

И. М. НЕСТЕРЕНКО

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ФИЛЬТРАЦИИ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ГРУНТОВ

Коэффициенты фильтрации грунтов определяются в лабораторных условиях или непосредственно в поле. Обычно отдают предпочтение полевому методу, позволяющему изучать фильтрационные свойства в ненарушенных почвогрунтах, в естественных условиях их залегания. Как известно, существует несколько способов определения фильтрации в полевых условиях. Наиболее распространенным является способ инфильтрации воды в почву (способ Болдырева). Методика проведения его разработана многими исследователями (Болдырев, Зама-рин, Биндеман, Нестеров). Большинство исследователей указывают, что этот способ дает удовлетворительные результаты в сухих однородных грунтах при глубине залегания грунтовых вод не ближе 1—2 м.

Наши экспериментальные исследования проводились на Олонецкой озерно-ледниковой равнине, для которой свойственно многочленное строение почвенного профиля. Три верхних горизонта почвогрунтов этой равнины имеют небольшую мощность, до 0,2—0,3 м каждый. Значительную мощность имеет лишь нижний горизонт, который представлен супесями, суглинками или слоистыми глинами. Оторфованная прослойка и пахотный горизонт разобщены слабопроницаемым суглинком. Из этого следует, что по способу Болдырева можно определить коэффициент фильтрации только нижнего, достаточно мощного однородного слоя при значительной глубине залегания грунтовых вод в летний период.

Однако в летние периоды 1954—1956 гг. нами были поставлены многочисленные опыты по определению коэффициента фильтрации этим способом по всем горизонтам почвогрунтов. Определение производилось следующим образом: стальной цилиндр с внутренним диаметром 35,6 см (площадь 1000 см²) с заостренным нижним краем забивался в исследуемый грунт на глубину 8—10 см. Если между внутренней стенкой цилиндра и грунтом была щель, то грунт у стенки слегка уплотнялся, щель забивалась им или замазывалась глиной. Вода из бака поступала в цилиндр и с помощью поплавкового устройства поддерживалась на постоянном уровне (8—10 см над поверхностью почвы). Опыт длился от нескольких часов до 3 суток (в суглинках и глинах). Гидравлический градиент принимался равным 1 и коэффициент фильтрации определялся делением установившегося расхода воды на площадь фильтрации (1000 см²), исходя из следующих соображений. При условии ненарушенности и хорошего примыкания грунта

к стенкам цилиндра вода под напором в 8—10 см прежде всего проходит путь в 8—10 см строго по вертикали. В подпахотном слабо, проницаемом суглинке, мощность которого не превышает 0,30 м заметного растекания не происходит и после выхода за пределы стенок цилиндра, так как суглинок подстилается более водопроницаемой оторфованной прослойкой и вода по кратчайшему пути, т. е. по вертикали, стремится в более проницаемый слой.

В более мощном слое слабой проницаемости или в слоях грунта средней водопроницаемости если и происходит растекание после выхода воды из цилиндра (по нашим наблюдениям — незначительное), то количество воды, идущее на смачивание большего объема грунта, равно количеству воды, прошедшей через грунт, заключенный между стенками цилиндра, которое и определяет фильтрационные свойства грунта. Результаты определений приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты фильтрации исследуемых почвогрунтов (см/сек)

| № опыта | Пахотный горизонт | Подпахотный горизонт | Оторфованная прослойка | | Материнская порода по Болдыреву |
|---------|-------------------|----------------------|------------------------|---------|---------------------------------|
| | | | по Болдыреву | по Роте | |
| 1 | 0,00200 | 0,00010 | 0,00360 | 0,00500 | 0,000065 |
| 2 | 0,01400 | 0,00200 | 0,00130 | 0,00500 | 0,000100 |
| 3 | 0,00200 | 0,00003 | — | — | 0,000045 |
| 4 | 0,00300 | 0,00140 | — | — | — |
| 5 | 0,00100 | 0,00020 | 0,00060 | 0,00085 | 0,000005 |
| 6 | 0,00070 | 0,00090 | 0,00170 | 0,00085 | 0,000005 |
| 7 | 0,00100 | — | — | — | — |
| 8 | 0,01500 | — | — | — | 0,000020 |
| 9 | 0,00400 | 0,00020 | 0,00070 | 0,00085 | — |
| 10 | 0,01800 | 0,00005 | 0,00030 | — | 0,000004 |
| 11 | — | 0,00300 | — | — | — |
| 12 | 0,00500 | 0,00100 | 0,00100—0,08500 | — | — |

Как следует из этой таблицы, для пахотного горизонта почвы получены близкие значения коэффициентов фильтрации во всех опытах и равные 0,003 см/сек (непосредственно после вспашки коэффициенты фильтрации повышаются до 0,015 см/сек, т. е. возрастают в 5 раз).

Достаточно высокие коэффициенты фильтрации имеет и оторфованная прослойка ($k_{cp} = 0,001$ см/сек). В условиях Олонецкой равнины характер водного режима в значительной степени определяется проницаемостью подпахотного горизонта, что следует из многочисленных наблюдений и подтверждается результатами определения коэффициентов фильтрации. В отдельных местах подпахотный суглинок пронизан не только мелкими корнями растений, но и крупными корневыми трубками диаметром до 3 мм в количестве до 700 шт. на 1 м² (отмершие корневища хвоща). Коэффициенты фильтрации здесь высокие (0,001—0,002 см/сек), поэтому избыточные воды сравнительно легко проходят из пахотного горизонта в оторфованную прослойку. Эти земли обычно кратковременно-избыточного увлажнения (опыты

2, 4, 11 и 12). В основном на равнине подпахотные суглинки, как и ленточные суглинки и глины (материнская порода), имеют чрезвычайно низкие коэффициенты фильтрации (0,00005—0,000005 см/сек).

Для проверки значений коэффициентов фильтрации, полученных по способу Болдырева, были применены другие способы полевого определения. Весной по откосам осушителей замечен значительный приток внутрипочвенных вод по оторфованной прослойке, который замерялся с помощью специальных жестяных лотков, перехватывающих этот приток. По замеренному стоку по оторфованной прослойке и колебанию уровня грунтовых вод в ней были вычислены значения коэффициентов фильтрации по формуле, предложенной Писарьковым (5), исходя из формулы Роте: $k = \frac{CE^2}{40}$ [1].

Как видно из табл. 1, получены достаточно близкие значения k по обоим способам.

Существует еще один метод определения коэффициентов фильтрации в полевых условиях — по восстановлению воды в скважинах. Этот метод впервые был разработан за границей. Писарьков (5) указывает на следующие основные формулы:

Доната —

$$k = \frac{1,15F}{aHt} \lg \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H-y}{2H-y_0} \right) = 16,3 \frac{r^2}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [2];$$

Хаугхаудта —

$$k = \frac{2,3r}{(H+r)t} \lg \frac{y_0}{y} \quad [3].$$

Дизеренс определял некоторую величину A , пропорциональную коэффициенту фильтрации:

$$A = \frac{1000}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [4].$$

Им же было предложено величину $\frac{\lg \frac{y_0}{y}}{t} = \operatorname{tg} \alpha$ определять графически.

В вышеперечисленных и последующих формулах r или D — радиус или диаметр скважины; H — расстояние от уровня грунтовых вод до дна скважины; y_0 и y — расстояние от уровня грунтовых вод до откачки до уровня воды в скважине после откачки в начальный и последующие моменты времени (через t сек).

В последнее время широкое распространение этот метод определения коэффициента фильтрации получил и в СССР. Методика и вычисление коэффициентов фильтрации были разработаны Писарьковым (5), Эркиным (7, 8). В „Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам“ (4) и в ряде других работ (3) для определения коэффициентов фильтрации рекомендуются формула Доната с поправкой Писарькова:

$$k = 32 \frac{r^2}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [5].$$

и формула ВНИИБХ (7):

$$k = \frac{r}{2,6t} \left(\lg \frac{y_0}{y} + 4 \lg \frac{3H-y}{3H-y_0} \right) \quad [6].$$

Позже Эркиным (8) была предложена вторая формула:

$$k = \frac{3,5r^2}{(H+D)t} \lg \frac{y_0}{y} \quad [7].$$

На различных опытных участках Олонецкого мелиоративного стационара было проведено большое число опытных откачек из скважин диаметром 15 и 7,5 см и смотровых колодцев квадратного сечения (15×15 см).

При откачке из смотровых колодцев коэффициенты фильтрации определялись по формулам для круглого колодца, равновеликой площади поперечного сечения (площади 225 см² соответствует $D = 17$ см).

По В. А. Аравину (6) расход из скважин „можно вычислять с достаточной точностью по формуле круглого колодца, если принять радиус последнего равным среднему из радиусов вписанной и описанной окружностей многоугольников“, т. е. в нашем случае $r = 9$ см, что мало отличается от принятого нами $r = 8,5$ см.

Средние значения коэффициентов фильтрации, вычисленных по вышеуказанным формулам, приводятся в табл. 2, где для сравнения даны значения, определенные по способу Болдырева. Результаты определений близки в пределах одного метода вычисления как по откачке из скважин, так и из смотровых колодцев, но сильно отличаются при использовании различных формул.

Формула [2] получена Донатом по известному уравнению Дюпюи для безнапорного колодца:

$$Q = \frac{\pi k(H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r}} \quad [8].$$

Причем у Доната величина $a = \frac{\pi}{\ln \frac{R}{r}}$ принята постоянной и равной

0,33. Писарьков уменьшил ее в два раза, приняв равной 0,16 на основании сравнения коэффициентов фильтрации, рассчитанных по формуле Доната и стоку. Возможно, что для почвогрунтов Ленинградской области эта поправка справедлива, но коэффициент фильтрации для почвогрунтов Олонецкой равнины определен Писарьковым величиной 0,016 см/сек, безусловно завышенной, о чем говорят многочисленные определения, приведенные нами (табл. 1 и 2).

При $a = 0,16$ и $r = 7,5$ см радиус влияния скважины должен быть равным $27 \cdot 10^6$ м, что не может иметь места. В. А. Аравин и С. Н. Нумеров (1) приводят следующие значения радиуса влияния, определяемого при продолжительной откачке и установившемся расходе скважины:

- для мелкозернистых песков $R = 100-200$ м;
- для среднезернистых песков $R = 250-500$ м;
- для крупнозернистых песков $R = 700-1000$ м.

По нашим наблюдениям, в суглинистых и глинистых грунтах Олонецкой равнины влияние скважины при кратковременной откачке воды не успевает распространиться на расстояние свыше 1—1,5 м. В этом случае $a = 1,1$ и формула Доната приобретает вид:

$$k = \frac{5r^2}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [9].$$

При откачке в оторфованной прослойке радиус влияния достигает 10—15 м и множитель в формуле Доната должен быть уменьшен в два раза, т. е.

$$k = \frac{8,2r^2}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [10].$$

Таблица 2

Коэффициенты фильтрации, вычисленные по различным формулам (см/сек)

| № опыта | По методу откачки из скважин | | | | | | | По способу Болдырева | $K = \frac{CE^2}{40}$ | Примечание |
|---------|--|--|---|---|---|--|--|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| | Донат $K = 16,3 \frac{r^2}{H} \operatorname{tg} \alpha$ | Писарьков $K = 32,6 \frac{r^2}{H} \operatorname{tg} \alpha$ | Эркин $K = 0,8 r \operatorname{tg} \alpha$ | Эркин $K = \frac{3,5 r^2}{H+D} \operatorname{tg} \alpha$ | Хаугхаудт $K = \frac{2,3 r}{H+r} \operatorname{tg} \alpha$ | $K = \frac{3,5 r}{2H+r-i_0} \operatorname{tg} \alpha'$ | $K_{\text{суг.}} = 5 \frac{r^2}{H} \operatorname{tg} \alpha$ $K_{\text{оторф.}} = 8,2 \frac{r^2}{H} \operatorname{tg} \alpha$ | | | |
| 1 | 0,000140 | 0,000280 | 0,000070 | 0,000026 | 0,000022 | 0,0000035 | 0,000045 | 0,000065 | — | см. колодцы |
| 2 | 0,000140 | 0,000280 | 0,000070 | 0,000026 | 0,000025 | 0,0000034 | 0,000045 | 0,000045 | — | скважина, $D = 15 \text{ см}$ |
| 3 | 0,000150 | 0,000300 | 0,000045 | 0,000030 | 0,000025 | 0,0000100 | 0,000050 | — | — | скважина, $D = 7,5 \text{ см}$ |
| 4 | 0,000160 | 0,000320 | 0,000035 | 0,000022 | 0,000025 | 0,0000070 | 0,000050 | — | — | см. колодцы |
| 5 | 0,000130 | 0,000260 | 0,000050 | 0,000022 | 0,000025 | 0,0000120 | 0,000040 | — | — | см. колодцы |
| 6 | 0,000130 | 0,000270 | 0,000040 | 0,000026 | 0,0000050 | — | 0,000042 | — | — | скважины, $D = 7,5 \text{ см}$ |
| 7 | 0,000015 | 0,000030 | 0,000005 | 0,000003 | 0,0000004 | 0,000002* | 0,000005 | 0,000005 | 0,0006 | *при $i_0 = 30 \text{ см}$ |
| 8 | 0,000100 | 0,000200 | 0,000050 | 0,000020 | 0,0000016 | — | 0,000030 | 0,000020 | — | |
| 9 | 0,014000 | 0,028000 | 0,002000 | 0,002000 | 0,0002000 | — | 0,006000 | 0,003000 | 0,0030 | |
| 10 | 0,100000 | 0,200000 | 0,020000 | 0,010000 | 0,0010000 | 0,0015000 | 0,050000 | — | 0,0030 | |

К вопросу определения коэффициентов фильтрации

Приведенные выше значения R , наблюдаемые при непродолжительных откачках, показывают, что влияние скважины в слабо фильтрующих грунтах не успевает распространиться на значительное расстояние. Более того, у самой скважины понижение незначительно, заметно поступление воды по ее стенкам выше уровня воды, т. е. кривая депрессии не сопрягается с уровнем воды в скважине, что у некоторых авторов вызывает сомнения в правильности применения уравнения Дюпюи для определения коэффициентов фильтрации (3,7). Аравин и Нумеров (1) по этому поводу пишут: „Если, как показывают экспериментальные исследования, кривая депрессии близ безнапорного колодца сильно отклоняется от теоретической, то в пределах точности этих исследований фильтрационный расход не отличается от теоретического, вычисленного по формуле“... [7]. Поэтому вывод Доната следует считать теоретически обоснованным и формула для определения коэффициента фильтрации применима в общем виде:

$$k = \frac{5,4r^2}{aHt} \lg \frac{y_0}{y} \quad [11].$$

С учетом влияния скважин по формулам [9], [10] были подсчитаны коэффициенты фильтрации, приводимые в табл. 2. Они хорошо согласуются с данными, полученными по способу Болдырева, а также рассчитанными по внутрипочвенному стоку по оторфованной прослойке (опыт 9). В опыте 7 откачка производилась из слабоводопроницаемых ленточных глин. В последней графе приводится значение коэффициента фильтрации для оторфованной прослойки, рассчитанного по дренажному стоку и равного коэффициенту фильтрации, вычисленному по Болдыреву (табл. 1, опыт 5).

Сомнение может вызвать правильность применения формулы [9] в тонкослоистых грунтах. В том случае, когда грунт представлен чередующимися слоями супеси или песка и суглинка или глины и вода в прослойках супеси или песка находится под некоторым напором, расход из каждой прослойки может быть подсчитан по формуле Дюпюи для дебита скважин в условиях напорных вод:

$$Q = \frac{2k\pi mS}{\ln \frac{R}{r}} \quad [12],$$

где m — мощность напорного пласта;

S — понижение уровня воды при откачке.

Если суммарная мощность фильтрующих прослоек составляет некоторую часть величины H , равную βH , то при понижении уровня воды в скважине на y можно составить уравнение:

$$-F \frac{dy}{dt} = \frac{2\pi k \beta H y}{\ln \frac{R}{r}}.$$

Подставив величину $F = \pi r^2$ и интегрируя, приняв при $t=0$, $y = y_0$ получаем:

$$k = \frac{r^2 \ln \frac{R}{r}}{2\beta H t} \ln \frac{y_0}{y} = \frac{1,15r^2 \ln \frac{R}{r}}{\beta H t} \lg \frac{y_0}{y}.$$

Или, если учесть, что при непродолжительности откачки в слоистых слабофильтрующих грунтах влияние скважин распространяется на расстояние $R = 1,5$ м при диаметре скважины 15—20 см, то

$$\ln \frac{R}{r} \cong 3,0 \text{ и } k = \frac{3,45r^2}{\beta H t} \lg \frac{y_0}{y} \quad [13].$$

Для слоистых грунтов Олонецкой равнины (опыты 7,8) $\beta \cong 0,5$, тогда

$$k = \frac{6,9r^2}{Ht} \lg \frac{y_0}{y} \quad [14].$$

т. е. полученные по формуле [9] значения коэффициентов фильтрации для слоистых грунтов должны быть увеличены незначительно — в 1,4 раза.

Авторы второй группы формул [3, 6 и 7] непосредственно исходят из того, что депрессионная кривая вокруг скважины почти не выражена и ею можно пренебречь.

Хаугхаудт принимал движение воды через стенки скважины горизонтальным и давление воды в каждый момент равным $y/2$, а давление через дно равным y , откуда и получено им уравнение [3]. Следует уточнить, однако, величину давления, распределяемого по стенке скважины. Необходимо выделить не две, а три зоны давления.

До уровня воды в скважине давление изменяется от 0 до y и равно в среднем $y/2$. Во II зоне — от уровня воды в скважине до дна скважины оно постоянно и равно y . В III зоне давление на дно скважины — y . Тогда за небольшой промежуток времени dt приход воды в скважину будет:

$$\pi r^2 \frac{dy}{dt} = k \frac{y}{2} y 2\pi r + ky (H - y) 2\pi r + k y \pi r^2 \quad [15].$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{r} (2yH + ry - y^2).$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$k = \frac{2,3r}{(2H+r)t} \lg \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H+r-y}{2H+r-y_0} \right) \quad [16].$$

Донат для упрощения принял

$$\lg \left(\frac{y_0}{y} \cdot \frac{2H-y}{2H-y_0} \right) = m \lg \frac{y_0}{y} \text{ и } m = 1,5.$$

Подсчеты показали, что это же упрощение можно сделать и в формуле [16]. Тогда

$$k = \frac{3,5r}{2H+r} \operatorname{tga} \quad [17].$$

Однако как по формуле 3, так и 17 в слабопроницаемых грунтах получаются значения коэффициентов фильтрации в десятки и даже сотни раз меньше по сравнению с рассчитанными по другим формулам и способам. Это в некоторой степени объясняется следующим. Полубарина-Кочина (6) пишет: „В плотных глинах и тяжелых суглинках, в которых вода содержится в молекулярно-связанном виде, явление фильтрации возникает лишь тогда, когда градиент напора превышает некоторое значение i_0 , называемое начальным градиентом. В этом

случае уравнение $v = -k \frac{dh}{ds}$ заменяется таким: $v = -k \left(\frac{dh}{ds} - i_0 \right)$. Для очень плотных глин i_0 может достигать значений, равных 20—30“ (стр. 28).

Наблюдения в суглинистых и глинистых грунтах Олонецкой равнины показывают, что скорость восстановления воды в скважинах после откачки при достижении уровня на 20—30 см ниже первоначального резко замедляется. Это хорошо видно при построении зависимости

изменения $\lg \frac{y_0}{y}$ во времени для нахождения величины $\operatorname{tga} = \frac{\lg \frac{y_0}{y}}{t}$.

(рис.). Первоначально точки располагаются по прямой, но при величине $y = 20-30$ см они резко отклоняются от нее. Следовательно, необходимо учитывать величину начального градиента.

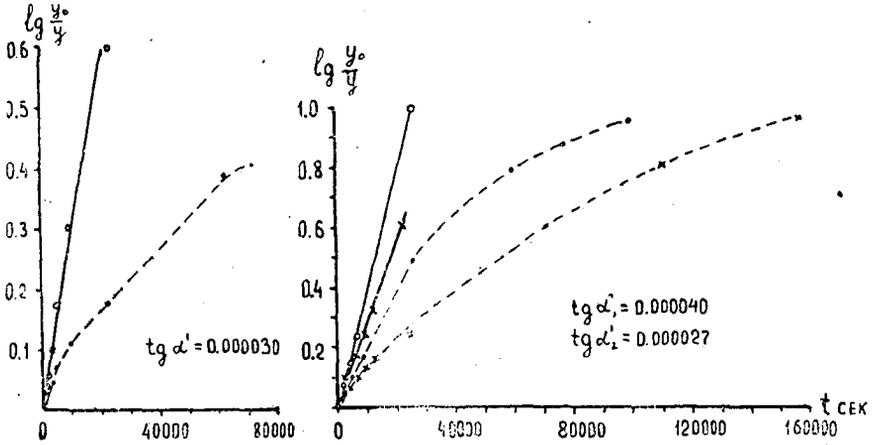


Рис. Графики зависимости изменения $lg \frac{y_0}{y}$ во времени

— при учете начального градиента напора i_0 ;
 - - - - без учета начального градиента напора i_0 .

Допустим, что в слабопроницаемых грунтах для возникновения фильтрации необходим начальный градиент i_0 . Тогда в предыдущем выводе необходимо соответственно уменьшить величину давления на i_0 :

$$-\frac{dy}{dt} = \frac{k}{r} [(y - i_0)y + 2(y - i_0)(H - y) + r(y - i_0)] = \\ = \frac{k}{r} (y - i_0)(2H + r - y).$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$k = \frac{2,3r}{(2H + r - i_0)t} \lg \left(\frac{y_0 - i_0}{y - i_0} \cdot \frac{2H + r - y}{2H + r - y_0} \right). \quad [18]$$

При $i_0 = 0$ формула [18] переходит в формулу [16].

$$\text{Принимая } \lg \left(\frac{y_0 - i_0}{y - i_0} \cdot \frac{2H + r - y}{2H + r - y_0} \right) = 1,5 \lg \frac{y_0 - i_0}{y - i_0}.$$

$$\text{получим } k = \frac{3,5r}{2H + r - i_0} \cdot \frac{\lg \frac{y_0 - i_0}{y - i_0}}{t} = \frac{3,5r}{2H + r - i_0} \text{tg} \alpha' \quad [19].$$

Как показали расчеты, коэффициенты фильтрации, вычисленные по формуле [19], в 3—5 раз выше полученных по формуле Хаугхаудта и близки к значениям, найденным по формулам [7, 19 или 10], особенно в том случае, когда откачка производится на небольшую глубину — до 0,5 м (табл. 2). Величина начального градиента после анализа большого числа графиков $\left[\lg \frac{y_0}{y} = f(t) \right]$ принималась равной

20 см. Точки значений $\lg \frac{y_0 - i_0}{y - i_0}$ легли теперь по прямой (рис.).

Однако, следует отметить, что и формула [19] дает заниженные по

сравнению с другими методами величины коэффициентов фильтрации. Очевидно, следует ввести некоторый постоянный для каждого грунта коэффициент пропорциональности, уточняющий зависимость скорости фильтрации от давления.

Для торфа по формулам [3 и 19] получены значения коэффициента фильтрации, близкие к рассчитанному по Роте (табл. 2, опыт 10).

Формулы [6 и 7] Эркина выведены также для слабопроницаемых грунтов, в которых воронка депрессии не успевает образоваться.

Следует отметить, что формула [6] может быть значительно упрощена. Сумма логарифмов в ней при незначительной глубине откачки $H = 0,5 - 1,0$ м может быть заменена, как показали расчеты, через

$$\lg \frac{y_0}{y} + 4 \lg \frac{3H - y}{3H - y_0} = 2,15 \lg \frac{y_0}{y}.$$

Тогда формула [6] для проведения графического расчета примет вид:

$$k = 0,8 r t g \alpha \quad [20].$$

Таким образом, по имеющимся у нас данным для определения коэффициентов фильтрации методом восстановления воды в скважинах можно рекомендовать следующие формулы.

1. В слабопроницаемых грунтах при величине $H = 0,5 - 1,0$ м формула Доната в общем виде [11]: $k = \frac{5,4 r^2}{aHt} \lg \frac{y_0}{y}$ или более упрощенная формула Эркина [20]: $k = \frac{0,8r}{t} \lg \frac{y_0}{y}$.

2. В слабопроницаемых грунтах при H до 0,5 м и величине начального градиента i_0 до 0,2 м, когда трудно по вышеприведенным фор-

мулам найти $t g \alpha = \frac{\lg \frac{y_0}{y}}{t}$ ввиду разбросанности точек —

$$k = \frac{3,5r}{2H + r - i_0} t g \alpha'.$$

Вышеприведенная формула дает хорошие результаты при вычислении коэффициентов фильтрации в торфах.

3. В тонкослоистых грунтах (ленточные супеси, суглинки или глины) — формула [13]: $k = \frac{3,45 r^2}{\beta H t} \lg \frac{y_0}{y}$.

Сектор болотоведения и лесной
мелиорации Института леса
Карельского филиала АН СССР

Поступила в редакцию
17/IV 1958

ЛИТЕРАТУРА

1. Аравин В. А., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде. М., 1952.
2. Гармонов И. В., Лебедев А. В. Основные задачи по динамике подземных вод. Госгеолиздат, 1952.
3. Иванов К. Е. Гидрология болот. Гидрометеиздат, 1953.
4. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8, 1955.
5. Писарьков Х. А. Сравнительная оценка некоторых способов определения коэффициентов фильтрации. Материалы по поднятию производительности сельскохозяйственных земель посредством мелиорации, вып. II, гидротехнический сб., 1937.
6. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., 1952.
7. Эркин Г. Д. Определение водопроницаемости заболоченных почв в полевой обстановке. Почвоведение, № 5, 1937.
8. Эркин Г. Д. Водопроницаемость болот в связи с их осушением. Минск, 1940.