

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ДРЕНАМИ В ДВУСЛОЙНОМ ГРУНТЕ

В. А. ИОНАТ,
кандидат технических наук

При расчете дренажа обычно принимается, что дрены закладываются в однородный грунт. При осушении мелких торфяников и тяжелых минеральных почв, когда дрены закладываются в нижележащий минеральный грунт, резко отличающийся по своим фильтрационным свойствам от верхнего слоя (торф в случае мелких торфяников или пахотный горизонт в случае минеральных грунтов), такое допущение грубо искажает действительную картину работы дренажа, а расчет по принятой схеме приводит к неправильным результатам.

Попытка проф. Х. А. Писарькова^[1] дать формулу для расчета дрен в двухслойном грунте оказалась безуспешной, так как Х. А. Писарьков неверно применил уравнение Дюпюи для двухслойных грунтов. Основываясь на работах Г. Н. Каменского^[2], Х. А. Писарьков применяет уравнение Дюпюи не только для случая, когда кривая депрессии располагается в верхнем слое, но и в том случае, когда она пересекает кровлю нижнего пласта. Уравнение Дюпюи получает у Писарькова следующий вид:

$$q = K_{\text{ср}} y \frac{dy}{dx}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента фильтрации, вычисленное по формуле

$$K_{\text{ср}} = \frac{k_1 h_1 + k_2 (y - h_1)}{y}. \quad (2)$$

Принятое выражение для значения $K_{\text{ср}}$ распространяется Х. А. Писарьковым на всю зону фильтрации, что недопустимо, так как уравнение (2) несправедливо для части, где депрессионная кривая располагается в нижнем пласте ($x < x_0$).

Действительно, при $y = h_1$ $K_{\text{ср}} = k_1$, т. е. условие (2) еще выполняется, однако при $y < h_1$ оно не выполняется, так как здесь

$$\frac{k_1 h_1 + k_2 (y - h_1)}{y} \neq k_1.$$

Чтобы доказать это, положим, что на участке, где $y < h_1$ $y = \alpha h_1$ ($\alpha < 1$). При этом условии

$$K_{\text{ср}} = \frac{k_1 h_1 + k_2 (\alpha h_1 - h_1)}{\alpha h_1} = \frac{k_1 + (\alpha - 1)k_2}{\alpha} \neq k_1,$$

так как это возможно только при $\alpha = 1$, что противоречит ранее принятому условию.

Второй ошибкой, допущенной Х. А. Писарьковым при выводе формулы, является неправильное назначение пределов интегрирования, в результате чего в выражение расхода во вторых степенях вошли полные напоры над водоупором, что совершенно неверно, так как безнапорное движение происходит только в пределах верхней зоны, движение же в нижнем пласте (на участке $x_0 \leq x \leq S$) необходимо рассматривать как движение в артезианском пласте. Движение на участках $0 \leq x \leq x_0$ и $x_0 \leq x \leq S$ происходит по различным законам, что не было принято во внимание Х. А. Писарьковым.

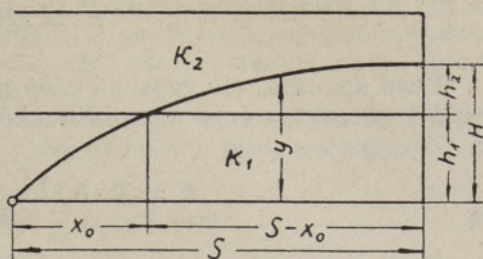


Рис. 1.

Формула проф. Писарькова имеет следующий вид:

$$E = 2 \sqrt{\frac{2k_1 h_1 H + k_2 H^2 - 2k_2 h_1 H}{p}}, \quad (3)$$

где p — расчетное количество осадков;

E — расстояние между дренами.

Значения остальных элементов ясны из рис. 1.

Формула проф. Х. А. Писарькова уже при соотношении коэффициентов фильтрации больше 5 дает совершенно непригодные для практики результаты. Для иллюстрации сказанного приведем следующий пример:

Предположим, что дрена заложены в грунт с коэффициентом фильтрации $k_1 = 0,001$ см/сек $= 10^{-5}$ м/сек, причем мощность нижнего слоя, в котором расположена дрена, равна 0,5 м (дрена предполагается уложенной на водоупор). Пусть глубина закладки дрены равна 1,2 м, верхний слой мощностью 0,7 м имеет коэффициент фильтрации $k_2 = 0,005$ см/сек $= 5 \cdot 10^{-5}$ м/сек. Предположим далее, что для поддержания необходимой нормы осушения (0,4 м) необходимо обеспечить отвод расчетного расхода $p = 0,2$ л/сек/га $= 2 \cdot 10^{-8}$ м³/сек м². Тогда по требное расстояние между дренами, по Х. А. Писарькову, составит:

$$E = 2 \sqrt{\frac{10^{-5} (2 \cdot 0,5 \cdot 0,8 + 5 \cdot 0,8^2 - 2 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 0,8)}{2 \cdot 10^{-8}}} =$$

$$= 2 \sqrt{\frac{(0,8 + 3,2 - 4,0) 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-8}}} = 0.$$

По данным Полубариновой-Кочиной^[3], коэффициентом фильтрации 0,001—0,005 см/сек обладает супесь.

По Х. А. Писарькову получается, что в данном случае дрена, заложённая в грунт, работать не будет, что совершенно неверно и опровергается наблюдениями, произведенными нами на опытных участках, сложенных гораздо менее проницаемыми грунтами. Даже в этих условиях дрена довольно хорошо работают, несмотря на то, что отношение $k_2 : k_1$ здесь гораздо больше 5. Как указывает Д. П. Юневич^[5], при $k_2 = k_1$ уравнение Писарькова приводится к уравнению Ротэ:

$$E = 2H \sqrt{\frac{k}{p}}$$

Если принять, что верхний слой имеет проницаемость нижнего слоя, то в этом случае (при $k_2 = 0,001$ см/сек и $H = 0,8$ м)

$$E = 2 \cdot 0,8 \sqrt{\frac{10^{-5}}{2 \cdot 10^{-8}}} = 35,8 \text{ м.}$$

Если пользоваться уравнением Х. А. Писарькова, мы вынуждены прийти к совершенно парадоксальному выводу, а именно, что рыхление и окультуривание верхних слоев почвы (при котором увеличивается коэффициент фильтрации верхнего слоя) приводит к ухудшению работы осушительной сети. Покажем это опять на примере. При тех же условиях, но при $k_2 = 7k_1$

$$E = 2 \sqrt{\frac{(0,8 + 4,5 - 5,3)10^{-5}}{2 \cdot 10^{-8}}} = 2 \sqrt{-\frac{0,3 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-8}}}$$

Подкоренное выражение получилось даже отрицательным. Таким образом, формула проф. Х. А. Писарькова практически для расчетов непригодна и ее необходимо заменить новой формулой, дающей более правильное решение.

Для вывода формулы, дающей возможность определить расстояние между дренами в двуслойном грунте, воспользуемся следующими допущениями.

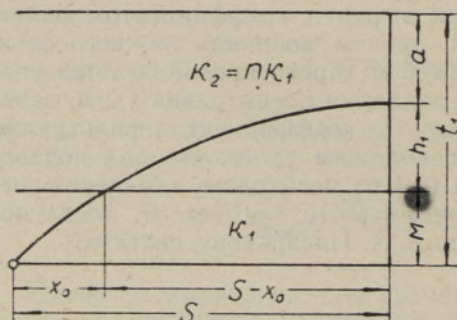


Рис. 2.

1. Кривая депрессии, при расположении дрены на водоупоре, имеет форму эллипса. Данное положение подтверждается наблюдениями, проведенными в лотках, где верхний слой моделировался как слой в 100 раз более проницаемый, чем нижний. Даже в этом случае только на границе раздела обнаруживалась небольшая переходная площадка, где на форму кривой депрессии влияло отношение $k_2 : k_1$.

2. Расчет ведется на пропуск расчетного расхода при установившемся движении.

Пренебрегая значением h_0 — глубиной воды в дрене, уравнение депрессионной кривой можно представить в виде

$$y^2 = \frac{(h_1 + M)^2}{S^2} [S^2 - (S - x)^2]. \quad (4)$$

Расход в каждом сечении $x_0 \ll x \ll S$ (рис. 2), где $y \gg M$, можно рассматривать как сумму расходов, проходящих в верхнем и нижнем слоях. В верхнем слое мы имеем обыкновенный грунтовый поток со свободной поверхностью. Поток в нижнем слое можно рассматривать как напорный. Пьезометрические напоры для нижнего пласта несколько отличаются от свободных уровней верхнего, однако это различие, как указывает Г. Н. Каменский [4], при небольших падениях депрессионной кривой очень

невелико, и без существенной погрешности можно допустить, что кривая депрессии в верхнем слое одновременно является и пьезометрической кривой для нижнего слоя. Принимаем, что на участке $S - x_0$ мы можем воспользоваться этим допущением.

Дифференциальное уравнение Дюпюи для сечения $x_0 \leq x \leq S$ в рассматриваемом случае будет иметь следующий вид (при атмосферном питании):

$$q = (k_1 M + k_2 h) \frac{dh}{dx} = p(S - x). \quad (5)$$

Интегрируя полученное уравнение в пределах от x_0 до S , получим:

$$\int_{x_0}^S q dx = \int_0^{h_1} (k_1 M + k_2 h) dh = \frac{2k_1 M h_1 + k_2 h^2}{2} = q(S - x_0) = \frac{p(S - x_0)^2}{2},$$

где h_1 — напор над кровлей нижнего пласта при $x = S$.

Заменив $k_2 = nk_1$, получим окончательно:

$$q = \frac{k_1 h_1 (2M + n h_1)}{2(S - x_0)} = \frac{p(S - x_0)}{2}, \quad (6)$$

где

$$n = \frac{k_2}{k_1}.$$

Отсюда

$$(S - x_0)^2 = \frac{k_1 h_1 (2M + n h_1)}{p}. \quad (7)$$

Из уравнения (4) при $x = x_0$ и $h = M$ найдем

$$M^2 = \frac{(h_1 + M)^2}{S^2} [S^2 - (S - x_0)^2]$$

или

$$(S - x_0)^2 = \frac{S^2 h_1 (2M + h_1)}{(M + h_1)^2}. \quad (7a)$$

Выражение (7) может быть переписано в следующем виде:

$$(S - x_0)^2 = \frac{S^2 h_1 (2M + h_1)}{(M + h_1)^2} = \frac{k_1 h_1 (2M + n h_1)}{p}, \quad (8)$$

откуда

$$S = (h_1 + M) \sqrt{\frac{k_1}{p} \frac{(2M + n h_1)}{(2M + h_1)}}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что $E = 2S$, получим

$$E = 2(M + h_1) \sqrt{\frac{k_1}{p} \frac{(2M + n h_1)}{(2M + h_1)}}; \quad (10)$$

при $k_2 = k_1$, т. е. при $n = 1$,

$$E = 2(M + h_1) \sqrt{\frac{k_1}{p}},$$

т. е. формула (10) приводится к формуле Ротэ.

Принимая во внимание, что $M + h_1 = t_1 - a$, где t_1 — глубина закладки дрен; a — норма осушения, формулу (10) можно переписать также в следующем виде:

$$E = 2(t_1 - a) \sqrt{\frac{k_1(2M + nh_1)}{p(t_1 + h_1 - a)}}. \quad (11)$$

Проф. Писарьков для установления наиболее выгодной глубины заложения дренажа в двуслойном грунте предложил таблицу, основанную на условии:

$$\frac{dE}{dh_1} = 0; \quad \frac{d^2E}{dh_1^2} < 0 \text{ и } h_2 = \text{const},$$

где E вычисляется по формуле (3).

Д. П. Юневич^[5], комментируя таблицу проф. Х. А. Писарькова, делает вывод, что «при отношении коэффициентов фильтрации больше пяти (1 : 0,2) нижний слой следует считать водоупором для верхнего и дрены, следовательно, следует укладывать на водоупоре» (т. е. на кровле нижнего слоя). Покажем беспочвенность подобного утверждения.

Если нижний слой является водоупором, то кривая депрессии должна полностью располагаться в верхнем слое. Теоретически это может быть только при $k_1 = 0$, т. е. при $n = \infty$. Можно считать, что практически этот переход происходит раньше, уже при некотором соотношении коэффициентов фильтрации, которое назовем $n_{кр}$. В этом случае подавляющая часть расхода движется в верхнем слое и только незначительная его доля поступает по нижнему. На участке $x_0 \leq x \leq S$ расход, поступающий к сечению $x = x_0$, можно рассматривать как сумму расходов q_1 и q_2 , т. е.

$$q = q_1 + q_2,$$

где $q_1 = k_1 M \frac{dh}{dx}$ — расход нижнего слоя,

$q_2 = k_2 h \frac{dh}{dx}$ — расход верхнего слоя.

Отношение расходов

$$\frac{q_2}{q_1} = n \frac{h}{M}. \quad (12)$$

Как видно из формулы (12), движение на участке $x_0 \leq x \leq S$ происходит при переменном соотношении расходов.

Предположим теперь, что проницаемость нижнего слоя начинает уменьшаться (при $k_2 = \text{const}$). Вследствие уменьшения проницаемости нижнего горизонта, пропускная способность его будет также уменьшаться, линия депрессии будет все более выходить из нижнего слоя, пока практически не окажется в верхнем. Аналогичное явление может наблюдаться при неизменном k_1 , но при увеличивающейся интенсивности осадков, вследствие увеличения расчетного расхода. При $h_0 = M$ линия депрессии полностью выходит из нижнего слоя и расход, который входит в дренажную траншею, определяется уравнением

$$q = \frac{k_1 h_1 (2M + nh_1)}{2S} = \frac{pS}{2}, \quad (13)$$

так как в этом случае $S - x_0 = S$. Дальнейшее увеличение расхода или уменьшение проницаемости нижнего слоя приводит к тому, что на бровке траншеи устанавливается некоторая высота выклинивания, размер которой можно определить из следующих соображений:

$$\text{по Ротэ (при } k_1 = 0) \quad q = \frac{k_2 (h_1^2 - h_0^2)}{2S} = \frac{pS}{2}, \quad (14)$$

откуда

$$h_0' = \sqrt{\frac{k_2 h_1^2 - \rho S^2}{k_2}}. \quad (15)$$

С другой стороны, в точке $x = 0$, согласно (12)

$$\frac{q_2}{q_1} = n \frac{h_0'}{M}. \quad (16)$$

Если принять, что при практически водонепроницаемом нижнем слое в нем проходит только 0,01 общего расхода q , то в точке $x = 0$

$$\frac{q_2}{q_1} = n \frac{h_0'}{m} = 99. \quad (17)$$

Решая совместно уравнения (15) и (17), получим

$$n = \frac{99M\sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1 h_1^2 - \rho S^2}}. \quad (18)$$

При n , определяемом выражением (18), происходит практический переход от движения в двуслойной среде к движению только в верхнем слое. Назовем это отношение критическим отношением коэффициентов фильтрации $n_{кр}$. Таким образом,

$$n_{кр} = \frac{99M\sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1 h_1^2 - \rho S^2}}. \quad (19)$$

Как видно из формулы (19), значение $n_{кр}$ зависит от ряда факторов. При постоянных M , k_2 и h_1 значение $n_{кр}$ будет зависеть от ρ и S .

Если ρ — постоянно, то значение $n_{кр}$ будет функцией только одного S . При S равном $S_{кр}$, где

$$S_{кр} = h_1 \sqrt{\frac{k_2}{\rho}}, \quad (20)$$

знаменатель выражения (19) обращается в нуль и $n_{кр} = \infty$, т. е. движение происходит полностью в верхнем слое. При $S > S_{кр}$ подкоренное выражение в знаменателе (19) становится отрицательным, что указывает вообще на невозможность движения по пахотному слою, так как в этом случае для движения по пахотному слою нужно, чтобы отношение реальных коэффициентов фильтрации $n = k_2 : k_1$ было бы больше ∞ , что невозможно.

Для определения формы движения при реальных значениях n необходимо определить $n_{кр}$ и сравнить n реальное (n_p) с $n_{кр}$. При $n_p \leq n_{кр}$ движение идет с пересечением кровли нижнего горизонта. При $n_p > n_{кр}$ движение идет только по верхнему слою.

В качестве примера рассмотрим следующий случай. Пусть $M = 0,5$ м, $h_1 = 0,3$ м, $\rho = 3 \cdot 10^{-8}$ м³/сек · м², $k_2 = 10^{-5}$ м/сек, $k_1 = 3 \cdot 10^{-8}$ м/сек и $S = 5$ м. Определим форму движения в этом случае.

$$n_p = \frac{k_2}{k_1} = \frac{10^{-5}}{3 \cdot 10^{-8}} = 333, \quad n_{кр} = \frac{99 \cdot 0,5 \sqrt{10^{-5}}}{\sqrt{10^{-5} \cdot 0,3^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot 25}} = 396.$$

Так как $n_p < n_{кр}$, то движение идет в обоих слоях и линия депрессии пересекает кровлю нижнего слоя. Предположим теперь, что $S = 3$ м, тогда

$$n_{кр} = \frac{99 \cdot 0,5 \sqrt{10^{-5}}}{\sqrt{10^{-5} \cdot 0,3^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot 9}} = 197.$$

Поскольку $n_p > n_{кр}$, движение идет по верхнему слою.

Таким образом, для движения только в верхнем слое необходимы довольно большие значения n , весьма отличные от пяти, что указывает на неприемлемость рекомендаций проф. Х. А. Писарькова и Д. П. Юневича, которые принижают роль работы нижнего пласта.

Как видно из формулы (10), толщина нижнего слоя, т. е. глубина закладки дрены в нижний слой, при $n < n_{кр}$ играет существенную роль в работе дрены вследствие того, что по нижнему пласту поступает довольно большой расход. С другой стороны, очевидно, что при $n > n_{кр}$ закладка дрен в нижний слой с гидротехнической точки зрения является бессмысленной. Глубина закладки дрен в этом случае должна определяться в основном условиями сохранности дрен, и при наличии достаточно мощного верхнего слоя дрены можно укладывать на кровлю нижнего. В тех случаях, когда верхний слой имеет малую мощность и дрены по условиям их сохранности необходимо укладывать в нижний слабопроницаемый слой, засыпку дренажных траншей необходимо делать из хорошо проницаемых материалов, так как дрена в этом случае работает в основном как закрытый собиратель.

При пользовании формулой (10) необходимо учитывать, что при $k_2 < p$ установившееся движение невозможно вследствие малой пропускной способности верхнего пласта. Последнее будет приводить к накоплению выпавших осадков и повышению уровней в верхнем слое, что по условиям установившегося движения недопустимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. А. Писарьков, К теории определения расстояний между дренами в неоднородных грунтах, СНИИГиМ, Материалы по поднятию производительности с.-х. земель посредством мелиорации, вып. V, Гидротехн. сб., Л., 1938.
2. Г. Н. Каменский, Н. А. Корчебоков, К. И. Разин, Движение подземных вод в неоднородных пластах, ОНТИ, М.—Л., 1935.
3. П. Я. Полубаринова-Кочина, Теория движения грунтовых вод, ГИЗ технико-теоретической литературы, М., 1952.
4. Г. Н. Каменский, Основы динамики подземных вод, Госгеолыздат, М., 1943.
5. Д. П. Юневич, Мелиорация минеральных заболоченных земель, Сельхозгиз, 1948.

Эстонский научно-исследовательский институт земледелия и мелиорации

Поступила в редакцию
11 VI 1957

DREENIDE VAHEKAUGUSE ARVUTAMINE KANEKIHILISES PINNASES

V. Jonat,
tehniliste teaduste kandidaat
Resüme

Madala turbakihiga soode ja vett halvasti läbilaskvate mineraalpinnaste kuivendamisel on praktiliselt vaja arvutada dreenide vahekaugusi kahekihilises pinnases. Kuna prof. H. Pissarkovi vastav valem on puudulik, soovitatakse selleks kasutada uusi valemid (10) ja (11).

*Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse
Teadusliku Uurimise Instituut*

Saabus toimetusse
11. VI 1957

DIE BERECHNUNG DER ENTFERNUNG DER DRÄNENSTANGEN IN ZWEISCHICHTIGEN BÖDEN

V. Jonat
Zusammenfassung

Die Berechnung der Entfernung der Dränenstangen in ungleichmässigen Böden, wie bei Torfböden mit dünner Torfschicht und bei schweren Lehmböden, ist eine wichtige Frage. Die von Prof. H. Pissarkof gegebene Formel ist mangelhaft. Bei der Entwässerung zweischichtiger Böden werden zur Berechnung der Entfernung der Dränenstangen die Formeln (10) und (11) empfohlen.

*Etnisches wissenschaftliches Forschungsinstitut
für Ackerbau und Melioration*

Eingegangen
am 11. Juni 1957