Біндеман дає спрощену формулу:

$$K = 0,675 \frac{Q \rho_0 \varepsilon}{\Omega I_{\text{сер}}}.$$

Біндеман відзначає, що коли досягти горизонтальних границь зволоження, то правильність еліпсоїда порушується і форма змоченого ґрунту

стає яйцевидною. У цьому випадку користування формулами (71) та (72) буде неправильне, бо вони виведені з форми змочування еліпсоїда, і їх не можна пристосувати до іншої форми, яка на практиці здебільшого має найрізноманітніший вигляд.

В основному метод Біндемана правильно враховує елементи руху води при інфільтрації з шурфа, алеж основна хиба його та, що він дуже забарний, потребує солідних підрахунків і навряд чи знайде собі застосування при масових розрахунках.

§ 4. Метод автора

Автор, розглядаючи рух води з шурфа в ґрунт, виводить гідравлічним способом рівняння для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту.

Вода, що надходить із шурфа, фільтруватиметься в ґрунт, спускаючись вниз під впливом сили ваги і розтікаючись при цьому в сторони. Цей процес руху води може бути різної тривалості залежно від сполучення різних умов, але відбуватиметься доти, поки фільтраційні води не досягнуть потоку природних ґрунтових вод або водонепроникної верстви. При злитті потоку, який ще не встановився і який іде з шурфа з потоком ґрунтових вод в останньому порушуються умови руху, що вже встановився; через це спостерігатиметься різкий перерозподіл тисків, швидкостей та напрямів руху.

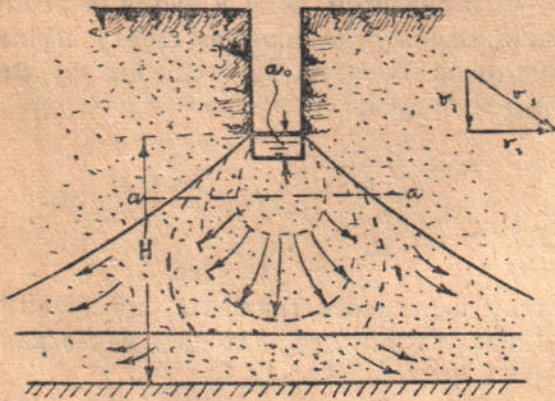


Рис. 20.

Через деякий час, при розтіканні води в сторони, вільна поверхня потоку почне вирівнюватися і між фільтраційною течією води з шурфа і природним ґрунтовим потоком утвориться закономірний зв'язок. Якщо до цього моменту віднести спостереження рівнів води в контрольних свердловинах і вимір витрати, то можна з достатньою для практичних завдань точністю визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту. При такій постановці задачі можна не визначати витрату на капілярне розсмоктування води, бо капілярний шар головно утворюватиметься за рахунок надходження води в перший момент інфільтрації. Коли ж навіть у дальший момент і буде капілярна витрата, то вона буде надто мала порівнюючи з фільтраційною витратою і її можна цілком відкинути. Фільтраційний рух рідини, що починає свій шлях із шурфа, відбуватиметься по траєкторіях, які дуже близькі до ліній течії рідини через те, що просування зворотної лійки по радіусу невелике і мало впливає на витрату шурфа. Часточки рідини, що рухаються в ділянці, занятій ґрунтовим потоком, матимуть у кожній окремій точці потоку різні швидкості як щодо величини, так і щодо напрямку. Задачу можна розв'язати більш точним,

тобто гідромеханічним, способом, але ми обмежимося тут тільки гідравлічним розглядом питання, орієнтуючись при цьому на наближену формулу, цілком достатню для практичних застосувань.

Розв'язуючи задачу, зробимо ряд припущень, що спрощують питання. Глибину води в шурфі безпосередньо в розгляд не включаємо через те, що вона звичайно дуже мала порівнюючи з загальною глибиною H , яку відраховують від поверхні води в шурфі до водонепроникного або до водоносного шару. Це, як побачимо далі, на результат не впливає.

Друге припущення при гідравлічному розгляді питання ми робимо, вважаючи, що тут можна застосувати гіпотезу плоского перекрою. Згідно з цією гіпотезою вважаємо, що потік при розтіканні в ґрунт має в будь-якому обраному горизонтальному перекрої однакові місцеві вертикальні швидкості v_z , які дорівнюватимуть середній вертикальній швидкості потоку v_z .

Розглядаючи, отже, розрахункову схему (рис. 20), для будь-якого перекрою, напр, $Q - a$, можна написати диференціальне рівняння руху:

$$Q = \omega v_z = \pi r^2 v_z, \quad (73)$$

де:

v_z — вертикальна швидкість;

$\omega = \pi r^2$ — площа живого перекрою.

Рух рідини відбувається по лініях течії; в даному випадку шуканою лінією течії є погранична поверхня потоку — крива депресії.

Розгляньмо переміщення будь-якої часточки рідини на поверхні потоку.

За законом Дарсі, вираз для швидкості фільтрації, як функції точки, буде:

$$v_s = KI = -K \frac{dH}{dS},$$

де $I = -\frac{dH}{dS}$, бо втрата напору dH відбувається на поверхні потоку за довжиною

$$dS = \sqrt{dr^2 + dz^2} = dr \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}.$$

Підставляючи це рівняння в попереднє, матимемо для швидкості фільтрації по лівій течії — S такий вираз:

$$v_s = -\frac{K \frac{dH}{dr}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}},$$

а для вертикального компонента v_z повної швидкості:

$$v_z = v_s \sin \alpha = v_s \cdot \frac{dz}{dS} = -v \frac{\frac{dz}{dr}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} = K \frac{\frac{dz}{dr} \cdot \frac{dH}{dr}}{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}. \quad (74)$$

Падіння напору dH відповідає для поверхневої лінії течії приростові ординати dz ; отже його можна замінити в цьому рівнянні $dH = dz$. Для ліній течій, які не збігаються з кривою депресії, цієї умови писати не можна.

Крім того, згідно з прийнятою тут гіпотезою плоского перекрою, має місце умова $v_z = V_z$, і тоді попередній вираз, написаний для середньої вертикальної швидкості потоку, буде:

$$V_z = K \frac{\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}. \quad (75)$$

Підставляючи це значення в рівняння для витрати, одержуємо вихідне диференціальне рівняння руху:

$$Q = \pi K r^2 \frac{\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}. \quad (76)$$

Щоб дістати звідси функціональну залежність для елементів потоку, рівняння треба проінтегрувати. Однак після інтегрування здобуте рівняння відносно K — коефіцієнта фільтрації — в явному вигляді не розв'язується, отже задачу доводиться розв'язувати доборою, а це надто складна робота.

Визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту можна безпосередньо з рівняння (76); для цього його треба розв'язати відносно K і подати в ньому члени $\frac{dz}{dr}$ в граничних різницях:

$$K = \frac{Q}{\pi r^2} \frac{1 + \left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right)^2}{\left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right)^2}. \quad (77)$$

Тут:

Δz — різниця рівнів у двох спостережних точках: або в двох контрольних свердловинах, або в контрольній свердловині і шурфі;

Δr — віддаль між цими точками: $\Delta r = r_2 - r_1$;

r — середній радіус для цих точок від осі шурфа.

Вираз для визначення середнього радіуса складаємо так.

Горизонтальні живі перекрої потоку, взяті на рівні води в першій і другій контрольних свердловинах, будуть:

$$\omega_1 = \pi r_1^2 \text{ та } \omega_2 = \pi r_2^2, \quad (78)$$

а середній їх арифметичний перекрій

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}.$$

Подаючи ці перекрої через радіус, себто $\omega = \pi r^2$, одержимо вираз для r :

$$r = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{\omega_1 + \omega_2}{2\pi}}.$$

Підставляючи значення ω_1 та ω_2 з формули (78) в останнє рівняння, одержимо:

$$r = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}}. \quad (79)$$

Для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту обчислення можна зробити за формулою (77), в якій значення беруть з формули (79).

Можна вирази (79) та (77) сумістити, і тоді коефіцієнт фільтрації ґрунту визначатимемо з такого рівняння:

$$K = \frac{2Q}{\pi(r_1^2 + r_2^2)} \cdot \frac{1 + \left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right)^2}{\left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right)^2}. \quad (80)$$

Це останнє рівняння можна подати в спрощеному вигляді:

$$K = \frac{2 \cdot Q}{\pi(r_1^2 + r_2^2)} \cdot \frac{1 + I^2}{I^2}, \quad (81)$$

де $I = \frac{\Delta z}{\Delta r}$ — градієнт, який визначають по двох спостережних точках.

Одержані дані для K з формули (80) дають наслідки, які дуже добре збігаються з дійсними.

Виводячи рівняння, автор має на увазі досить довгу роботу шурфів, коли капілярне розсмоктування настільки мале, що ним можна цілком знехтувати.

V. Дослідження верств різного водовіддавання

Коли є декілька водоносних верств, для яких потрібно визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту, то дослідження треба провадити з допомогою колодязів, враховуючи глибину та проникність кожної з верств.

Для двох водоносних верств різного водовіддавання Шульце виводить рівняння для дебіту колодязя, яке можна відповідно застосувати для визначення коефіцієнтів фільтрації цих порід. Для трьох водоносних порід різного водовіддавання вивід рівнянь дає автор, який дає також і метод визначення коефіцієнтів фільтрації при відкачуваннях.

Наведемо спочатку виводи цих рівнянь.

§ 1. Визначення коефіцієнтів фільтрації для двох водоносних шарів різного водовіддавання

Шульце для розв'язання задачі всі водоносні шари зводить до однієї водопроникності. Для цього він заміняє глибину кожного водоносного шару еквівалентною щодо фільтрації глибиною.

Якщо розглядати два водоносні шари, то нижній шар ґрунту з проникністю K_2 можна звести до еквівалентного щодо фільтрації шару

грунту з проникністю K_1 , взявши замість глибини a_2 зведену глибину a'_2 , яка буде:

$$a'_2 = a_2 \frac{K_2}{K_1}.$$

Позначаючи зведену висоту незниженого рівня через $H' = a_1 + a'_2$, зведену глибину води в колодязі — через h'_0 і радіус впливу сфери — через R , можна написати рівняння Дююї для зведених висот:

$$Q = \frac{\pi K_1 [(H')^2 - (h'_0)^2]}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

А що

$$h'_0 = h_0 - a_2 + a_2 \frac{K_2}{K_1},$$

$$H' = a_1 + a_2 \frac{K_2}{K_1},$$

$$a_1 = H - a_2,$$

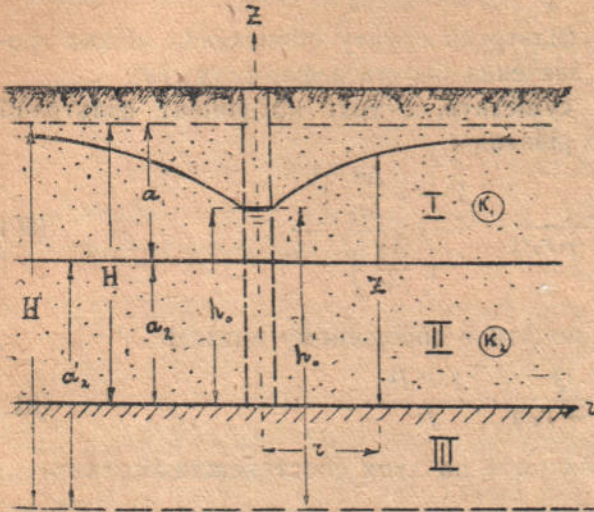


Рис. 21.

то, підставивши всі ці величини, одержимо:

$$Q = -\frac{\pi K_1}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[\left(H - a_2 + a_2 \frac{K_2}{K_1} \right)^2 - \left(h_0 - a_2 + a_2 \frac{K_2}{K_1} \right)^2 \right]. \quad (82)$$

При $K_1 = K_2$ одержуємо звичайне рівняння Дююї.

Рівняння для дебіту виводять простіше, якщо розглядати приплив води в колодязь окремо в водоносних шарах I та II.

Фільтруюча поверхня для верхнього водоносного шару буде

$$\omega_1 = 2\pi r (z - a_2),$$

а для нижнього шару

$$\omega_2 = 2\pi r a_2,$$

і тоді вираз для припливу води буде:

$$Q = \omega_1 K_1 I + \omega_2 K_2 I = 2\pi r [(z - a_2) K_1 + a_2 K_2] \frac{dz}{dr}.$$

Відокремивши змінні й інтегрувавши рівняння по r в границях від r_0 до R і по z — в границях від h_0 до H :

$$\int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \frac{2\pi}{Q} \cdot \int_{h_0}^H [(z - a_2) K_1 + a_2 K_2] dz,$$

надамо йому такого вигляду:

$$\ln \frac{R}{r_0} = \frac{2\pi}{Q} \left[K_1 \frac{H^2 - h_0^2}{2} - a_2 K_1 (H - h_0) + a_2 K_2 (H - h_0) \right].$$

Звідси вираз для дебіту:

$$Q = \frac{\pi K_1}{\ln \frac{R}{r_0}} \left(H + h_0 - 2a_2 + 2a_2 \frac{K_2}{K_1} \right) (H - h_0), \quad (83)$$

який теж при $K_1 = K_2$ переходить у рівняння Дюпюї.

Хоч формули (82) та (83) і різні на вигляд, але вони дають цілком однаковий наслідок і одна може бути переведена в другу нескладними алгебричними перетвореннями.

Виведене рівняння для верств різного водовіддавання можна визнати за загальне, бо воно задовольняє найрізноманітніші ґрунти. Якщо верства II водонепроникна, то $K_2 = 0$ та $a_2 = 0$, отже рівняння (83) переходить у звичайне рівняння Дюпюї для ґрунтового колодязя. Якщо верства I мало чи взагалі водонепроникна, то вона може бути водоупором для нижнього (II) водоносного шару, і тоді рух можна розглядати як „напірний“. В цьому випадку при $K_1 = 0$ (заздалегідь увівши K в дужки, щоб уникнути невизначеності) дістанемо звичайну формулу для артезіанського колодязя.

Для визначення коефіцієнтів фільтрації ґрунту обох водоносних шарів безпосередньо користуватися формулою не можна, бо в неї входять обидва значення коефіцієнта фільтрації K_1 та K_2 . Дійсно, розв'язуючи формулу (83) відносно K_1 , одержимо:

$$K_1 = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0} - 2\pi a_2 K_2 (H - h_0)}{\pi [H^2 - h_0^2 - 2a_2^2 (H - h_0)]} \quad (84)$$

або відносно K_2 одержимо:

$$K_2 = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0} - \pi K_1 (H^2 - h_0^2) + 2\pi K_1 a_2 (H - h_0)}{2a_2 \pi (H - h_0)}. \quad (85)$$

У першому випадку можемо визначити значення K_1 , якщо буде відомий коефіцієнт фільтрації K_2 , а в другому випадку навпаки.

Для визначення коефіцієнта фільтрації K_1 та K_2 обох водоносних шарів можна застосувати два методи: Добровольського і Замаріна.

К. І. Добровольський пропонує спершу визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту нижнього водоносного шару, а потім верхнього. Для цього формулу (85) треба переписати так:

$$K_2 = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi a_2 (H - h_0)} - K_1 \left(\frac{H + h_0}{2a_2} - 1 \right), \quad (85a)$$

а потім звільнитися від другого члена, де стоїть значення K_1 . Для цього треба так організувати відкачування, щоб при зниженні рівня член $\frac{H + h_0}{2a_2}$

дорівнював одиниці, тобто треба мати $h = 2a_2 - H$ (це не завжди можливо, а тільки в тих випадках, коли $2a_2 > H$), При такому зниженні рівня член, який стоїть в крайніх дужках останнього рівняння, буде близький до нуля або рівний йому і отже, при такому співвідношенні зниження, значення K_2 знайдемо з формули

$$K_2 = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi a^2 (H - h_0)}, \quad (86)$$

Знайшовши значення K_1 і підставивши його в формулу (84), визначимо коефіцієнт фільтрації K_1 верхнього водоносного шару.

Формула (86) нам знайома: її дано вище для артезіанського колодязя, але вона в даному разі є дійсна для часткового випадку руху при зазначених співвідношеннях зниження.

В тому випадку, коли коефіцієнт фільтрації визначають по одній контрольній свердловині і колодязю, в формулах (84) та (86) треба покласти $R = r_1$ та $H = h_1$, а коли коефіцієнт визначають по двох контрольних свердловинах, то

$$r_0 = r_1, R = r_2, h_0 = h_1 \text{ і } H = h_2.$$

Е. А. Замарін для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту в породах різного водовіддавання пропонує інший метод. Спершу може бути визначений коефіцієнт фільтрації ґрунту верхнього водоносного шару з допомогою недосконалого колодязя. Для цього недосконалий колодязь повинен бути опущений у верхній водоносний шар так, щоб при відкачуванні активна зона живлення лежала на поверхні розділу водоносних шарів I та II і не перевищувала величину a_1 та щоб колодязь живився тільки водою верхнього водоносного шару.

Глибина активної зони може бути при заданих елементах зниження підрахована за співвідношеннями Замаріна, які ми тут навели (див. I, § 2) За даними відкачування можна визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту K_1 користуючись відповідними формулами недосконалого колодязя. Далі слід опустити колодязь до водонепроникної верстви і відновити відкачування. Одержавши нові елементи (глибин та витрати) при відкачуванні, підставляємо їх значення в формулу (85) разом з раніш визначеним значенням K_1 і вираховуємо коефіцієнт фільтрації ґрунту K_2 .

Для тих випадків, коли водоносні верстви залягають глибоко й опускання колодязя на всю товщу водоносного шару до непроникної верстви при дослідних відкачуваннях є недоцільне через велику вартість робіт або коли воно при наявному обладнанні дослідницької партії утворює деякі ускладнення, то розраховують інакше. Дослідження щодо визначення коефіцієнта фільтрації провадять з допомогою недосконалого колодязя, і тому воно великою мірою ускладняється.

Коефіцієнт фільтрації верхнього водоносного шару визначають з попереднього, а замість визначення коефіцієнта фільтрації нижнього водоносного шару визначають відкачуванням з недосконалого колодязя водонепроникність обох водоносних шарів.

Замарін вважає, що для одержання характеристики водовіддавання ґрунту треба заглиблювати колодязь поступово за кілька разів і потім будувати на основі здобутих даних криву зміни коефіцієнта фільтрації із зниженням.

При однорідній будові нижнього водоносного шару крива дасть характеристику коефіцієнта фільтрації ґрунту, який наближатиметься до значення коефіцієнта K_2 .

Крім наведеного методу визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту, можна застосовувати і такий спосіб. Визначивши з допомогою недосконалого колодязя коефіцієнт фільтрації першого водоносного шару K_1 , можна визначити кількість води, яка попадає в колодязь з нижнього водоносного шару, віднімаючи для цього витрату першої верстви із загального дебіту свердловини. Знаючи витрату води нижньої верстви, можна відповідним підрахунком визначити коефіцієнт фільтрації K_2 .

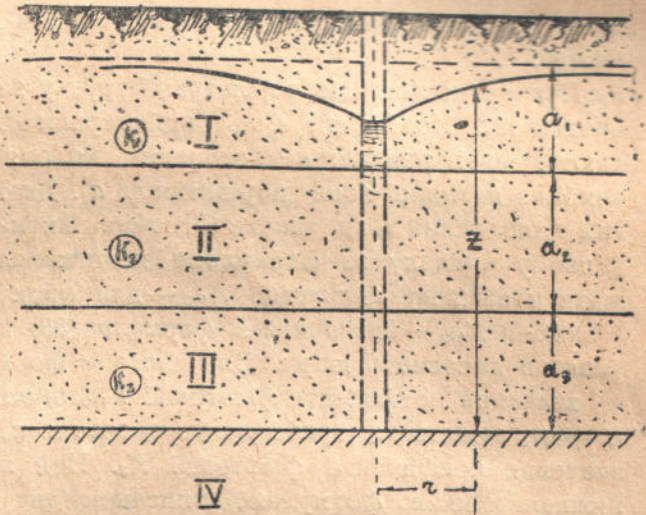


Рис. 22.

§ 2. Визначення коефіцієнта фільтрації для трьох водоносних шарів різного водовіддавання

Розгляньмо випадок, коли ґрунтовий потік знаходиться в трьох верствах різного водовіддавання, коефіцієнт фільтрації яких треба визначити.

Наведений нижче вивід формул для трьох водоносних шарів аналогічний до попереднього виводу.

Живий перекий верств I, II та III відповідно становитиме:

$$\omega_1 = 2\pi r (z - a_2 - a_3); \quad \omega_2 = 2\pi r a_2 \quad \text{і} \quad \omega_3 = 2\pi r a_3;$$

фільтраційна витрата:

$$Q = 2\pi r \left[(z - a_2 - a_3) K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_3 \right] \frac{dz}{dr}$$

Відокремлюючи змінні та інтегруючи для r в границях від r_0 до R і для z — в границях від h_0 до H , саме

$$\frac{Q}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \int_{h_0}^H \left[(z - a_2 - a_3) K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_3 \right] dz,$$

одержимо:

$$\frac{Q}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \left(\frac{H + h_0}{2} K_1 - K_1 a_2 - K_1 a_3 + K_2 a_2 + K_3 a_3 \right) (H - h_0),$$

звідки

$$Q = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[\left(\frac{H+h_0}{2} - a_2 - a_3 \right) K_1 + K_2 a_2 + K_3 a_3 \right] (H - h_0). \quad (87)$$

У формулі (87) входять всі три коефіцієнти фільтрації, і з неї коефіцієнт фільтрації кожної водоносної породи визначити безпосередньо не можна.

Практично коефіцієнт фільтрації ґрунту за методом автора слід визначати так. Коефіцієнт фільтрації першого водоносного шару K_1 визначають, як і раніше, недосконалим колодязем, установленим так, щоб глибина активної зони дорівнювала a_1 . Далі опускають колодязь у другий водоносний шар, так щоб глибина активної зони дорівнювала $a_1 + a_2$. В цьому випадку за формулами недосконалого колодязя можемо одержати коефіцієнт фільтрації $K_{1,2}$ — для обох водоносних шарів I та II, а знаючи $K_{1,2}$ — визначити з формули (85) коефіцієнт фільтрації K_3 третього водоносного шару. Для цього в формулі (85) треба взяти замість K_1 значення коефіцієнта фільтрації $K_{1,2}$ обох водоносних шарів грубиною $a_1 + a_2$; замість a_2 треба взяти значення a_3 , і тоді замість K_2 одержимо значення коефіцієнта фільтрації K_3 . Цей підрахунок провадитимемо за нижченаведеною формулою, написаною для даних спостережень по контрольній свердловині та колодязю:

$$K_3 = \frac{Q \ln \frac{r_1}{r_0} - \pi K_{1,2} (h_1^2 - h_0^2) + 2\pi K_{1,2} a_3 (h_1 - h_0)}{2\pi a_3 (h_1 - h_0)}, \quad (88)$$

де:

Q — витрата води при відкачуванні з усіх трьох водоносних шарів;
 h_1 — глибина води в контрольній свердловині від рівня води до водонепроникної верстви;

r_1 — віддаль контрольної свердловини від центра колодязя.

Знаючи коефіцієнти K_1 та K_2 , можемо визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту другого водоносного шару з формули (87), розв'язуючи її відносно K_2 і написавши для спостережень по контрольній свердловині та колодязю:

$$K_2 = \frac{Q \ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi (h_1 - h_0) a_2} - \left(\frac{h_1 + h_0}{2} - a_2 - a_3 \right) \frac{K_1}{a_2} - \frac{K_3 a_3}{a_2}, \quad (89)$$

де Q — дебіт колодязя при відкачуванні, який живиться з усіх трьох водоносних шарів.

VI. Визначення коефіцієнта фільтрації на основі часу просування ґрунтових вод

Визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту можна без вимірів кількості води при відкачуванні, але вимірюючи в будьяких двох точках потоку різницю рівнів і час проходження рідиною шляху між цими точками. Спостереження можна провадити між двома контрольними свердловинами,

спущеними в ґрунтовий потік, або між контрольною свердловиною та колодязем, з якого відкачують воду. Цей самий метод дослідження можна застосувати і там, де ґрунтовий потік має великий спад, у місцях виклинювання, а також там, де можна ґрунтовий потік вивести на денну поверхню (на схилах балок, долин і т. д.).

§ 1. Загальне визначення K

Хай ми маємо будьякі дві спостережні точки, віддаль між якими дорівнює a , а різниця рівнів яких $h_2 - h_1 = \Delta h$.

Спад рівня Δh на одиницю довжини a являє собою гідравлічний градієнт, який буде $I = \frac{\Delta h}{a}$. Очевидно, що дійсна швидкість фільтрації часточки рідини в порах ґрунту дорівнюватиме дійсному коефіцієнту фільтрації $K_p = \frac{K}{p}$, помноженому на ухил, тобто

$$V_p = K_p I = \frac{K}{p} I = \frac{K}{p} \frac{\Delta h}{a},$$

де:

p — активна пористість ґрунту;

K — зведений коефіцієнт фільтрації.

При дослідженнях, застосовуючи різні індикатори, встановлюють час t , протягом якого частки рідини пройдуть шлях між двома спостережними точками. Визначивши цей час, можна визначити також швидкість проходження одиниці шляху із співвідношення

$$V_p = \frac{a}{t}.$$

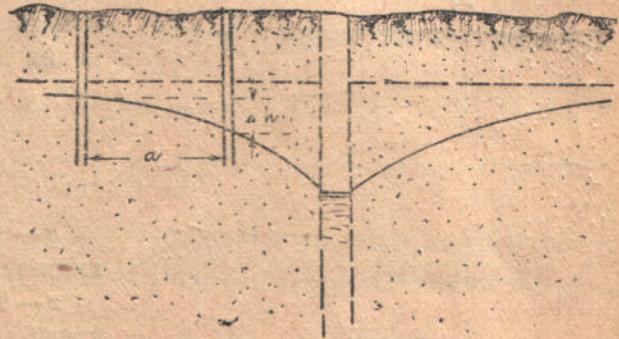


Рис. 23.

Порівнюючи між собою вирази для швидкостей, маємо:

$$\frac{K}{p} \frac{\Delta h}{a} = \frac{a}{t},$$

звідки можна визначити зведений коефіцієнт фільтрації ґрунту:

$$K = \frac{pa^2}{t\Delta h}. \quad (90)$$

Цю формулу можна легко застосовувати в різних випадках дослідницької практики.

Якщо швидкість V руху ґрунтових вод визначена способом Сліхтера, то формулу можна написати так:

$$K = \frac{p \cdot V_p \cdot a}{\Delta h}, \quad (91)$$

де

$$V_p = \frac{a}{t}.$$

Ці рівняння мають широке застосування в різних випадках дослідницької практики. Недоліки цих рівнянь полягають в тому, що вони виведені на основі осереднення градієнту ($I = \frac{\Delta h}{S}$) між двома контрольними точками і не враховують нерівномірності руху ґрунтового потоку. В дійсності градієнт в різних точках кривої депресії між тими ж контрольними точками буде різний, а тому і швидкість руху часточок води буде змінна. Це рівняння не урахує різниці в русі між плоско-паралельним потоком та потоком, що рухається радіально до колодязя, де буває згущення ліній течії рідини. У зв'язку з тим, що цей схематичний вираз не може претендувати на універсальність, ми наводимо нижче рівняння з виводом їх для найбільш поширених випадків дослідницької практики.

§ 2. Визначення K для плоского потоку

Розгляньмо плоску задачу й віднесімо всі міркування щодо руху води до одиниці ширини ґрунтового потоку перпендикулярно до розрізу (рис. 24).

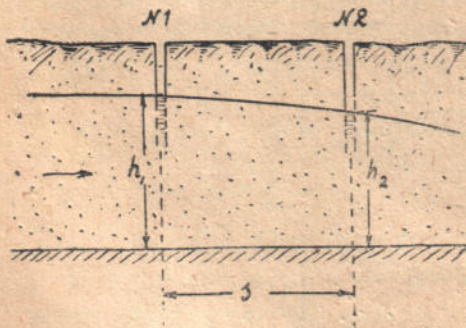


Рис. 24.

Середня зведена швидкість руху води в будьякому перерозі на основі рівняння нерозривності буде:

$$V = \frac{q}{z},$$

де:

q — витрата потоку на одиницю ширини;

z — змінна ордината кривої депресії.

Визначаючи через p — активну пористість породи, одержимо для середньої швидкості руху води в порах породи таке рівняння:

$$V_p = \frac{V}{p} = \frac{q}{z \cdot p}. \quad (92)$$

В це рівняння треба підставити відомі значення для q та z , що їх вивів Дюпюї для плоского потоку, а саме для витрати води на одиницю ширини потоку:

$$q = K \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2S} \quad (93)$$

і для рівняння кривої депресії:

$$z = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{S} x}, \quad (94)$$

де h_1 і h_2 — глибини води за даними вимірів контрольних свердловин. Таке підставлення дає рівняння для швидкості руху води в порах:

$$V_p = \frac{K(h_1^2 - h_2^2)}{2pS \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{S} x}} \quad (95)$$

З другого боку, ту ж таки швидкість фільтрації в порах породи можна уявити, як відношення довжини пройденого водою шляху до його тривалості:

$$V_p = \frac{dx}{dt}. \quad (96)$$

Дорівнюємо значення швидкостей (95) та (96) і відокремлюємо змінні

$$K \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2pS} dt = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{S} x} \cdot dx.$$

Інтегрування цього виразу дасть:

$$\frac{K(h_1^2 - h_2^2) t}{2pS} = -\frac{2}{3} S \frac{\left(h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{S} x\right)^{\frac{3}{2}}}{h_1^2 - h_2^2} + C.$$

На початку спостереження, коли $t=0$ і $x=0$, рівняння дасть:

$$C = \frac{2}{3} \cdot \frac{S \cdot h_1^3}{h_1^2 - h_2^2},$$

отже воно після відповідних перетворень матиме вигляд:

$$K \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2pS} t = \frac{2}{3} \frac{S}{(h_1^2 - h_2^2)} \left[h_1^3 - \left(h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{S} x \right)^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (98)$$

Для визначення звідси коефіцієнта фільтрації породи за двома контрольними свердловинами треба подане рівняння розв'язати відносно K , приймаючи $x=S$. Тоді маємо:

$$K = \frac{4}{3} \cdot \frac{S^2 p}{t} \cdot \frac{(h_1^3 - h_2^3)}{(h_1^2 - h_2^2)^2}. \quad (98)$$

Час t , за який вода проходить шлях S між двома контрольними свердловинами, визначається експериментально.

§ 3. Визначення K на основі часу просування води в сфері діяння ґрунтового колодязя

Під час відкачування води з колодязя біля останнього утворюється депресійна лійка. Ця лійка буде симетричною, коли ґрунт та умови припливу води до колодязя будуть з усіх його боків однакові. Швидкість фільтрації води в порах ґрунту може бути показана такими двома співвідношеннями:

$$V_p = \frac{dr}{dt} \quad \text{і} \quad V_p = \frac{Q}{2\pi r z p}, \quad (99)$$

де Q — дебіт колодязя;

$2\pi rz$ — змінна фільтруюча циліндрична поверхня¹ (рис. 25).

Через те, що ці швидкості однозначні, їх можна прирівняти:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Q}{2\pi rzp} \quad (100)$$

Рівняння кривої депресії повинне задовольняти всі точки рівня. Тоді для контрольної свердловини, встановленої від осі колодязя на віддалі r_1 , з глибиною потоку h_1 , рівняння кривої депресії буде:

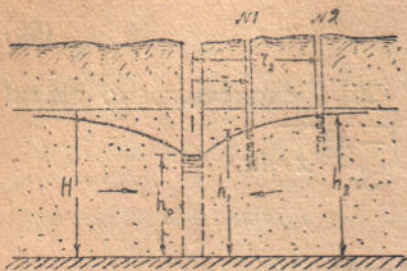


Рис. 25.

$$z = \sqrt{h_2^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r_1}{r}} \quad (101)$$

Підставляючи значення z в рівняння (100) і відокремлюючи змінні, одержимо:

$$dt = \frac{2\pi p}{Q} \sqrt{h_2^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r_1}{r}} \cdot r dr.$$

Це диференціальне рівняння можна інтегрувати лише наближеним методом.

У зв'язку з тим, що логарифмічний ряд дуже повільно сходиться, доводиться відмовитися від математичного розв'язання рівняння.

Розв'язання цієї задачі проводимо на основі рівняння (99), надаючи йому вигляду в кінцевих різницях.

Частки води проходять шлях $\Delta r = r_2 - r_1$ між двома свердловинами за певний час t із швидкістю

$$V_p = \frac{r_2 - r_1}{t}.$$

Середня фільтруюча циліндрична поверхня $2\pi rz$ буде:

$$2\pi \left(\frac{r_2 + r_1}{2} \right) \cdot \left(\frac{h_2 + h_1}{2} \right) = \frac{\pi}{2} (r_2 + r_1) (h_2 + h_1),$$

а середня швидкість фільтрування в порах між двома свердловинами

$$V_p = \frac{2Q}{\pi p (r_2 + r_1) (h_2 + h_1)}.$$

Порівнюючи значення цих швидкостей, одержимо:

$$\frac{r_2 - r_1}{t} = \frac{2Q}{\pi p (r_2 + r_1) (h_2 + h_1)} \quad (102)$$

У цьому рівнянні витрату води Q можна виключити, підставляючи замість Q для ґрунтового колодязя відоме рівняння Дюпюї:

$$Q = \frac{\pi K (h_2^2 - h_1^2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (103)$$

Коли провести це підставлення і розв'язати рівняння відносно K , то одержимо:

$$K = \frac{p(r_2^2 - r_1^2) \ln \frac{r_2}{r_1}}{2t(h_2 - h_1)}. \quad (104)$$

Користуючись цим рівнянням і знаючи час t проходження водою віддалі між двома контрольними свердловинами, визначаємо коефіцієнт проникності ґрунту.

Коли спостереження проводять лише над одною контрольною свердловиною та колодязем, то в рівнянні (104) треба прийняти:

$$r_2 = r_1, \quad r_1 = r_0, \quad h_2 = h_1 \text{ і } h_1 = h_0.$$

§ 4. Визначення K на основі часу просування води в сфері діяння артезіанського колодязя

Аналогічно до попереднього напишемо спочатку вирази для швидкості фільтрації в порах ґрунту;

$$V_p = \frac{dr}{dt} \text{ та } V_p = \frac{Q}{2\pi r a p},$$

де p — активна пористість ґрунту;

$2\pi r a$ — змінна фільтруюча циліндрична поверхня (рис. 26).

Привівнявши між собою вираз для швидкості фільтрації:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Q}{2\pi r a p}$$

і відокремивши змінні:

$$dt = \frac{2\pi r a}{Q} r dr,$$

інтегруємо рівняння для r в границях від r_1 до r_2 і для t — в границях від 0 до t :

$$\int_0^t dt = \frac{2\pi a p}{Q} \int_{r_1}^{r_2} r dr.$$

Одержуємо:

$$t = \frac{\pi a p}{Q} (r_2^2 - r_1^2).$$

Підставивши в це рівняння замість Q його вираз з рівняння

$$Q = \frac{2\pi a K}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (h_2 - h_1),$$

одержимо:

$$t = \frac{p}{2K} \frac{r_2^2 - r_1^2}{h_2 - h_1} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

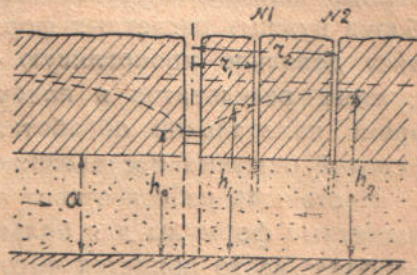


Рис. 26.

Вимірявши в артезіанському колодязі по двох спостережних свердловинах час t просування часточок рідини, ми можемо, знаючи величини радіусів глибин та пористості, визначити зведений коефіцієнт фільтрації ґрунту з формули:

$$K = \frac{p}{2t} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{h_2 - h_1} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (105)$$

При спостереженні по одній контрольній свердловині та колодязю треба в формулі (105) покласти:

$$r_2 = r_1, r_1 = r_0, h_2 = h_1 \text{ і } h_1 = h_0.$$

Резюме

Для определения коэффициента проницаемости пород при обработке полевых гидрогеологических исследований необходимо произвести выбор методов определения и расчетных зависимостей. Ввиду большого разнообразия методов приходится наталкиваться на большие затруднения при выборе того или иного метода или расчетной формулы. Надо сказать, что систематизированный материал по этому вопросу отсутствует и техническому персоналу (гидрогеологам и гидротехникам) приходится обращаться к разрозненным литературным источникам, часто друг другу противоречащим. Отыскание соответствующей литературы, разбор таковой, выборка нужных расчетных формул и унификация размерностей представляет довольно кропотливую работу. Случается, что эта работа не дает нужных результатов и подсчеты оказываются неверными, так как во время камеральной обработки были упущены какие-либо особенности условий опытных исследований.

Настоящая работа ставит своей задачей собрать и систематизировать расчетные формулы для большинства тех случаев практики, с которыми наиболее часто придется иметь дело работникам исследовательских партий. Для этого автору пришлось сделать соответствующий подбор расчетных формул из советской и иностранной литературы, в основном тех, которые в той или иной мере выдерживают критику, а также и произвести вывод целого ряда формул для различных случаев практики.

При группировке формул принята определенная классификация колодцев, которые разделены на грунтовые, артезианские и грунтово-артезианские.

Под термином „грунтовые колодцы“ обычно подразумевают такие колодцы, при работе которых движение воды происходит при наличии свободной поверхности, т. е. кривой депрессии. В противоположность этим колодцам будем различать артезианские, или так называемые (по старой терминологии) напорные колодцы. Движение воды при работе этих колодцев происходит в водном слое, заключенном между водонепроницаемыми пластами, где вода находится под гидростатическим давлением, образуя кривую пьезометрических напоров. Если уровень воды в артезианском колодце

при откачке будет ниже верхнего водоупорного пласта, то возможно существование обоих видов движения жидкости—со свободной и несвободной поверхностью: такой колодец называется грунтово-артезианским.

Грунтовые, артезианские и грунтово-артезианские колодцы в свою очередь можно разделить на совершенные и несовершенные колодцы, в зависимости от глубины колодца в проницаемом слое и расположения его фильтрующих частей.

Совершенными, или полными, колодцами называют такие, которые опущены до водонепроницаемого пласта, подстилающего грунтовый поток, и стенки которого по всей высоте в грунтовом потоке проницаемы для воды.

Несовершенными, или неполными колодцами называют колодцы, дно которых не доходит до водонепроницаемого пласта, подстилающего водоносный слой: стенки такого колодца могут быть проницаемы для воды или полностью, или частично по глубине колодца. Питание колодца может происходить через дно и стенки или только через дно, или только через стенки. По характеру питания колодцы могут быть подразделены на водоотдающие и водопоглощающие. Водоотдающими называют такие колодцы, в которые поступает вода из водоносного слоя, при производстве из них откачек. Водопоглощающими, или [абсорбирующими, называют колодцы, которые поглощают водоносным слоем наливаемую в них с поверхности воду.

В зависимости от фильтрационных особенностей перечисленных видов колодцев, методы их расчета будут различны.

При пользовании уравнениями следует иметь в виду, что в настоящей работе всюду дан приведенный коэффициент фильтрации грунта — K . При желании перейти к действительному коэффициенту фильтрации — K_p (отношенному к порам грунта), надо приведенный коэффициент фильтрации разделить на активную порозность грунта — p , т. е. $K_p = \frac{K}{p}$.

Размерность величин при пользовании уравнениями должна быть принята однородной, например, K в $см/сек$, Q в $см^3/сек$, t в $сек$; H , h , S , r_0 , R и др. — в $м$ или все величины — в $м/сек$, $м^3/сек$ и $м$. При несоблюдении в уравнениях однородной размерности правильность пользования ими нарушается. Следует иметь также в виду, что в уравнениях фигурирует натуральный логарифм чисел — $\ln N$. При пользовании логарифмической линейкой или данными таблиц логарифмов, где даются десятичные логарифмы, логарифм взятого числа надо умножить на модуль 2,3 (точнее 2,303), так как $\ln N = 2,3 \lg N$.

Определение коэффициента проницаемости водоносных пород совершенными грунтовыми колодцами, доходящими до водонепроницаемых пластов с проницаемыми по всей высоте в водоносном слое для воды стенками, производят по формулам Дюпюи—Тима, Смрекера и Шези, в зависимости от скважности породы.

При фильтрации воды в пористых грунтах применяют общеизвестные формулы Дюпюи—Тима: формулу (1)—для водоотдающих колодцев, а формулу (2)—для водопоглощающих.

При фильтрации воды в гравелистых породах применяют формулы Смрекера. Определение коэффициента фильтрации производят в такой последовательности. Вначале по формуле (4) находят коэффициент m , решая уравнение графическим путем, затем вычисляют коэффициенты C_1 и C_2 по уравнению (3) для двух понижений уровня h_1 и h_2 в контрольной скважине, при двух последовательных откачках воды из колодца Q_1 и Q_2 . Взяв затем среднее арифметическое коэффициентов C , по формуле (5) определяют коэффициент фильтрации породы. Если исследование производят водопоглощающими колодцами, то те же вычисления делают по формулам (7), (6) и (5).

Для трещиноватых пород пользуются формулами Шези: если колодец водоотдающий, то формулами (8), (9), а если водопоглощающий — (10), (11).

Все эти уравнения выведены на основе общеизвестных законов движения подземных вод гидравлическим путем и в достаточной степени оправданы применением на практике.

В работе приведены формулы для определения коэффициента фильтрации пород при исследовании с помощью несовершенных колодцев, т. е. таких колодцев, у которых дно не доходит до водонепроницаемого пласта. Стенки колодца могут быть проницаемы для воды частично или полностью по глубине, и питание такого колодца может происходить через дно и стенки, или только через дно, или только через стенки. При откачке воды из несовершенного колодца приток воды к колодцу будет происходить не со всей толщи водоносного пласта, а в пределах некоторой глубины слоя, которую называют активным водоносным слоем. Глубину активной зоны H_0 можно определить из таблицы Е. А. Замарина и по уравнению П. И. Шипенко.

Для колодца, работающего дном и стенками, Форхгеймер предложил эмпирическую формулу, выражающую зависимость между величинами понижения совершенного и несовершенного колодцев при условии одинакового забора из них воды. Совмещение формул Форхгеймера с формулой Дюпюи дает уравнение (12) для определения коэффициента фильтрации пористых пород с помощью водоотдающих колодцев и уравнение (13) — водопоглощающих колодцев. Глубину активной зоны, входящую в эти уравнения, можно определить из соотношений Е. А. Замарина или подбором по формуле П. И. Шипенко. Помимо этого уравнения в работе приведена формула Кожени, которую автор предложил для колодца, питающегося через дно и стенки. Однако это уравнение едва ли в практике встретит широкое применение, ввиду своей громоздкости и большого количества разнообразных вычислений. Для колодцев, питающихся через дно и стенки, можно составить уравнение из уравнений при фильтрации через дно. В зависимости от очертания фильтрующего дна колодца приток воды к колодцу будет меняться, а потому определение коэффициента фильтрации грунта можно производить: при полушаровом дне колодца — по уравнению (14), при плоском дне — по уравнению (14а) и при дне эллиптическом — по уравнению (14б).

При питании несовершенного колодца через стенки задачу по определению активной зоны, в пределах которой происходит питание колодца водой, можно решать по-предыдущему. Правда, глубины активной зоны для колодца, питающегося через дно и стенки, и колодца, питающегося через стенки, будут различны, но из-за отсутствия каких-либо по этому вопросу эмпирических зависимостей приходится применять соотношения Е. А. Замарина или формулу П. И. Шипенко, отбрасывая в ней под корнем член $0,5 r_0$, который учитывает питание через дно.

На основе своих опытов Форхгеймер установил зависимость, выражающую соотношение между величинами понижения совершенного и несовершенного водоотдающих колодцев, питающихся только через стенки, при условии одинакового забора из них воды. Совмещая формулу Форхгеймера с формулой Дюпюи, получим уравнение, по которому можно определить коэффициент фильтрации грунта с помощью несовершенного, питающегося через стенки, колодца. Свое уравнение Форхгеймер дал для водоотдающего колодца, однако нами оно распространяется и на колодцы водопоглощающие.

Для водоотдающего несовершенного, питающегося через стенки, колодца определение K производится по формуле (15), а для водопоглощающего — по формуле (16). Помимо уравнений Форхгеймера в работе приведена формула Кожени. Для водоотдающих колодцев определение коэффициента фильтрации грунта можно производить по уравнению Кожени (17) или же по уравнению (17а), где коэффициент A берется из таблиц Кожени. Для водопоглощающих колодцев расчет производится по уравнению (18). Вычисленные по формулам Форхгеймера и Кожени числовые величины имеют весьма небольшие расхождения, а потому можно пользоваться одной из них. Однако значительно проще производить вычисления по формуле Кожени, где не надо вычислять глубины активного слоя, поскольку она учитывается коэффициентом A . Подсчет по формуле Форхгеймера значительно сложнее, чем по формуле Кожени.

Если определение коэффициента фильтрации грунта производится с помощью колодца, работающего дном, то все выше приведенные формулы для этого случая неприменимы. Для такого колодца, при свободном уровне и водоносном слое ограниченной мощности, Кожени предлагает приближенное уравнение (19).

Форхгеймер для колодцев, питающихся через плоское дно, при безграничном водоносном слое допускает пользование уравнением (20), которое выведено им для такого же колодца при несвободном уровне воды. Применение этого уравнения дает не совсем верные результаты, так как для потока со свободной и несвободной поверхностью движение жидкости (распределение давлений, скоростей, их направлений) будет различно. Применение этой формулы для рассматриваемого случая даст лишь грубо приближенное значение коэффициента фильтрации. Форхгеймер предлагает и другое уравнение для определения коэффициента фильтрации, который может быть подсчитан посредством эксплуатации установки. При откачке (или наливании) некоторого расхода воды в грунт

товом потоке может быть зафиксирован уровень воды в данный момент времени t_1 в какой-либо точке. Если прекратить или внезапно пропустить мощную откачку воды, то уровень для момента t_2 изменится. Подсчитывая объем воды в порах грунта в пределах этих двух положений кривой депрессии (с учетом колебания уровня воды в колодце), Форхгеймер выводит уравнение для определения проницаемости грунта с помощью эксплуатации установки. Выведенное Форхгеймером уравнение получилось громоздким и подсчет по нему довольно кропотлив, но пользование им дает весьма хорошие практические результаты.

Артезианской называют такую воду, которая находится в водоносном слое между водонепроницаемыми пластами и дает пьезометрический уровень, превышающий геометрическую высоту верхнего пласта. Опущенный в такой водоносный слой колодец называют артезианским, различая, аналогично предыдущему, артезианские совершенные и несовершенные колодцы.

Для определения коэффициента фильтрации грунта с помощью совершенного артезианского колодца можно воспользоваться формулами Дюпюи, Смрекера и Шези, в зависимости от скважности породы, в которой происходит движение подземной воды. При фильтрации в пористых грунтах применяют формулу Дюпюи. Для водоотдающего колодца подсчет производят по формулам (21) и (21а), а для водопоглощающего — по формуле (22). Если движение воды происходит в скважных породах и при таких градиентах, где уравнение Дюпюи нарушается, то подсчет коэффициента фильтрации следует вести по формулам Смрекера. Вначале определяют коэффициент m по формуле (24), затем коэффициенты C_1 и C_2 — по формуле (23) для двух понижений уровня воды в наблюдательной скважине при дебитах Q_1 и Q_2 , после чего среднее значение C — по формуле (25) и коэффициент фильтрации K — по уравнению (26).

Для артезианских колодцев в трещиноватых породах подсчет производят по формуле Шези: для водоотдающего колодца — по формулам (27) и (27а) или по упрощенному уравнению (28), а для водопоглощающего колодца — по уравнению (29).

На практике приходится весьма часто иметь дело с артезианскими несовершенными колодцами. Вначале приведем уравнения для колодца, проходящего не через всю толщу водоносного слоя (черт. 10). Расчет таких колодцев, как указывает Кожени, можно производить при помощи точного решения формулы течения Муската, которая последним предложена для установления распределения электрического потенциала в широких цилиндрических пластинках при частично проникающем электроде. Окончательная формула для потока ее при практическом применении оказывается однако весьма сложной. Кожени предлагает эмпирическую формулу, которая дает результаты, весьма близко отвечающие данным вычислений по Мускату. Объединяя эту формулу с формулой Дюпюи для артезианского колодца, Кожени получает формулу для определения дебита несовершенного артезианского колодца. Решение этого уравнения относительно K дает для определения коэффициента фильтра-

ции грунта уравнение (31), где коэффициент A дается уравнением (30). Это уравнение Кожени является пока единственным в литературе. Применение его дает хорошие, согласующиеся с практикой результаты.

На практике может быть случай, когда артезианский колодец работает только дном. Если колодец опущен через водонепроницаемый пласт и доведен до верха водоносного слоя, в котором вода находится под гидростатическим давлением, то питание такого колодца будет происходить только через дно, так как стенки находятся в водонепроницаемом пласте. Производительность такого колодца при одном и том же понижении уровня будет меняться в зависимости от очертания граничной фильтрующей поверхности и связана с наименьшим выходным сечением. Колодец может иметь у дна сетку, препятствующую выносу в колодец грунта, но может и не иметь ее. Сетка колодца может быть самой разнообразной формы: полушаровая, эллиптическая или плоская. Расчетные формулы для этих случаев будут различными, почему они и приводятся в тексте. Если артезианский колодец имеет полушаровую поверхность фильтрующего дна, то определение коэффициента фильтрации водоотдающим колодцем в пористых грунтах производят по формуле (32) или (33), а водопоглощающим колодцем — по уравнению (34) или (35).

Для такого же колодца в гравелистых породах нами выведено уравнение на основании закона Смрекера. Вычисление коэффициента фильтрации грунта производится по формуле (36), для которого коэффициент m находится из уравнения (37).

Получив два значения коэффициента фильтрации для двух откачек Q_1 и Q_2 , можно взять среднее арифметическое для коэффициента фильтрации.

Для такого же колодца в трещиноватых породах определение коэффициента фильтрации производится по уравнению (38).

Если колодец имеет плоское фильтрующее дно или вообще лишен сетки в дне, предохраняющей от поступления грунта в колодец, то формулы будут иные.

Поступление воды в такой колодец будет происходить через меньшую фильтрующую поверхность, нежели в предыдущем случае, и приток воды, при одном и том же понижении, будет меньше. Форхгеймер математически разобрал этот случай для движения воды в пористых грунтах на основе закона Дарси, и для определения коэффициента фильтрации пришел к уравнению (40), а при замере уровня воды в контрольной скважине — к уравнению (41). Обычно в средних по проницаемости грунтах происходит вымывание частичек грунта у дна колодца, благодаря чему образуется некоторая вогнутая в грунт граничащая фильтрующая поверхность, представляющая как бы полуэллипсоид вращения.

В том случае, если фильтрующее дно колодца имеет эллиптическую форму (с фильтрующей поверхностью, примерно средней между полушаровой и плоской), то расчетную формулу можно написать, взяв среднее значение дебитов по формулам (33) и (40), и определение коэффициента фильтрации производить по формуле (42).

Для колодца, работающего дном, при граничной глубине водоносного слоя, определение коэффициента фильтрации можно производить по уравнению (43), которое дает Тевене. Хотя вывод этого уравнения имеет под собою шаткое теоретическое основание (в части составления дифференциального уравнения), но некоторые авторы его считают его достаточно хорошо отражающим данные опыты и вполне пригодным для практических подсчетов.

Для артезианского колодца, опущенного ниже водонепроницаемого пласта и работающего дном и стенками, К. И. Добровольский выводит уравнение для пористых и трещиноватых пород большой мощности.

Теоретические основы Добровольского следующие. Он предполагает, что фильтрующая поверхность имеет форму, близкую к полуэллипсоиду вращения. Эту поверхность он составляет из цилиндра — при фильтрации через бока колодца и из полушаровой поверхности — при фильтрации через дно колодца.

Для определения коэффициента фильтрации пористых грунтов Добровольский дает уравнения (44) и (45), но в последнем надо знать величину R , которую следует определять в каждом отдельном случае из кубического уравнения Добровольского.

Для трещиноватых пород К. И. Добровольский предлагает коэффициент проницаемости породы определять по уравнению (45).

Коэффициент фильтрации грунта может быть определен по восстановлению уровня воды в колодце по прекращении кратковременной откачки. Форхгеймер приводит такой пример для артезианского колодца, питающегося через плоское дно. Определение коэффициента фильтрации может быть произведено по уравнению (46), если сделаны замеры двух положений уровней воды в колодце и период, за который произошло восстановление уровня по прекращении кратковременной откачки.

Рассмотрим расчетные уравнения для грунтово-артезианских колодцев. Предыдущие уравнения для совершенных и несовершенных артезианских колодцев будут справедливы лишь для такого понижения уровня воды в колодце, при котором пьезометрическая высота будет превышать нижнюю границу верхнего водопроницаемого пласта. Если производится непрерывная, длительная и мощная откачка воды из колодца, то уровень в нем может опуститься ниже верхнего водоупорного пласта. В том участке, где пьезометрическая высота превышает верхнюю границу водоносного пласта, движение воды будет происходить при наличии кривой пьезометрического напора, а на участке вблизи колодца — при наличии свободной поверхности, почему колодец нами и назван грунтово-артезианским. Расчетная формула для определения коэффициента фильтрации водоносного слоя может быть составлена из уравнений движения для области со свободной и несвободной поверхностями.

Для пористых грунтов, где применим закон Дарси, коэффициент фильтрации грунта может быть определен по уравнению (47). Если одна контрольная скважина установлена в области воды грунтовой, а другая —

в области воды артезианской, то следует применять уравнение (47а). Если обе наблюдательные точки расположены в области артезианской воды, то подсчет следует вести по формуле (19), если же они расположены в области воды, где движение происходит со свободной поверхностью, то — по формуле (1).

Для грунтово-артезианского колодца в гравелистых породах уравнения выводят на основании закона Смрекера, рассматривая вопрос совершенно аналогично предыдущему.

По полученным уравнениям вычисление производят следующим образом. Вначале определяют коэффициент m по уравнению (50), решая последнее графическим способом, аналогично решению по уравнению (4) (черт. 4). Затем определяют коэффициенты C_1 и C_2 для двух откачек по формуле (49), вычисляют их среднее арифметическое и по формуле (5) находят искомое значение коэффициента фильтрации породы. Этот подсчет по определению коэффициента фильтрации справедлив лишь в том случае, если контрольная скважина, по которой производится измерение уровня, находится в водоносном слое, где имеет место кривая депрессии. В том случае, если контрольная скважина установлена в области воды артезианской, формулы для определения коэффициента фильтрации будут иные и подсчет по ним производится следующим образом. Вначале определяют коэффициент m по уравнению (53), путем графического его решения, далее находят коэффициенты C_1 и C_2 для двух откачек по уравнению (52), и по среднему их значению определяют коэффициент фильтрации по формуле (5).

Для такого же колодца в трещиноватых породах подсчет проницаемости породы производится по формулам (56) и (57). В том случае, если обе наблюдательные скважины расположены в области воды грунтовой, вычисление производим по формуле (8), а если обе скважины находятся в области воды артезианской, то — по формуле (27).

На практике весьма распространено исследование фильтрационных свойств грунта с помощью водопоглощающих шурфов. Однако, при обработке материала исследователю приходится испытывать большие затруднения в выборе расчетной формулы для определения по данным наблюдений коэффициента фильтрации грунта. Различные исследователи, как то Болдырев, Вайполин, Перышкин, Семенов, Троянский, Новиков, Добровольский, Замарин, Биндеман и автор, предлагают различные методы определения коэффициента фильтрации грунта. Все эти методы весьма разнообразны и дают самые разнородные значения для коэффициента фильтрации. Не останавливаясь на первых шести методах определения, которые, на наш взгляд, не дают правильной постановки и толкования вопроса, нами приведено краткое описание последних четырех методов.

К. И. Добровольский для определения коэффициента фильтрации грунта переносит формулы водоотдающего артезианского колодца, работающего дном, при полушаровой его поверхности, на водопоглощающие шурфы. Таким образом, согласно методу Добровольского формула (32),

при взаимной перестановке глубин, определяет K для пористых грунтов по данным наблюдений в двух контрольных скважинах.

Для пограничных значений Добровольский дает уравнение (58), в котором R определяется по формуле (59).

Для определения коэффициента проницаемости трещиноватых пород водопоглощающими шурфами Добровольский дает уравнение (60). Отметим, что в применении к шурфам эти формулы являются неточными. Во-первых, при выводе уравнения принято, что живое сечение представляет собою полусферическую поверхность, между тем, как в действительности оно значительно меньше. Во-вторых, граничное сечение при $r=r_0$ по уравнению будет представлять собою также полусферическую поверхность, между тем как в действительности оно плоское и является дном шурфа. В-третьих, при достижении водой, фильтрующейся из шурфа, горизонта грунтовых вод или водонепроницаемого пласта произойдет перераспределение давлений, скоростей и их направлений, почему принятое Добровольским полушаровое сечение потока изменится. Отмеченные недостатки написанных уравнений указывают на необходимость осторожности в применении формул, которые могут дать лишь приближенную характеристику для K .

Е. А. Замарин, рассматривая неустановившееся фильтрационное движение воды, поступающей из шурфа в грунт, делает предположение, что, исключая сильно проницаемые грунты, растекание воды будет весьма близко к форме шара. Поступающая в грунт вода будет перемещаться в соответствующие моменты времени на некоторую величину, занимая положение I, II, III и т. д. (черт. 18). При этом Замарин предполагает, что градиенты, отнесенные к этим моментам времени, можно выразить уравнением (61). Скорость растекания воды можно подсчитать, зная пройденный жидкостью путь и моменты времени по формуле (62). По найденным скоростям и уклонам определяется коэффициент фильтрации грунта из соотношения (63). Определение коэффициента фильтрации основано на том предположении, что подаваемая в шурф вода поглощается свободными порами грунта в объеме шаровой формы растекания. Объем свободных пор грунта, например между кривой I и кривой II, считается равным количеству воды, просочившейся в грунт, в пределах положений I и II фильтрационного движения. Вместо (62) можно, по Замарину, подсчитать средние скорости фильтрации следующим образом. Например, средняя скорость движения от кривой I до кривой II находится из отношения впитанного количества воды к произведению времени просачивания и арифметической средней поверхности I и II: $V = \frac{W}{t \cdot F_{cp}}$. Для определения сферы растекания в тексте приводится уравнение, которое дается Замариным.

Подходя критически к приведенному методу, можно сказать следующее. В основу своего рассмотрения Замарин кладет предположение о наличии шаровой формы растекания фильтрационной воды, между тем как в действительности эта форма может быть самая различная. Градиент Зама-

рин вычисляет для середины шурфа в наиболее оттянутой части сфер и распространяет величину градиента на всю шаровую поверхность фильтрационного движения. Несмотря на эти недостатки и кропотливость метода, им все же можно пользоваться с достаточной для практических целей точностью, получая при этом довольно хорошие результаты. Для проницаемых песков этот метод непригоден, так как форма фильтрационного потока будет сильно вытянута вниз.

Н. Н. Биндеман, считая метод Замарина в основном правильным, расширяет исследование вопроса, учитывая расход на капиллярное рассасывание и принимая, на основе своих опытов, увлажненную поверхность за эллипсоид вращения. Этот эллипсоид в песчаных грунтах вытянут вниз, а в глинистых приплюснут. Его формирование происходит под влиянием гравитационных и капиллярных сил. Просачиванию воды в грунт оказывают сопротивление как находящийся в порах воздух, так и трение жидкости о поверхность скелета грунта. По прекращении капиллярного подъема и достижении предела горизонтальных размеров эллипса, правильность его нарушается: форма становится яйцевидною, вытянутою вниз. Биндеман отмечает, что при стабилизации горизонтальной оси эллипса, расход воды из шурфа устанавливается постоянным. Он объясняет это тем, что в формуле $Q = K\omega I$ при малой глубине воды в шурфе градиент изменяется ничтожно, а потому при постоянных Q , K и I сечение потока ω , взятое нормально направлению струй, остается постоянным. Для этой величины живого сечения гравитационного потока Биндеман дает уравнение (64). Далее — составляет уравнение для определения коэффициента фильтрации грунта, пользуясь уравнением Цункера, учитывая сопротивление воздуха в порах грунта и капиллярное рассасывание. Получив на основе этого уравнение (69), Биндеман определяет величину среднего градиента, действующего при инфильтрации через сечение ω , и среднюю длину пути фильтрации (уравнение 70). Заменяя затем скорость фильтрации отношением расхода к площади сечения, Биндеман получает для определения коэффициента фильтрации грунта уравнение (71). Для песка, в котором можно пренебречь капиллярными силами, Биндеман дает упрощенную формулу (72). Сам автор отмечает, что при достижении горизонтальных пределов увлажнения, правильность эллипсоида вращения нарушается и форма смачивания становится яйцевидною. В этом случае пользование формулами (71) и (72) будет неверным, так как они выведены из формы смачивания эллипсоида и не могут быть применены к иной форме, имеющей в большинстве случаев практики самый разнообразный вид. В основном метод Биндемана правильно учитывает элементы движения воды при инфильтрации из шурфа, но основной недостаток его тот, что он весьма кропотлив, требует значительных подсчетов и вряд ли найдет себе применение при массовых расчетах.

Автор настоящей работы для определения коэффициента фильтрации грунта шурфами рассматривает процесс движения фильтрационной воды из шурфа в грунт и выводит уравнение движения гидравлическим путем. Поступающая из шурфа вода будет фильтроваться в грунт, опускаясь вниз

под действием силы тяжести и растекаясь при этом в стороны. Этот процесс движения может быть различной продолжительности, в зависимости от сочетания различных условий, но будет происходить до тех пор, пока фильтрационные воды не достигнут потока естественных грунтовых вод или водонепроницаемого пласта. При слиянии неустановившегося потока, идущего из шурфа, с потоком грунтовых вод, в последнем нарушаются условия установившегося движения, благодаря чему будет иметь место резкое перераспределение давлений, скоростей и направлений движения. Через некоторый промежуток времени, при растекании воды в стороны, свободная поверхность потока станет выравниваться, и между фильтрационным током воды из шурфа и естественным грунтовым потоком наступит закономерная связь. Если к этому моменту отнести наблюдение уровней воды в контрольных скважинах и измерение расхода, то возможно с достаточной для практических целей точностью определить коэффициент фильтрации грунта. При такой постановке задачи можно не определять расход на капиллярное рассасывание воды, так как капиллярный слой будет главным образом рассасываться за счет поступления воды в первый момент времени инфильтрации. Если даже в последующий момент времени и будет капиллярный расход, то сравнительно с фильтрационным расходом он будет незначителен и им можно вполне пренебречь. Фильтрационное движение жидкости, начинающее свой путь из шурфа, будет происходить по траекториям, которые весьма близки к линиям тока жидкости вследствие того, что продвижение обратной воронки по радиусу невелико и мало влияет на расход шурфа. Частицы жидкости, движущиеся в области, занятой грунтовым потоком, будут иметь в каждой отдельной точке потока различные скорости как по величине, так и по направлению. Задачу можно решить более строгим гидромеханическим способом, однако мы ограничились лишь гидравлическим рассмотрением вопроса, ориентируясь при этом на приближенную формулу, вполне достаточную для практических приложений.

При решении задачи нами сделан ряд допущений, упрощающих рассмотрение вопроса. Во-первых, глубина воды в шурфе нами непосредственно не рассматривается вследствие того, что она обыкновенно незначительна по сравнению с общей глубиной H . Вторым допущением при гидравлическом рассмотрении вопроса мы считаем приложимость здесь гипотезы плоского сечения. Согласно этой гипотезе, мы полагаем, что поток при растекании в грунт имеет в каком-либо выбранном горизонтальном сечении одинаковые местные вертикальные скорости v_z , которые будут равны средней вертикальной скорости потока V_z . Рассматривая, таким образом, расчетную схему (черт. 20) для произвольного горизонтального сечения ниже дна шурфа, составляем дифференциальное уравнение (73). Движение воды происходит по линии тока, в данном случае искомой линией тока является пограничная поверхность потока — кривая депрессии. Для этой пограничной линии тока по закону Дарси пишем выражение для скорости фильтрации, рассматривая таковую как функцию точки, и находим затем вертикальный компонент v_z полной скорости (выражение 74). Падение

напора dH отвечает для поверхностной линии тока приращению ординаты dz , почему заменяем в этом уравнении $dH = dz$. Для линии тока, не совпадающей с кривой депрессии, это условие писать нельзя. На основе сказанного о гипотезе плоского сечения, получаем выражение (75) для средней вертикальной скорости по сечению и уравнение (76) для расхода.

Для получения отсюда функциональной зависимости для элементов потока уравнение надо проинтегрировать. Однако после интегрирования полученное уравнение относительно K — коэффициента фильтрации — в явном виде не разрешается, почему задачу приходится решать подбором, что весьма кропотливо.

Определение коэффициента фильтрации грунта может быть произведено непосредственно по уравнению (76), для чего последнее надо разрешить относительно K и представить в нем члены $\frac{dz}{dr}$ в конечных разностях.

Получив, таким образом, уравнение (77), надо в нем член r заменить через соответствующие величины радиусов до наблюдательных точек. Рассматривая какие либо два горизонтальных живых сечения потока, отыскиваем такую величину r , чтобы она давала среднюю арифметическую площадь из рассматриваемых двух живых сечений. В этом случае определение коэффициента фильтрации грунта можно производить по формулам (80) и (81).

Входящие в формулу величины: расход, расстояние от оси шурфа до контрольных скважин и разница в них уровней измеряются при производстве опытных исследований. Полученные данные для K по формулам (80) и (81) дают результаты, весьма хорошо согласующиеся с действительными.

На практике довольно часто можно встретить необходимость исследования пластов различной водоотдачи. Если имеется несколько водоносных пластов, для которых требуется определить коэффициент фильтрации грунта, то исследование с помощью колодцев должно производиться с учетом мощности и проницаемости каждого из пластов. Для двух водоносных пластов различной водоотдачи Шульце выводит уравнение для дебита колодца, которое может быть применено соответствующим образом для определения коэффициентов фильтрации этих пород. Для трех водоносных пород различной водоотдачи вывод уравнений сделан автором этой работы, который дает и метод определения коэффициента фильтрации при откачках.

Первоначально осветим, каким образом может быть определен коэффициент фильтрации грунта для двух водоносных слоев разной водоотдачи. Для решения задачи о притоке воды к колодцу Шульце приводит все водоносные слои к одной водопроницаемости и заменяет мощность каждого водоносного слоя эквивалентной, в смысле фильтрации, мощностью. В результате такого рассмотрения из формулы Дюпюи выведено уравнение (82) для дебита колодца в двух пластах различной водоотдачи. Уравнение для дебита такого колодца можно вывести проще, если рассматривать приток воды к колодцу в каждом водоносном слое. Такой вывод приводит к уравнению (83). Хотя выражения (82) и (83)

и различны на вид, но они дают совершенно одинаковый результат, и одно может быть переведено в другое несложными алгебраическими преобразованиями. Для определения коэффициента фильтрации грунта каждого водоносного слоя непосредственно пользоваться уравнением нельзя, так как в него входят оба значения коэффициента фильтрации. Решение уравнения (83) относительно K_1 и K_2 дает выражения (84) и (85). По уравнению (84) можно определить значение K_1 , если будет известен коэффициент фильтрации K_2 , а по уравнению (85) — наоборот. Для определения коэффициентов фильтрации каждого водоносного слоя можно применить два метода — Добровольского и Замарина.

К. И. Добровольский предлагает первоначально определить коэффициент фильтрации грунта нижнего водоносного слоя, а затем — верхнего. Для этого формулу (85) он переписывает в виде выражения (85), и освобождается от второго члена, где стоит значение K_1 . Добровольский указывает, что для этого надо так организовать откачки, чтобы первый член в крайних скобках выражения (85а) был равен единице. Это условие выполняется при $h_0 \approx 2a_2 - H$ и в действительности возможно не всегда, а лишь в тех случаях, когда $2a_2 > H$. При таком понижении уровня член, стоящий в крайних скобках последнего уравнения, будет близок или равен нулю, почему для определения K_2 можно пользоваться формулой (86). Найдя значение K_2 и подставляя его в формулу (84), можно определить коэффициент фильтрации K_1 верхнего водоносного слоя.

Е. А. Замарин для определения коэффициента фильтрации грунта в породах различной водоотдачи предлагает иной метод. Вначале может быть определен коэффициент фильтрации грунта верхнего водоносного слоя с помощью несовершенного колодца. Для этого несовершенный колодец должен быть опущен в верхний водоносный слой так, чтобы при откачке активная зона питания лежала на поверхности раздела водоносным слоем I и II и чтобы колодец питался лишь водой верхнего водоносного слоя. Глубина активной зоны может быть при заданных элементах понижения подсчитана по соотношениям Замарина, которые приведены в гл. I, § 2. По данным откачки можно определить коэффициент фильтрации грунта K_1 , пользуясь соответствующими формулами несовершенного колодца. Затем следует опустить колодец до водонепроницаемого пласта и возобновить откачку. Получив новые элементы (глубины и расходы) при откачке, подставляем их значения в формулу (85) вместе с ранее определенным значением K_1 и вычисляем коэффициент фильтрации грунта K_2 . Если водоносные пласты залегают глубоко и опускание колодца на всю толщу водоносного слоя до непроницаемого пласта при опытных откачках не производится, то расчет производят иначе. Исследование по определению коэффициента фильтрации производят при помощи несовершенного колодца, почему оно в значительной мере усложняется. Коэффициент фильтрации верхнего водоносного слоя определяют по-предыдущему, а вместо определения коэффициента фильтрации нижнего водоносного слоя определяют откачкой из несовершенного колодца водонепроницаемость обоих водоносных слоев. Замарин считает, что для характеристики водо-

отдачи грунта следует углублять колодец постепенно, в несколько приемов, и затем построить по полученным данным кривую изменения коэффициента фильтрации с понижением. При однородном строении нижнего водоносного слоя кривая даст характеристику коэффициента фильтрации грунта, который будет приближаться к значению коэффициента K_2 .

Помимо описанного метода определения коэффициента фильтрации грунта можно применить и такой способ. Определив при помощи несовершенного колодца коэффициент фильтрации первого водоносного слоя K_1 , можно определить количество воды, попадающей в колодец из нижнего водоносного слоя, вычитая для этого расход первого пласта из общего дебита скважины. Зная расход воды нижнего пласта, можно соответствующим подсчетом определить коэффициент фильтрации K_2 .

Определение коэффициента фильтрации трех водоносных слоев разной водоотдачи производится сложнее. Вывод уравнений для трех водоносных слоев аналогичен предыдущему выводу и приводит к уравнению (87) для дебита колодца. В формулу (87) входят все три коэффициента фильтрации и по ней коэффициент фильтрации каждой водоносной породы определить непосредственно нельзя. Практически определение коэффициента фильтрации грунта можно производить следующим образом. Коэффициент фильтрации верхнего водоносного слоя K_1 определяется, как и ранее, несовершенным колодцем, установленным так, чтобы глубина активной зоны была равна a_1 . Затем опускаем колодец во второй водоносный слой так, чтобы глубина активной зоны была равна $a_1 + a_2$. В этом случае по формулам несовершенного колодца можем получить коэффициент фильтрации $K_{1,2}$ — для обоих водоносных слоев I и II. Зная $K_{1,2}$ определим по формуле (85) коэффициент фильтрации K_3 третьего водоносного слоя. Для этого в формуле (85) надо взять вместо K_1 значение коэффициента фильтрации $K_{1,2}$ обоих водоносных слоев мощностью $a_1 + a_2$; вместо a_2 надо взять значение a_2 , и тогда вместо K_2 получим значение коэффициента фильтрации K_3 . Этот подсчет будем производить по формуле (88), написанной для данных наблюдений по контрольной скважине и колодцу. Зная коэффициенты K_1 и K_3 можем определить коэффициент фильтрации грунта второго водоносного слоя K_2 из уравнения (89), которое получено из уравнения (87), решением его относительно K_2 . Таким образом могут быть вычислены значения коэффициентов фильтрации всех трех водоносных пластов различной водоотдачи.

Определение коэффициента фильтрации грунта может быть произведено по времени продвижения грунтовых вод без замеров количества воды при откачке. Для этого надо зафиксировать в каких-либо двух точках по течению потока разницу уравнений и время прохождения жидкостью пути между этими точками. Наблюдение можно производить между двумя контрольными скважинами, опущенными в движущийся поток, или между контрольной скважиной и колодцем, из которого производится откачка воды.

Общий метод такого определения K заключается в следующем. Допустим, что расстояние между какими-либо двумя наблюдательными

точками, где замерена разница уровней воды, известно. В этом случае по падению уровня между двумя наблюдательными точками, следуя формуле Дарси, можно написать уравнение для скорости фильтрации в порах грунта. При производстве опытных исследований, применяя различные индикаторы, устанавливают время t , за которое частицы жидкости пройдут путь между двумя наблюдательными точками. Определив это время, можно определить и скорость прохождения единицы пути грунтовых вод. Сравнивая между собою выражения для скоростей, получим выражение (90), по которому можно определить коэффициент фильтрации грунта.

Однако это уравнение не будет вполне точным, так как при выводе принято, что градиент и скорость постоянны по длине пути. Притом на движение воды имеет также влияние очертание подстилающего пласта, что уравнение (90) не учитывает. Имея в виду эти недостатки, для определения коэффициента фильтрации грунта можно вывести более точное уравнение, учитывая элементы потока гидравлическим методом.

Для плоского потока, автор составляет дифференциальное уравнение, интегрирование которого дает, для определения коэффициента фильтрации грунта, уравнение (98).

Для определения коэффициента фильтрации по времени продвижения жидкости в сфере действий грунтового колодца автор предлагает расчетное уравнение (104).

Определение коэффициента фильтрации грунта по времени продвижения жидкости для артезианского колодца производится по формуле (105).

Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Filtrationskoeffizienten des Bodens ist es bei der Durcharbeitung von feldmässigen Untersuchungsbefunden wichtig, adäquate Methoden für diese Bestimmung und für die Abhängigkeitsberechnung zu wählen. Wegen der sehr mannigfachen, einschlägigen Methodik ist die Wahl einer entsprechenden Methode und die der Berechnungsformel sehr erschwert: auch ist noch auf das Nichtvorhandensein einer systematischen Anordnung des diese Frage behandelnden Schrifttums hinzuweisen, weshalb die technischen Kräfte (Hydrogeologen und Hydrotechniker) sich an verstreute, häufig widerstreitende Literaturquellen zu halten haben. Das Ausfindigmachen der entsprechenden Literatur, die Durchsichtung derselben, die Auswahl der benötigten Berechnungsformeln und eine Vereinheitlichung der Dimensionierung, — dies alles bedeutet eine recht umständliche Arbeit. Auch zeitig diese Arbeit mitunter nicht die erforderlichen Ergebnisse und die Berechnungen erweisen sich als unrichtig, weil bei der Bearbeitung des Materials gewissen Besonderheiten der experimentellen Untersuchungsverhältnisse nicht Rechnung getragen worden war.

Vorliegende Arbeit soll nun die Berechnungsformeln für die Mehrzahl der Fälle, die in der Praxis der an den entsprechenden Expeditionen sich beteiligenden Untersuchern am häufigsten vorkommen, zusammenbringen und systematisch ordnen. Hierfür hatte der Verfasser eine angemessene Auslese unter den in der russischen, sowie in der fremdländischen Literatur enthaltenen Berechnungsformeln zu treffen und zwar, in der Hauptsache, unter solchen die einer gewissen Kritik standhalten; auch war eine Anzahl von Formeln für praktische Bedürfnisse abzuleiten.

Für die Gruppenzuordnung der Formeln ist eine bestimmte Klassifizierung der Brunnen angenommen. Diese können in Grundwasserbrunnen, artesische und Grundwasser-artesische Brunnen eingeteilt werden. Grundwasserbrunnen nennen wir solche, wo die Fortbewegung des Wassers bei Vorhandensein einer freien Wasseroberfläche, d. i. einer Depressionskurve stattfindet. Diesen stellen wir die artesischen, bzw. (nach der alten Terminologie) die Steigbrunnen entgegen, zu denen die Wasserführung aus einer von zwei undurchlässigen Schichten eingeschlossenen Wasserschicht erfolgt, wo das Wasser sich unter hydrostatischem Druck befindet, eine piezometrische Druckgefällekurve bildend. Ist die Wasserstandshöhe im artesischen Brunnen beim Auspumpen unterhalb der oberen wasserdurchlässigen Schicht, so wird eine beiderartige Flüssigkeitsförderung ermöglicht: mit einer freien und mit einer geschlossenen Oberfläche; ein derartiger Brunnen wird als Grundwasser-artesischer Brunnen bezeichnet.

Grundwasser-, artesische und Grundwasser-artesische Brunnen lassen sich wiederum in vollkommene oder vollständige und unvollkommene oder unvollständige Brunnen einteilen, je nach Brunntiefe in der durchlässigen Schicht und Anordnung deren filtrierenden Aufteile.

Als erste werden solche bezeichnet, die bis zu der dem Grundwasserstrom untergelagerten wasserdichten Schicht niedergehen und deren Wandungen längs der vollen Höhe des Grundwasserstroms für Wasser durchlässig sind.

Als letztere bezeichnet man Brunnen, deren Sohle die wasserundurchlässige Schicht, welche die wasserführende Schicht unterlagert, nicht erreicht. Die Wände eines solchen Brunnens können entweder in ihrer Gesamtheit durchlässig sein oder bloss teilweise in der Brunntiefe. Die Wasserspeisung des Brunnens erfolgt mithin entweder durch Sohle und Wände, oder nur durch Sohle, oder nur durch Wände. Der Art der Speisung nach, können die Brunnen in wasserabgebende und wasseraufnehmende eingeteilt werden. Erstere sind solche Brunnen, denen beim Auspumpen aus der wasserführenden Schicht Wasser zugeführt wird; letztere, auch Absorptionsbrunnen genannt, geben das in sie von der Oberfläche eingeführte Wasser der wassertragenden Schicht ab.

Je nach den Filterungsbesonderheiten der hier aufgezählten Brunnenarten unterscheidet sich die Berechnungsmethode.

Bei Benützung der Gleichungen ist darauf Bedacht zu nehmen, dass in vorliegender Arbeit, allenthalben, der Bodenfiltrationskoeffizient K genommen ist. Wollte man zum wahren Filtrationskoeffizienten K_p (bezogen auf die Bodenporen) übergehen, so hätte man den vorerwähnten Koeffizienten durch die aktive Bodenporosität p , welche den Wasserquerschnitt des Stromes darstellt, zu teilen, d. i.: $K_p = \frac{K}{p}$.

Die Grössendimensionen müssen bei der Auswertung der Gleichungen homogen genommen sein, nämlich K in cm/Sek , a in cm^3/Sek , t in Sek , H , h , s , r , R u. a. in cm , bzw. alle Grössen in $m/Sek.$, m^3/Sek und m , da widrigenfalls die Benützung der Gleichungen Fehler ergibt. Auch ist zu beachten, dass in den Gleichungen der natürliche Logarithmus $\ln N$ figurirt. Bei Anwendung einer logarithmischen Latte oder der Logarithmentafel, wo gewöhnliche Logarithmen gegeben sind, muss man den erhaltenen Logarithmus der Zahl mit dem Modulus 2,3 (genauer 2,303) multiplizieren, da $\ln N = 2,303 \lg N$ ist.

Bestimmt wird die Durchlässigkeitsziffer wasserführender Gesteine durch vollkommene, bis zu den wasserdichten Schichten niedergehende und längs der ganzen Höhe der wasserführenden Schicht wasserdurchlässige Grundwasserbrunnen nach den Formeln von Dupuit-Tiem, Smröker und Chezy, je nach der Porosität des Gesteins.

Bei der Wasserfiltration in porösen Böden werden die bekannten Formeln Dupuit-Tiem angewandt: 1. für wasserabgebende und 2. für wasseraufnehmende Brunnen.

Bei der Wasserfiltration in kiesigen Gesteinen verwendet man die Smröker'sche Formel. Die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten erfolgt in

nachstehender Reihenfolge. Erst ermittelt man nach Formel (4) den Koeffizienten m , löst die Gleichung zeichnerisch, berechnet dann die Koeffizienten C_1 und C_2 nach Gleichung (3) für zwei Wasserstandsensenkungen h_1 und h_2 im Kontrollbohrloch bei zwei aufeinanderfolgenden Wasserauspumpungen aus dem Brunnen Q_1 und Q_2 . Indem man sodann den arithmetischen Mittelwert der Koeffizienten C nimmt, bestimmt man nach Formel (5) den Filtrationskoeffizienten des Gesteins. Nimmt man jedoch die Untersuchung mit wasser aufnehmenden Brunnen vor, so führt man ebendieselben Rechnungen nach den Formeln (7), (6), und (5) durch.

Für rissige Gesteine bedient man sich der Chezy'schen Formeln und zwar wenn es ein wasserabgebender Brunnen ist — der Formeln (8), (9) und im Falle eines wasser aufnehmenden Brunnens — der Formeln (10), (11).

Alle diese Gleichungen werden auf der Grundlage allgemein bekannter Gesetze der Bewegung unterirdischer Wässer auf hydraulischem Prinzip abgeleitet und haben sie sich in der Praxis genügenderweise bewährt.

Die Arbeit enthält Formeln zur Bestimmung der Filtrationskoeffizienten von Gesteinen bei der Erforschung mittels unvollkommener Brunnen, d. i. solcher, bei denen die Sohle die wasserundurchlässige Schicht nicht erreicht. Die Brunnenwände können entweder teilweise oder gänzlich der Brunnentiefe entlang wasser durchlässig sein und die Brunnenspeisung vermag entweder durch die Sohle und die Wandungen, bzw. nur durch die Sohle oder bloss durch die Wände vorsichzugehen. Beim Auspumpen von Wasser aus einem unvollkommenen Brunnen erfolgt Wasserzufluss zum Brunnen nicht von der gesamten wasserführenden Schicht, sondern bloss bis zu einer gewissen Tiefe derselben, die man als aktive wasserführende Schicht bezeichnet. Die Tiefe der aktiven Zone H lässt sich aus der Tabelle von E. A. Samarin und nach der Gleichung P. I. Schipenko's bestimmen.

Für einen mit Sohle und Wänden arbeitenden Brunnen hat Forchheimer eine empirische Formel vorgeschlagen, welche die Abhängigkeit zwischen den Grössen der Absenkungen eines vollkommenen und eines unvollkommenen Brunnens, bei gleichem Wasserbezug aus denselben, ausdrückt. Eine Kombination der Formeln Forchheimers und Dupuit ergibt Gleichung (12) für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten poriger Gesteine mit Hilfe wasserabgebender und (13) wasserabsorbierender Brunnen. Die in diesen Gleichungen enthaltene Tiefe der aktiven Zone bestimmt sich aus den Relationen E. A. Samarins oder durch Adaptation an die Formel P. I. Schipenko's. Abgesehen hiervon, ist in der Arbeit die Formel Kozeny's, die letzterer für einen durch Sohle und Wände gespeisten Brunnen vorschlägt, vorgesehen. Diese Formel wird jedoch kaum in der Praxis weitgehende Anwendung finden — wegen ihrer Umständlichkeit, sowie der grossen Anzahl verschiedenartiger Berechnungen. Für durch Sohle und Wände gespeiste Brunnen wären Gleichungen bei Filtrierung durch die Wände und einer solchen durch die Sohle, zusammenzustellen sein. Bedingt durch die Konfiguration der filtrierenden Brunnensohle wird sich der Wasserzufluss zum Brunnen ändern; ob nun dieselbe halbkugelförmig, bzw. flach oder elliptisch ist, würde der

Filtrationskoeffizient des Bodens sich bestimmen lassen: nach den Gleichungen (14) bzw. (14a) und (14b).

Bei der Speisung eines unvollkommenen Brunnens durch die Wände ist die Aufgabe einer Bestimmung der aktiven Zone, innerhalb welcher die Wasserspeisung des Brunnens vorsichgeht nach dem vorstehenden zu lösen. Wohl unterscheiden sich voneinander die Tiefen der aktiven Zone eines durch Sohle und Wände gespeisten Brunnens und eines solchen, der durch die Wände gespeist wird, aber wegen Mangels irgend welcher diesbezüglichen empirischen Abhängigkeiten, ist man darauf angewiesen, die Relationen E. A. Samarins oder die P. I. Schipenko'sche Formel anzuwenden, indem man letzterer das Glied unter der Wurzel $0,5 r$ durch das die Speisung durch die Sohle in die Rechnung einbezogen wird, ausschliesst.

Auf Grund seiner Versuche ermittelte Forchheimer eine Abhängigkeit, welche die Relation zwischen den Absenkungswerten wasserabgebender, bloss durch die Wände gespeister Brunnen: eines vollkommenen und eines unvollkommenen, unter der Bedingung gleichen Wasserentzugs ausdrückt. Indem man die Formeln von Forchheimer und Dupuit kombiniert, gewinnt man eine Gleichung, nach der man den Filtrationskoeffizienten des Bodens mittels eines unvollkommenen durch die Wände gespeisten Brunnens bestimmt. Wohl hat Forchheimer mit seiner Gleichung nur einen wasserabgebenden Brunnen vorgesehen, dieselbe wird jedoch von uns auf wasserabsorbierende Brunnen ausgedehnt.

Für einen wasserabgebenden unvollkommenen durch die Wände gespeisten Brunnen wird K nach Formel (15), und für einen wasseraufnehmenden nach Formel (16) bestimmt. Ausser der Forchheimer'schen Formel ist in der Arbeit auch die Kozeny's angegeben. Für wasserabgebende Brunnen lässt sich die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten nach Kozeny laut Formel (17) ausführen oder auch nach Formel (17a), wo der Koeffizient A der Kozeny'schen Tabelle entnommen ist. Für wasserabsorbierende Brunnen führt man die Berechnung nach Gleichung (18) aus. Die nach den Formeln Forchheimers und Kozeny's errechneten numerischen Grössen zeigen sehr geringe Unstimmigkeiten, weshalb man eine derselben benützen kann. Viel einfacher gestaltet sich aber die Rechnung nach der Kozeny'schen Formel, da in letzterer keine Tiefenberechnungen der aktiven Schicht zu machen sind, insofern die Tiefe durch den Koeffizienten A in die Berechnung miteinbezogen wird. Die Berechnung ist nach der Forchheimer'schen Formel bedeutend verwickelter als nach der Kozeny'schen.

Wird der Bodenfiltrationskoeffizient unter der Zuhilfenahme eines mit der Sohle arbeitenden Brunnens bestimmt, so sind alle vorstehenden Formeln hierfür unanwendbar. Für solch einen Brunnen mit freier Wasserstandshöhe und einer wasserführenden Schicht von beschränkter Mächtigkeit schlägt Kozeny die angenäherte Gleichung (19) vor.

Forchheimer lässt für Brunnen, die durch flache Sohlen bei unbegrenzter wasserführender Schicht gespeist werden, die Anwendung der von ihm für einen derartigen Brunnen bei geschlossenem Wasserspiegel abgeleiteten Formel zu. Die Benutzung dieser Gleichung ist nicht völlig richtig, da für einen

Strom mit freier und unfreier Wasseroberfläche die Flüssigkeitsbewegung (Verteilung der Drücke, Geschwindigkeit, deren Richtungen) verschieden ist. Die Anwendung dieser Formel für den besprochenen Fall ergibt einen bloss grob angenäherten Wert des Filtrationskoeffizienten. Forchheimer schlägt noch eine andere Gleichung für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten vor, dieser kann bei der Betriebsführung der Anlage berechnet werden. Beim Auspumpen (bzw. Einfüllen) einer gewissen Menge an Wasserverbrauch lässt sich im Grundwasserstrom in einem gegebenen Zeitmoment t , die Wasserstandshöhe an einem gewissen Punkte fixieren. Wird das Pumpen eingestellt oder abrupt kräftig ausgepumpt, so ändert sich die Wasserstandshöhe für den Zeitpunkt t_2 . Indem Forchheimer das Wasservolumen der Bodenporen im Bereiche dieser zwei Lagen der Depressionskurve (die Wasserstandsschwankungen im Brunnen miteinbezogen) berechnet, leitet er, den Betrieb der Anlage auswertend, eine Gleichung für die Bestimmung der Bodendurchlässigkeit ab. Diese Gleichung Forchheimers stellte sich als umständlich und recht langwierige Berechnungen benötigend heraus; sie ergibt jedoch sehr gute praktische Resultate bei ihrer Anwendung.

Artesisch nennt man dasjenige Wasser, das sich in einer wasserführenden Schicht zwischen zwei wasserundurchlässigen Schichten befindet und eine, die geometrische Höhe der oberen Schicht überschreitende piezometrische Wasserstandshöhe zeigt. Ein in eine derartige wasserführende Schicht niedergetriebener Brunnen wird als ein artesischer Brunnen bezeichnet, indem man, in Analogie zu dem vorhergesagten, vollkommene und unvollkommene artesische Brunnen unterscheidet.

Um mit Hilfe eines vollkommenen artesischen Brunnens den Bodenfiltrationskoeffizienten zu bestimmen, kann man sich der Formeln Dupuits, Smrökers und Chezys, je nach dem Gestein, in dem die Bewegung des unterirdischen Wassers erfolgt, bedienen. Bei Filtrierung in porösen Böden wird die Dupuit'sche Formel angewandt. Für wasserabgebende Brunnen wird die Berechnung nach Formel (21) u. (21a) und für wasseraufnehmende nach der Formel (21) ausgeführt. Findet die Fortbewegung [des Wassers in porigen Gesteinen statt, bei derartigen Gefällen] dass die Dupuit'sche Gleichung beeinträchtigt wird, so ist die Errechnung des Filtrationskoeffizienten nach den Smröker'schen Formeln anzustellen. Zunächst bestimmt man den Koeffizienten m nach der Formel (24), sodann die Koeffizienten C_1 und C_2 nach der Formel (23) für zwei Wasserstandsabsenkungen in dem Beobachtungsbohrloch bei Wasserabgaben Q_1 und Q_2 und schliesslich den Mittelwert C nach Formel (25) und den Filtrationskoeffizienten K nach Gleichung (26).

Für artesische Brunnen in rissigen Gesteinen wird die Berechnung laut der Chezy'schen Formel ausgeführt, wenn jene wasserabgebend sind — nach den Formeln (27) u. (27a), oder nach der vereinfachten Gleichung (28), und, wenn sie wasseraufnehmend sind, — nach Gleichung (29).

In der Praxis hat man es sehr oft mit unvollkommenen artesischen Brunnen zu tun. Wir wollen vor allem die Gleichungen für einen durch die Gesamtmasse der wasserführenden Schicht niedergehenden Brunnen besprechen (Abb. 10). Die Berechnung eines derartigen Brunnens kann

nach Kozeny mit Hilfe einer exakten Lösung der von Muskat für die Feststellung der Verteilung des elektrischen Potentials in weiten zylindrischen Platten bei teilweise eindringender Elektrode, vorgeschlagenen Strömungsformel ausgeführt werden. Für die praktische Anwendung ist jedoch die endgültige Stromformel sehr verwickelt. Kozeny schlägt eine empirische Formel vor, die den rechnerischen Feststellungen von Muskat sehr nahekommende Resultate ergibt. Indem Kozeny diese Formel mit derjenigen von Dupuit für artesischen Brunnen vereinheitlicht, gelangt er zu einer Bestimmungsformel der Wasserabgabe eines unvollkommenen artesischen Brunnens. Eine Lösung dieser Gleichung wird hinsichtlich K für die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten von Gleichung (31) geliefert, wo der Koeffizient A durch Gleichung (30) gegeben ist. Diese Gleichung Kozeny's ist bisher einzigstehend in der Literatur. Die Anwendung dieser Gleichung ergibt mit der Praxis gut übereinstimmende Resultate.

In der Praxis kann es vorkommen, dass der artesischen Brunnen bloss mit der Sohle arbeitet. Wenn der Brunnen durch die wasserundurchlässige Schicht bis zum Oberteil der wasserführenden Schicht, wo das Wasser unter hydrostatischem Druck steht, geführt wird, so erfolgt die Nahrung des Brunnens bloss durch die Sohle, da die Brunnenwandungen in der wasserundurchlässigen Schicht sich befinden. Die Leistungsfähigkeit eines solchen Brunnens wird sich bei ein und derselben Absenkung der Wasserstandshöhe nach Massgabe der Konfiguration der filtrierenden Grenzfläche ändern und steht dieselbe mit einem minimalen Ablaufquerschnitt im Zusammenhang. Der Brunnen kann an der Sohle ein Netz haben, zur Vorbeugung von Erdetransport in den Brunnen, doch kann dasselbe auch fehlen. Das Netz kann sehr verschiedenartig: halbkugelförmig, elliptisch oder flach sein, mit beziehungsweise verschiedenen Berechnungsformeln, die deswegen im Text angeführt sind. Besitzt der artesischen Brunnen eine halbkugelförmige Oberfläche der filtrierenden Sohle, so wird die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten für einen wasserabgebenden Brunnen in porösen Böden nach Formel (32) oder (33) erledigt, für einen wasserabsorbierenden hingegen nach Formel (34) oder (35).

Für ebensolche Brunnen in kiesigen Gesteinen haben wir eine Gleichung auf der Grundlage des Smröker'schen Gesetzes abgeleitet. Der Filtrationskoeffizient des Bodens, für den der Koeffizient m aus Gleichung (37) ermittelt wird, wird nach Formel (36) berechnet.

Nachdem man zwei Werte des Filtrationskoeffizienten für zwei Auspumpungen Q_1 und Q_2 gewonnen hat, kann man ihren arithmetischen Mittelwert nehmen.

Für gleiche Brunnen in rissigen Gesteinen wird die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten nach Gleichung (38) ausgeführt.

Hat der Brunnen eine flache, filtrierende Sohle oder fehlt an der Sohle das die Zufuhr von Erde in den Brunnen verhindernde Netz, so fallen die Formeln anders aus.

Wasserzufuhr zu einem solchen Brunnen erfolgt durch eine kleinere filtrierende Oberfläche, als im vorerwähnten Falle und ist der Wasserzufluss bei einer gleichen Absenkung geringer.

Von Forchheimer ist dieser Fall für die Wasserfortbewegung in porösen Böden, auf Grund des Darcy'schen Gesetzes, mathematisch behandelt worden und gelangte genannter Forscher für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten zur Gleichung (40), sowie bei Vermessung der Wasserstandshöhe im Kontrollbohrloch zur Gleichung (41). Gewöhnlich kommt es bei, in Bezug auf Durchlässigkeit, mittleren Böden zur Auswaschung von Bodenpartikeln an der Brunnensohle; weshalb sich eine gewisse, zum Boden gerichtete Konkavität der filtrierenden Grenzfläche, die gewissermassen ein Rotationsellipsoid darstellt, bildet.

Falls die filtrierende Sohle des Brunnens eine elliptische Gestalt besitzt (beispielsweise mit einer filtrierenden Oberfläche, welche die Mitte zwischen halbkugelförmig und flach hält), so kann man die Berechnungsformel schreiben, indem man den Mittelwert der Wasserabgaben nach den Formeln (33) und (40) nimmt und den Filtrationskoeffizienten nach Formel (42) bestimmt.

Für einen, bei Grenztiefe der wasserführenden Schicht, mit der Sohle arbeitenden Brunnen lässt sich die Berechnung des Filtrationskoeffizienten nach der Gleichung (43) von Tevene ausführen. Obwohl die Ausführung dieser Gleichung auf schwankender theoretischer Grundlage ruht (was die Zusammensetzung einer Differentialgleichung anbelangt), so halten doch einige Autoren dafür, dass dieselbe in zufriedenstellender Weise die gegebenen Versuche widerspiegelt und durchaus für praktische Berechnungen geeignet ist.

Für einen unterhalb der wasserundurchlässigen Schicht hinabgetriebenen und mittels Sohle und Wandungen arbeitenden Brunnen leitet K. I. Dobrowolsky eine Gleichung für porige und rissige Gesteine grosser Mächtigkeit ab. Die theoretischen Grundlagen Dobrowolsky's laufen auf nachstehendes hinaus. Seiner Annahme nach besitzt die filtrierende Oberfläche eine einem Rotationshalbellipsoiden nahestehende Gestalt. Diese Oberfläche wird von ihm aus einem Zylinder beim Filtern durch die Brunnenseitenwände und aus einer halbkugelförmigen Fläche bei der Filterung durch die Brunnensohle zusammengesetzt.

Für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten poröser Böden gibt Dobrowolsky die Gleichungen (44) und (45). In letzterer muss aber die Grösse R bekannt sein, die in jedem Sonderfalle aus der kubischen Gleichung Dobrowolsky's zu ermitteln ist.

Für rissige Gesteine soll nach Dobrowolsky die Durchlässigkeitsziffer mittels Gleichung (45) bestimmt werden.

Der Filtrationskoeffizient des Bodens lässt sich auf Grund der Restitution der Wasserstandshöhe im Brunnen, nachdem eine Auspumpung von kurzer Dauer eingestellt worden ist, bestimmen. Forchheimer gibt folgendes Beispiel eines durch eine flache Sohle gespeisten artesischen Brunnens an. Die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten kann nach Gleichung (46) erfolgen, falls Messungen zweier Wasserstandshöhenlagen im Brunnen in der Zeitspanne, nach welcher eine Wiederherstellung des Wasserstandes, — nach kurzandauerndem Auspumpen, — stattfand, angestellt worden waren.

Wir wollen nun die Berechnungsgleichungen für Grundwasser-artesische Brunnen einer Betrachtung unterziehen.

Die obenangeführten Gleichungen für vollkommene und unvollkommene artesische Brunnen haben Gültigkeit nur für diejenigen Wasserstandssenkungen, bei denen von der piezometrischen Höhe die untere Grenze der oberen wasserdurchlassenden Schicht überschritten wird. Wird eine ununterbrochene, dauernde und kräftige Wasserauspumpung aus dem Brunnen veranstaltet, so kann der Wasserstand unterhalb der oberen wasserdichten Schicht absinken. In dem Abschnitt, wo die piezometrische Höhe die obere Grenze der wasserführenden Schicht überschreitet, wird die Bewegung des Wassers gemäss einer piezometrischen Gefälledruckkurve vorsichgehen, während im Abschnitt nächst dem Brunnen dies, im Einklang mit dem Vorhandensein einer freien Wasseroberfläche im Boden geschieht, weshalb der Brunnen von uns die Bezeichnung eines Grundwasser-artesischen erhalten hat. Die Berechnungsformel für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten der wasserführenden Schicht kann nun aus den Gleichungen der Bewegungen für das Bereich mit freier und für das mit geschlossener Oberfläche zusammengesetzt werden.

Für poröse Böden, wo das Darcy'sche Gesetz gilt, lässt sich der Filtrationskoeffizient nach Gleichung (47) bestimmen. Ist eine Kontrollbohröffnung im Bereich des Grundwassers angeordnet, und eine andere im Bereich des artesischen Wassers, so ist die Gleichung (47a) anzuwenden. Falls beide Beobachtungspunkte in der Region des artesischen Wassers gelegen sind, dann hat man die Rechnung nach Formel (19) und wenn beide im Bereich der Bewegung mit freier Wasseroberfläche sich befinden,—nach Formel (1) durchzuführen.

Für Grundwasser-artesische Brunnen in kiesigen Gesteinen leitet man die Gleichungen auf Grund des Smröker'schen Gesetzes ab, indem das Problem ganz analog zu dem vorangegangenen behandelt wird.

Nach den gewonnenen Gleichungen wird die Berechnung, wie folgt, ausgeführt. Erst bestimmt man den Koeffizienten m nach Gleichung (50), letztere graphisch lösend, analog der Bestimmung der Gleichung (4), Abb. 4. Danach wird der Koeffizient C_1 und C_2 für zwei Auspumpungen nach Formel (49) bestimmt, ihr arithmetischer Mittelwert berechnet und nach Formel (5) der gesuchte Wert des Filtrationskoeffizienten des Gesteins gefunden. Diese Berechnung zur Ermittlung des Filtrationskoeffizienten hat nur für den Fall Gültigkeit, wenn das Kontrollbohrloch, nach welchem die Wasserstandshöhe gemessen wird, sich in der wasserführenden Schicht befindet, wo die Depressionskurve statt hat. Falls die Kontrollbohröffnung im Bereich des artesischen Wassers angeordnet ist, so sind die Formeln für die Bestimmung der Filtrationskoeffizienten anders und wird die Rechnung folgendermassen geführt. Vorerst bestimmt man den Koeffizienten m nach Gleichung (53) mittels zeichnerischer Lösung, ferner findet man vermöge Gleichung (52) den Koeffizienten C_1 und C_2 für zwei Auspumpungen und bestimmt dann, zufolge deren Mittelwerte, den Filtrationskoeffizienten, gemäss Formel (5).

Für einen gleichen Brunnen in rissigen Gesteinen wird die Gesteinsdurchlässigkeit nach den Formeln (56), (57) berechnet. Falls beide Beobach-

tungsbohrlöcher im Bereich des Grundwassers liegen, berechnet man nach Formel (8); wenn jedoch beide im Gebiet des artesischen Wassers sind, so erfolgt die Berechnung gemäss Formel (27).

In der Praxis ist die Prüfung der Filterungseigenschaften des Bodens mittels wasserabsorbieren der Schürfe weitgehend verbreitet. Bemerkenswert muss aber werden, dass hier bei Bearbeitung des Materials grosse Schwierigkeiten für die Auswahl der Rechnungsformel zur Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten auf Grund der Beobachtungsbefunde sich dem Forscher in den Weg stellen. Verschiedene Untersucher, wie z. B. Boldyrew, Waipolin, Pioryschkin, Semjonow, Trojansky, Nowikow, Dobrowolsky, Samarin, Bindemann und Verfasser vertreten verschiedene Methoden zur Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten. Diese Methoden sind höchst mannigfach und liefern die verschiedenartigsten Werte für den genannten Koeffizienten. Ohne auf die sechs erstgenannten Bestimmungsmethoden eingehen zu wollen, da diese, unseres Erachtens, keine richtige Aufstellung und Interpretation des Problems ermöglichen, beschreiben wir in Kürze die letzteren vier Methoden.

K. I. Dobrowolsky überträgt, behufs Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten, die Formeln eines wasserabgebenden, mittels Sohle, bei halbkugelförmiger Oberfläche derselben, arbeitenden artesischen Brunnens auf wasserabsorbierende Schürfe. In dieser Weise wird auf Grund der Dobrowolsky'schen Methode, bei wechselseitiger Umstellung der Tiefen, K für porige Böden nach den Beobachtungsbefunden in zwei Kontrollbohrlöchern bestimmt.

Für Grenzwerte gibt Dobrowolsky die Gleichung (58), worin R nach Formel (59) bestimmt ist.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeitsziffer rissiger Gesteine durch wasserabsorbierende Schürfe wird von Dobrowolsky Gleichung (60) aufgezeigt. Nun führt jedoch die Verwertung besagter Formeln für Schürfe Ungenauigkeiten herbei. Einmal wird bei Ausführung der Gleichung vorausgesetzt, dass der Wasserdurchschnitt eine halbsphärische Oberfläche darstellt, während dieser in der Wirklichkeit bedeutend geringer ist. Sodann repräsentiert der Grenzschnitt, bei $r=r_0$, zufolge der Gleichung, gleichfalls eine halbsphärische Oberfläche, während er tatsächlich flach ist und die Sohle des Schurfes bildet. Endlich erfolgt beim Anlangen des Wassers, das aus dem Schurfe filtriert wird, an den Grundwasserspiegel oder an die wasserundurchlässige Schicht eine Umordnung der Drücke, Geschwindigkeiten, und deren Richtungen, weshalb der von Dobrowolsky angenommene halbkugelförmige Querschnitt des Stromes verändert wird. Die genannten Misstände der aufgeschriebenen Gleichungen lassen Vorsicht bei der Anwendung von Formeln, die nur näherungsweise K charakterisieren, nötig erscheinen.

E. A. Samarin behandelt die Filterbewegung des aus dem Schurf dem Boden zufließenden Wassers, welche sich noch nicht endgültig etabliert hat. Er spricht die Vermutung aus, dass wenn man von stark durchlässigen Böden absieht, das Auseinanderfliessen des Wassers einer Kugelgestalt sich nähert. Das in den Boden eindringende Wasser wird in gewissen Zeiteinheiten sich um bestimmte Grössen verschieben, indem es die Lagen I, II, III usw. in Abb. (18) einnimmt. Dabei nimmt Samarin an, dass die auf diese Zeitpunkte

bezogenen Gefälle sich durch die Gleichung (61) ausdrücken lassen. Die Geschwindigkeit des Auseinanderfliessens des Wassers kann man berechnen, wenn man den von der Flüssigkeit zurückgelegten Weg und die Zeitpunkte t nach Formel (62) kennt. Nach den ermittelten Geschwindigkeiten und den Gefällen bestimmt man den Filtrationskoeffizienten des Bodens aus der Relation (63). Diese Bestimmung basiert sich auf der Voraussetzung, dass die in den Schurf geförderte Wassermenge von dem freien Bodenporenvolumen in der Kugelgestalt des Auseinanderfliessens absorbiert wird. Das freie Porenvolumen des Bodens, z. B. zwischen den Kurven I und II, wird gleich der Sickerwasserzuflussmenge zum Boden innerhalb der zwei Lagen I und II der Filterbewegung gerechnet. Statt gemäss (62), kann man nach Samarin die mittleren Geschwindigkeiten der Filterung in nachstehender Weise errechnen. Die Mittelgeschwindigkeit der Bewegung von Kurve I bis Kurve II wird aus dem Verhältnis der aufgesaugten Wassermenge zum Produkt der Sickerzeit und der arithmetischen Mittelfläche I und II ermittelt: $V = \frac{W}{t \cdot F_{\text{mitt}}}$. Für die Bestimmung der Auseinanderfliessungssphäre ist im Text eine von Samarin gelieferte Gleichung angegeben. Unter kritischer Einstellung zu der angeführten Methode, können wir folgendes sagen. Samarin nimmt als Grundlage für seine Ausführungen die Annahme einer Kugelgestalt des Auseinanderfliessens des Filterwassers, während in Wirklichkeit diese Form im höchsten Grade verschieden sein kann. Das Gefälle berechnet Samarin für die Schurfmitte in dem ausgezogensten Teil der Sphären und überträgt die Gefällegrösse auf die gesamte Kugeloberfläche der Filterbewegung. Unbekümmert um diese Misstände und die Langwierigkeit der Methode, lässt sie sich doch mit, für praktische Zwecke, hinreichender Genauigkeit und recht guten Ergebnissen verwerten. Für durchlässige Sande ist jedoch dieselbe nicht anwendbar, da hier der Filterstrom stark nach unten hin ausgezogen ist.

N. N. Bindemann hält die Samarin'sche Methode, in ihren Grundzügen, für richtig, erweitert aber die Fragestellung, indem er den Wasserverbrauch für die kapillare Resorption in die Betrachtung miteinbezieht und als Grundlage für seine Versuche die befeuchtete Oberfläche als ein Rotationsellipsoid annimmt. Letzteres ist in Sandböden nach unten ausgezogen, bei Tonböden hingegen abgeplattet. Formiert wird dasselbe unter der Einwirkung von Gravitations- und Kapillarkräften. Der Wasserdurchsickerung in den Böden leisten die Porenluft und die Reibung der Flüssigkeiten an der Bodengerüstoberfläche Widerstand. Nach Beendigung des kapillaren Aufstiegs und Erreichung der Grenze von horizontalen Dimensionen der Ellipse wird deren Regelmässigkeit gestört, sie wird eiförmig, nach unten ausgezogen. Bindemann stellt fest, dass bei Stabilisation der horizontalen Ellipsenachse der Wasserverbrauch aus dem Schurf konstant wird. Dies wird von ihm dahingehend gedeutet, dass in der Formel $Q = K\omega I$, bei geringer Wassertiefe im Schurf, das Gefälle sich geringfügig ändert, weshalb bei den Konstanten Q , K , I , der in Bezug auf die Richtung der Wasserstrahlen normale Stromquerschnitt W konstant bleibt. Für diese Grösse des Wasserquerschnitts des Gravitationsstroms gibt Bindemann die Gleichung (64). Ferner stellt er, unter Benutzung

der Zunker'schen Gleichung, eine Gleichung für die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten zusammen, wobei er den Luftwiderstand in den Bodenporen und die kapillare Resorption berücksichtigt. Indem er, sich hierauf begründend, die Gleichung (69) erhält, bestimmt er die Grösse des bei der Infiltration durch Schnitt W sich auswirkenden mittleren Gefälles, sowie die mittlere Weglänge der Filtration (Gl. 70). Bindemann ersetzt hierauf die Filterungsgeschwindigkeiten durch den Verbrauch und die Schnittfläche, und erhält so die Gleichung (71) für die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten. Für Sand, wo man die kapillaren Kräfte vernachlässigen kann, gibt dieser Autor eine vereinfachte Formel (72). Dabei gibt er selbst zu, dass bei Erreichung der horizontalen Benetzungsgrenzen das regelmässige Ellipsoid gestört wird und die Benetzung eiförmig wird. Dann ist aber die Benutzung der Formeln (71) und (72) unrichtig, da diese aus der Benetzungsform eines Ellipsoids abgeleitet sind und für keine von den anderen Formen, die in der Mehrzahl der Fälle der Praxis höchst mannigfaltig sind, angewandt werden können. Im grossen und ganzen nimmt die Bindemann'sche Methode ganz richtig die Elemente der Wasserbewegung bei Infiltration aus dem Schurf in Rechnung; ihr Kernfehler besteht jedoch darin, dass sie sehr langwierig ist und umständliche Berechnungen erfordert, weswegen sie bei Massenrechnungen kaum Anwendung wird finden können.

Um den Koeffizienten der Bodenfiltration aus Schürfen zu ermitteln, behandelt Verfasser den Vorgang der Bewegung des Filterwassers aus dem Schurf in den Boden und leitet auf hydraulischer Methode die Bewegungsgleichung ab. Das aus dem Schurf zugeforderte Wasser wird in den Boden abfiltriert, indem es unter Einwirkung der Schwerkraft absinkt und nach den Seiten hin auseinanderfliesst. Dieser Bewegungsvorgang kann von verschiedener Dauer, je nach der Zusammenwirkung verschiedener Bedingungen, sein; derselbe wird jedenfalls so weit andauern, bis die Filterwässer den Strom und die natürlichen Grundwässer bzw. die wasserundurchlässige Schicht erreicht haben. Beim Zusammenfluss eines noch nicht installierten, aus dem Schurf kommenden Stromes mit dem Grundwasserstrom werden im letzteren die schon festgelegten Bewegungsverhältnisse gestört und es kommt zu einer schroffen Umänderung in der Verteilung der Drücke, Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen. Einige Zeit darauf, wird beim Auseinanderfliessen des Wassers nach den Seiten hin, die freie Stromoberfläche sich ausgeglichen haben und zwischen dem Wasserfilterstrom aus dem Schurf und dem natürlichen Grundwasserstrom, sich ein gesetzmässiger Zusammenhang etablieren. Stellt man zu diesem Zeitpunkt Wasserstandsbeobachtungen in den Kontrollbohrungen, sowie Verbrauchsabschätzungen an, kann man mit, für praktische Zwecke, hinreichender Genauigkeit, den Bodenfiltrationskoeffizienten feststellen. Bei einer solchen Einstellung des Problems kann man davon absehen, den Wasserverbrauch für kapillare Resorption zu ermitteln, da die Kapillarschicht hauptsächlich auf Kosten der Wasserzufuhr im ersten Moment der Infiltration resorbiert wird. Sollte sogar im darauffolgenden Moment kapillarer Verbrauch erfolgen, so ist dieser unbedeutend und negligibel im Vergleich zum Filterverbrauch. Die vom Schurf aus ihren Weg nehmende Flüssigkeitsfilterbewegung

wird in Trajektorien erfolgen, die sehr nahe zu den Linien des Flüssigkeitsstroms sind, um deswegen, weil die Fortbewegung des rückgängigen Trichters längs dem Radius gering ist und wenig auf die Schurfabgabe einwirkt. Die Flüssigkeitsteilchen, die sich in dem vom Grundwasserstrom eingenommenen Bereich bewegen, besitzen in jedem einzelnen Strompunkt verschiedene, in Bezug auf Grösse und Richtung von einander abweichende Geschwindigkeiten. Das Problem ist auch auf strikterer, hydromechanischer Methode zu lösen; wir wollen uns aber auf die hydraulische Behandlung der Frage beschränken, indem wir uns auf eine angenäherte, praktischer Anwendung durchaus Genüge leistende Formel stützen.

Bei der Lösung des Problems wird eine Reihe von Annahmen, welche die Behandlung der Frage vereinfachen, gemacht. Die Wassertiefe im Schurf wird unmittelbar in die Fragestellung nicht eingeschlossen, da dieselbe gewöhnlich im Vergleich zur Gesamttiefe H gering ist. Als zweite Voraussetzung bei der hydraulischen Problembehandlung ist hier, unseres Erachtens, die Hypothese eines ebenen Schnittes angebracht. Dieser Hypothese zufolge, halten wir dafür, dass der Strom, beim Auseinanderfliessen in den Boden, in einem beliebig gewählten Horizontalschnitte gleiche örtliche Vertikalgeschwindigkeiten v_z besitzt, die gleich der mittleren Vertikalgeschwindigkeit des Stromes V_z sind. Indem wir auf diese Weise das Ausrechnungsschema (Abb. 20) für einen willkürlichen Horizontalschnitt unterhalb der Schurfsohle betrachten, stellen wir die Differentialgleichung (73) zusammen. Die Wasserbewegung erfolgt längs der Strömungslinie; im gegebenen Falle ist die gesuchte Strömungslinie die Grenzfläche des Stromes — die Depressionskurve. Für diese Strömungsgrenzlinie schreiben wir, dem Darcy'schen Gesetz zufolge, den Ausdruck für die Filtergeschwindigkeit, dies als Funktion eines Punktes betrachtend, und finden alsdann die Vertikalkomponente V_z der vollen Geschwindigkeit (Ausdruck 74). Der Gefälledruckverlust dH entspricht für die oberflächliche Strömungslinie einem Zuwachs der Ordinate dz , weshalb in dieser Gleichung $dH=dz$ ist. Für eine Strömungslinie, die mit der Depressionskurve nicht koinzidiert, ist diese Bedingung nicht zu schreiben. Auf Grund des Obengesagten, hinsichtlich der Hypothese eines ebenen Schnittes erhält man den Ausdruck (75) für die mittlere Vertikalgeschwindigkeit längs dem Schnitte sowie die Gleichung (76) für den Verbrauch.

Um hieraus eine funktionelle Abhängigkeit für die Stromelemente zu erhalten, muss die Gleichung integriert werden. Jedoch bleibt die nach der Integration sich ergebende Gleichung in augenscheinlicher Weise hinsichtlich K , dem Filtrationskoeffizienten, ungelöst und man ist darauf angewiesen, die Aufgabe mittels Adaptation zu erledigen, was sehr umständlich ist.

Der Bodenfiltrationskoeffizient kann unmittelbar nach Gleichung (76) bestimmt werden, wozu letztere hinsichtlich K zu lösen und in derselben die Glieder $\frac{dz}{dr}$ in endlichen Differenzen darzustellen sind. Nachdem man auf diese Weise die Gleichung (77) erhalten hat, muss man in dieser das Glied r durch entsprechende Grössen der Radiusse zu den Beobachtungspunkten ersetzen. Indem man zwei beliebige horizontale Wasserquerschnitte des Stro-

mes ins Auge fasst, sucht man eine solche Grösse von r , welche aus den zwei betrachteten Wasserdurchschnitten eine mittlere arithmetische Fläche ergibt. In diesem Falle kann die Bestimmung nach den Formeln (80) u. (81) erfolgen.

Die zum Bestand der Formel gehörigen Grössen: Verbrauch, Abstand der Schurfachse von den Kontrollbohrlöchern und die Differenz der Wasserstände in denselben, werden bei der Vornahme von Versuchsuntersuchungen gemessen. Die Befunde für K nach Formeln (80) u. (81) ergeben Resultate, die sehr gut mit den wahren zusammenstimmen.

In der Praxis kann sehr häufig eine Erforschung von Schichten mit verschiedener Wasserabgabe nötig sein. Ist an mehreren wasserführenden Schichten der Bodenfiltrationskoeffizient zu bestimmen, so hat die Untersuchung mittels Brunnen, unter Miteinbeziehung der Leistungsfähigkeit und Durchlässigkeit einer jeden Schicht ausgeführt zu werden. Für zwei wasserhaltende Schichten mit verschiedener Wasserabgabe leitet Schultze eine Gleichung für die Brunnenwasserabgabe ab, die in entsprechender Weise für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten dieser Gesteine verwendet werden kann. Vom Verfassers dieser Arbeit ist für drei wasserführende Gesteine mit divergierender Wasserabgabe die Ausführung von Gleichungen angestellt worden; zugleich auch eine Methode zur Bestimmung des Filtrationskoeffizienten bei Auspumpungen gegeben.

Vor allem wollen wir die Art und Weise der Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten an zwei wasserführenden Schichten mit verschiedener Wasserabgabe klarlegen. Um das Problem des Wasserzuflusses zum Brunnen zu lösen, führt Schultze alle wasserführenden Schichten auf die Wasserdurchlässigkeit zurück und ersetzt die Leistungsfähigkeit einer jeden wasserführenden Schicht durch eine im Sinne der Filtration äquivalente Leistungsfähigkeit. Als Endresultat dieser Überlegungen wird aus der Formel Dupuits die Gleichung (82) für die Wasserabgabe eines Brunnens in zwei Schichten mit verschiedener Wasserabgabe abgeleitet. Die Gleichung für die Wasserabgabe eines solchen Brunnens lässt sich einfacher ableiten, wenn man den Wasserzufluss zum Brunnen in jeder wasserführenden Schicht in Betracht zieht. Dies führt zu Gleichung (83). Obschon die Ausdrücke (82) und (83) verschieden gestaltet sind, zeitigen sie doch durchaus gleiche Ergebnisse und der eine kann in den anderen mittels nicht komplizierter Verwandlungen übertragen werden. Unmittelbar kann man sich nicht für die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten einer jeden wasserführenden Schicht, der Gleichung bedienen, da in dieser beide Werte des Filtrationskoeffizienten enthalten sind. Die Lösung der Gleichung (83) hinsichtlich K_1 und K_2 ergibt die Ausdrücke (84) und (85). Nach der erstgenannten Gleichung (84) lässt sich der Wert K_1 bestimmen, falls der Filtrationskoeffizient K_2 bekannt ist und nach der letzteren (85)—gegenteilig. Für die Bestimmung der Filtrationskoeffizienten einer jeden wasserführenden Schicht sind zwei Methoden anzuwenden: diejenige Dobrowolsky's und die Samarin'sche.

K. I. Dobrowolsky schlägt vor, die Wasserauspumpung in der Weise zu organisieren, dass man sich vom zweiten Glied der Gleichung (85a), in deren

Bestand der Wert K_1 enthalten ist, befreien könnte, um sodann nach dem gefundenen Wert K_2 , auf Grund der Gleichung (84), den numerischen Wert K_1 zu bestimmen.

Dobrowolsky meint, dass zu diesem Zweck man die Auspumpungen derart zu organisieren hat, dass das erste Glied in den Klammern des Ausdrucks (85a) gleich eins ist. Diese Bedingung ist erfüllt bei $h_0 \approx 2a_2 - H$, was in Wirklichkeit nicht immer möglich ist, sondern bloss dann, wenn $2a_2 > H$ ist. Bei einem solchen Absinken des Wasserstands ist das zwischen den äussersten Klammern der letzten Gleichung stehende Glied nahe oder gleich Null, weswegen man für die Bestimmung von K_2 die Formel (86) benützen kann. Nachdem man den Wert K_2 gefunden und ihn in die Formel (84) substituiert hat, kann man den Filtrationskoeffizienten K_1 der oberen wasserführenden Schicht bestimmen.

Eine abstechende Methode zur Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten in Gesteinen mit verschiedener Wasserabgabe wird von E. A. Samarin vertreten. Zuerst bestimmt er mit Hilfe eines unvollkommenen Brunnens den Bodenfiltrationskoeffizienten der oberen wasserführenden Schicht. Hierzu muss der unvollkommene Brunnen bis zur oberen wasserführenden Schicht derart hinabgeführt werden, dass beim Auspumpen die aktive Nährungszone an der Oberfläche der Wasserscheide der wasserführenden Schichten I und II zu liegen kommt, und dass der Brunnen bloss vom Wasser der oberen Wasserschicht gespeist wird. Die Tiefe der aktiven Zone kann nach den vorbestimmten Absenkungselementen, gemäss den in I, § 2 angeführten Relationen Samarins berechnet werden. Auf Grund der Auspumpungsbefunde lässt sich der Bodenfiltrationskoeffizient K_1 , bei Anwendung der einschlägigen Formeln eines unvollkommenen Brunnens ermitteln. Darauf ist der Brunnen bis zur wasserundurchlässigen Schicht niederzutreiben und das Auspumpen zu wiederholen. Nachdem man neue Elemente (Tiefen und Verbräuche) bei der Auspumpung ermittelt hat, substituiert man deren Werte in Formel (85) mitsamt den früher bestimmten Werten von K_1 und errechnet hierauf den Bodenfiltrationskoeffizienten K_2 . Sind die wasserführenden Schichten tief eingelagert und wird bei Versuchsauspumpungen der Brunnen durch die gesamte wasserführende Schicht bis zur undurchlässigen Schicht nicht niedergebracht, so führt man die Rechnung anders durch. Die Forschung zur Bestimmung des Filtrationskoeffizienten wird unter Zuhilfenahme eines unvollkommenen Brunnens vorgenommen, weshalb sich dieselbe bedeutend verwickelter gestaltet. Der Filtrationskoeffizient der oberen wasserführenden Schicht wird, wie vorerwähnt, festgestellt; statt jedoch den Filtrationskoeffizienten der unteren wasserführenden Schicht zu ermitteln, bestimmt man, mittels Auspumpen eines unvollkommenen Brunnens, die Wasserundurchlässigkeit beider wasserführenden Schichten. Samarin ist der Ansicht, dass, behufs Charakterisierung der Wasserabgabe des Bodens man den Brunnen allmählich und mehrmals vertiefen und daraufhin, nach den sich ergebenden Befunden, die Änderungen des Filtrationskoeffizienten nach Massgabe des Niederganges, entwerfen soll. Bei homogenem Aufbau der unteren wasserführenden Schicht wird durch die Kurve der Bodenfiltrationskoeffizient charakterisiert und letzterer nähert sich dem

Wert des Koeffizienten K_2 . Auch ist, abgesehen von der beschriebenen Methode, zur Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten noch folgendes Verfahren anwendbar. Nachdem man mit Hilfe eines unvollkommenen Brunnens den Filtrationskoeffizienten der ersten wasserführenden Schicht K_1 ermittelt hat, kann man die in den Brunnen aus der unteren wasserführenden Schicht gelangende Wassermenge durch Subtraktion des Wasserverbrauchs der ersten Schicht von der Gesamtwasserabgabe der Bohröffnung bestimmen. Ist nun der Wasserverbrauch der unteren Schicht bekannt, so ermittelt man durch entsprechende Ausrechnung den Filtrationskoeffizienten K_2 .

Komplizierter ist die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten dreier wasserführender Schichten mit verschiedener Wasserabgabe. Die Ableitung der Gleichungen für drei wasserführende Schichten ist analog den vorerwähnten Ausführungen und führt zur Gleichung (87) für die Wasserabgabe des Brunnens. In der Formel (87) sind alle drei Filtrationskoeffizienten enthalten und es ist nicht möglich direkt auf deren Grundlage, den Filtrationskoeffizienten einer jeden wasserführenden Schicht zu bestimmen. Praktischerweise führt man die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten folgendermassen aus. Der Filtrationskoeffizient der oberen Wasserschicht K_1 wird wie vorstehend, mittels eines unvollkommenen Brunnens bestimmt, welcher derart angeordnet wird, dass die Tiefe der aktiven Zone gleich a_1 ist. Darauf treibt man den Brunnen in die zweite wasserführende Schicht so ein, dass die Tiefe der aktiven Zone $a_1 + a_2$ beträgt. Diesfalls lässt sich nach den Formeln eines unvollkommenen Brunnens der Koeffizient $K_{1,2}$ für beide Wasserschichten I und II ermitteln. Kennt man $K_{1,2}$, so bestimmt man nach Formel (85) den Filtrationskoeffizienten K_3 der dritten wasserführenden Schicht. Zu diesem Zweck nimmt man in Formel (85): anstatt K_1 den Wert des Filtrationskoeffizienten $K_{1,2}$ beider Wasserschichten, mit einer Leistungsfähigkeit $a_1 + a_2$ und statt a_2 den Wert a_3 ; dann erhalten wir statt K_2 den Wert des Filtrationskoeffizienten K_3 . Wir wollen diese Berechnung nach einer für die Beobachtungsbefunde an einem Kontrollbohrloch und einem Brunnen geschriebenen Formel (88) vornehmen. Da uns K_1 und K_3 bekannt sind, können wir den Bodenfiltrationskoeffizienten der zweiten wasserführenden Schicht K_2 aus der Gleichung (89) heraus bestimmen, letztere ist aus Gleichung (87) mittels deren Lösung betreffend K_2 erhalten worden. Auf diese Weise können die Werte der Filtrationskoeffizienten aller drei wasserführenden Schichten mit verschiedener Wasserabgabe errechnet werden.

Die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten kann auch nach Massgabe des Zeitraums der Fortbewegung der Grundwasser, ohne Abmessung der Wassermengen bei dem Auspumpen ausgeführt werden. Hierfür fixiert man an zwei beliebigen Punkten, längs dem Stromabfluss, die Wasserstandsziffer und die Zeitdauer des Flüssigkeitsdurchflusses zwischen diesen Punkten. Die Beobachtungen lassen sich entweder zwischen zwei in den sich fortbewegenden Strom hinabgeführten Kontrollbohrlöchern oder zwischen einer Kontrollbohröffnung und einem Brunnen, aus dem das Wasser herausgepumpt wird, bewerkstelligen.

Die gesamte Methode einer derartigen Bestimmung von K läuft auf fol-

gendes hinaus. Wir setzen den Abstand zweier beliebiger Beobachtungspunkte, wo der Wasserstandsunterschied sich bemerkbar macht, als bekannt voraus. Dann kann man dem Absinken des Wasserstands zwischen zwei Beobachtungspunkten zufolge, der Darcy'schen Formel nach, eine Gleichung für die Filtergeschwindigkeit in den Bodenporen schreiben. Bei der Durchführung von experimentellen Untersuchungen bestimmt man, verschiedene Indikatoren anwendend, die Zeit t , während deren die Flüssigkeitspartikel den Weg zwischen den zwei Beobachtungspunkten zurücklegen. Hat man diesen Zeitraum ermittelt, so kann man gleichfalls die Durchgangsgeschwindigkeit der Grundwässer pro Wegeinheit bestimmen. Durch Vergleich der Geschwindigkeitsausdrücke untereinander erhält man den Ausdruck (90) demzufolge der Bodenfiltrationskoeffizient sich bestimmen lässt.

Diese Gleichung ist jedoch nicht ganz genau, da bei deren Ausführung präsumiert wurde, dass das Gefälle und die Geschwindigkeit die Wegelänge hindurch konstant sind. Auch wird die Wasserbewegung durch die Konfiguration der unterlagernden Schicht beeinflusst, welchem Umstand Gleichung (90) nicht Rechnung trägt. Unter Inbetrachtung dieser Mängel bei der Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten, kann man eine genauere Gleichung ableiten, indem man auf hydraulischer Methode die Elemente des Stromes einschätzt.

Für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten nach Massgabe des Zeitraumes der Flüssigkeitsbewegung eines flachen Stromes wird eine Differentialgleichung der Bewegung, deren Integration die Berechnungsgleichungen ergibt (98), zusammengestellt.

Die Bestimmung des Bodenfiltrationskoeffizienten im Wirkungsbereich eines Grundwasserbrunnens zufolge der Zeit der Fortbewegung der Flüssigkeit, wird nach Formel (104) erledigt. Im Hinblick darauf, dass eine Differentialgleichung für einen Grundwasserbrunnen bloss näherungsweise beim Vorhandensein von numerischen Werten, in jedem Spezialfall abgeleitet werden kann, ist von uns diese Aufgabe auf vereinfachtem Wege, bei der Grössenbestimmung gelöst worden.

Für die Bestimmung des Filtrationskoeffizienten nach der Zeitdauer der Wasserfortbewegung in der Wirkungssphäre eines artesischen Brunnens wird eine Differentialgleichung abgeleitet, deren Integration die Berechnungsgleichung (105) ergibt.

Die hier vorgeschlagenen Gleichungen können weitgehende Anwendung finden, da die keine Wasserverbrauchseinschätzungen beim Auspumpen erreichende Bestimmungsmethode des Filtrationskoeffizienten vermöge Anwendung von Indikatoren, in der Praxis recht verbreitet ist.

ЗМІСТ

Передмова	5
I. Грунтові колодязі	7
§ 1. Досконалі ґрунтові колодязі	7
1. Фільтрація в пористих ґрунтах (7). 2. Фільтрація в гравелистах породах (8).	
3. Рух води в тріщинуватих породах (11).	
§ 2. Недосконалі ґрунтові колодязі	12
1 Колодязь працює дном і стінками (13). 2. Колодязь працює стінками (16). 3. Колодязь працює дном (18).	
II. Артезіанські колодязі	19
§ 1. Досконалі артезіанські колодязі	19
1. Фільтрація в пористих ґрунтах (19). 2. Фільтрація в гравелистах породах (21).	
3. Рух води в тріщинуватих породах (22).	
§ 2. Недосконалі артезіанські колодязі	23
1. Колодязь працює стінками і дном при кінцевій глибині водоносного шару (23).	
2. Колодязь доходить до водоносного шару і працює дном (24): а) Колодязь має півсферичну поверхню фільтруючого дна в пористих ґрунтах (25). б) Те саме в гравелистих породах (26). в) Те саме в тріщинуватих породах (27). г) Колодязь має плоске фільтруюче дно (27). д) Фільтруюче дно має еліптичну форму (29). е) Колодязь працює дном при граничній глибині водоносного шару (29). 3) Колодязь опущений нижче водонепроникної верстви (29) 4. Визначення коефіцієнта фільтрації на основі відновлення рівня (31).	
III. Ґрунтово-артезіанські колодязі	32
§ 1. Фільтрація в пористих ґрунтах	33
§ 2. Фільтрація в гравелистих породах	33
§ 3. Рух води в тріщинуватих породах	36
IV. Водопоглинаючі шурфи	37
§ 1. Метод Добровольського	37
§ 2. Метод Замаріна	38
§ 3. Метод Біндемана	40
§ 4. Метод автора	44
V. Дослідження верств різного водовіддавання	47
§ 1. Визначення коефіцієнтів фільтрації для двох водоносних шарів різного водовіддавання	47
§ 2. Визначення коефіцієнтів фільтрації для трьох водоносних шарів різного водовіддавання	51
VI. Визначення коефіцієнта фільтрації на основі часу просування ґрунтових вод	52
§ 1. Загальне визначення K	53
§ 2. Визначення K для плоского потоку	54
§ 3. Визначення K на основі часу просування води в сфері діяння ґрунтового колодязя	55
§ 4. Визначення K на основі часу просування води в сфері діяння артезіанського колодязя	57
Резюме	58
Zusammenfassung	73

ПОМІЧЕНІ ПОМИЛКИ

Стор.	Рядок	Надруковано	Читати
29	14	ж)	з)
56	7	} зверху	$\ln \frac{r_2}{r}$
"	10		



ПРИЙМАННЯ ЗАМОВЛЕНЬ ТА ПЕРЕДПЛАТИ

на всі видання Української Академії Наук провадиться в секторі
поширення Видавництва Української Академії Наук
Київ, вул. Чудновського, 2.

ПРОДАЖ ВИДАНЬ

у науковій книгарні Української Академії Наук — Київ, вул. Леніна, 12
і по всіх книгарнях Книгокультторгу

Друкарня-літографія Української Академії Наук у Києві