

постепенно снижается при медленном консолидированном сдвиге в водонасыщенном состоянии.

Эти обстоятельства следует учитывать при выборе режимов резания и определении сил, действующих на рабочий орган землеройной машины.

Установлено, что вероятность разработки грунта второй-третьей категории трудности равна 0,785, а второй категории — 0,552.

В ы в о д ы

1. Наиболее распространенными грунтами по территории БССР являются пески и супеси.

2. В тяговых расчетах землеройных машин необходимо ориентироваться на грунты второй-третьей категории трудности разработки.

3. Полученные рекомендации могут быть использованы при выборе землеройных машин с учетом эксплуатации их в наиболее вероятных грунтовых условиях, а также будут служить исходными данными для расчета рабочих органов землеройных машин.

Л и т е р а т у р а

1. Геология СССР. Т. 3. Белорусская ССР. М., 1971.
2. Голубев И. А., Морозова Л. К., Карамышев А. С. Прочностные и деформативные свойства песчаных оснований Белоруссии. -- В сб.: Материалы первой Республиканской конференции по строительству на пойменных территориях Белорусского Полесья. Гомель, 1974.
3. Справочник конструктора дорожных машин. М., 1973.

Ш. И. Брусиловский, Г. А. Писецкий

РАСЧЕТЫ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ К КАНАЛАМ И ДРЕНАМ В ОДНООДНОМ ГРУНТЕ С УЧЕТОМ ОСУШИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОДОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ

Широкое распространение в мелиоративной практике получил систематический дренаж, работа которого в однородном грунте для простейших плановых схем довольно подробно изучена. Однако большая часть исследований касается лишь методов расчета дренажа для областей, представляющих в плане полосу (одномерные задачи). В практике же наряду с простейшими пла-

новыми схемами встречаются более сложные формы границ движения грунтовых вод.

При осушении систематической сетью каналов (дрен) осушаемый массив, ограниченный произвольным контуром, разрезается сетью каналов и дрен на элементарные участки, чаще всего имеющие форму прямоугольника. Выбор расположения каналов диктуется условиями рельефа местности, а расстояния между дренами (осушителями) назначаются, исходя из известных одномерных решений для полосы. При таком подходе к выбору расстояний между дренами осушительное действие каналов не учитывается, что является правомерным (ошибка в результатах расчета не превышает 5%) лишь при соотношении сторон прямоугольника более 5 [1].

В практике строительства мелиоративных систем довольно часто встречаются случаи, когда соотношение сторон прямоугольника (соотношение расстояний между проводящей сетью и регулирующей) меньше 5. Тогда пренебрежение учетом осушительного действия проводящих каналов приводит к значительным погрешностям в расчетах. Особенно это проявляется в условиях Полесья, когда мелкий торфяник подстилается хорошо водопроницаемыми песками.

На необходимость учета влияния водопроводящей сети указывается в работе [2], где дается также приближенное решение задачи по определению междренних расстояний с учетом осушительного действия проводящей сети для случая параллельного расположения каналов и дрен.

Более строгое решение аналогичной задачи для однородного грунта было получено авторами [3—4] как при параллельном, так и при перпендикулярном расположении проводящей и регулирующей сети. В первом случае в каналах принимались заданными снижения, а в дренах — заданными удельные расходы. Во втором случае как в каналах, так и в дренах (осушителях) считались известными горизонты воды. Полученные решения позволяют рассматривать не только расчет понижения уровня грунтовых вод, но и подъем его при подпочвенном увлажнении. Это особенно важно при проектировании осушительно-увлажнительных систем, когда необходимо определить параметры дренажа как по интенсивности снижения грунтовых вод, так и по условиям подъема их в засушливые периоды.

На практике наряду с заданием горизонтов воды в каналах и дренах часто необходим прогноз водного режима на мелиорируемых землях при задании горизонтов воды в каналах и расхо-

дов ее к дренам. Поэтому представляет интерес рассмотреть задачу при смешанных граничных условиях [3].

Если положить, что колебания грунтовых вод невелики по сравнению с их "мощностью", то для характеристики неустановившегося движения можно воспользоваться линеаризованным уравнением Буссинеска

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \bar{K}^2 \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + \beta, \quad (1)$$

где $\bar{K}^2 = \frac{KH_{\text{ср}}}{\delta}$; $\beta = \frac{\epsilon}{\delta}$; H -- напор, м; t -- время, сут; δ -- коэффициент водоотдачи при опускании грунтовых вод и свободная порозность при подъеме поверхности грунтовых вод; $H_{\text{ср}}$ -- средняя мощность потока грунтовых вод; K -- коэффициент фильтрации; ϵ -- интенсивность питания (испарения) уровня грунтовых вод.

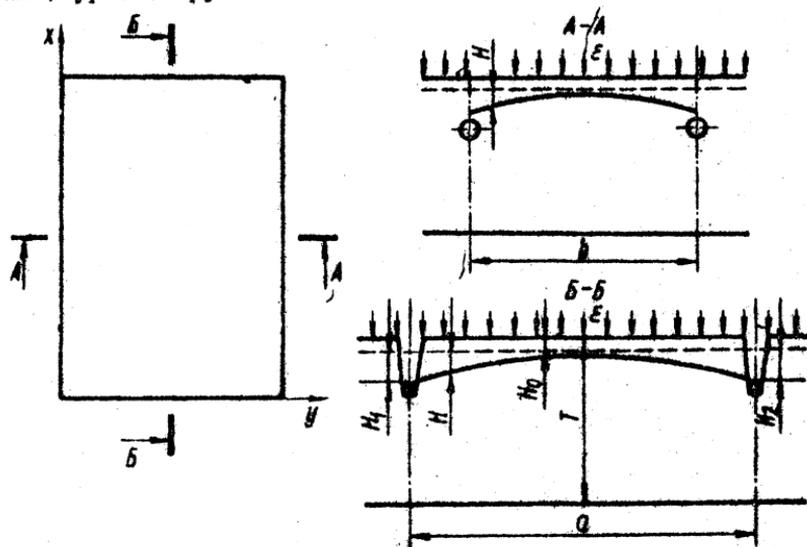


Рис. 1. Расчетная схема.

В соответствии с принятой схемой (рис.1) необходимо решить уравнение (1) при начальном

$$H(0, x, y) = H_0(x, y) \quad (2)$$

и граничных условиях:

$$\begin{aligned} H(t, 0, y) &= H_1(t, y), \quad H(t, a, y) = H_2(t, y), \\ \frac{\partial H(t, x, 0)}{\partial y} &= f_1(t, x), \quad \frac{\partial H(t, x, b)}{\partial y} = f_2(t, x), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$f_1(t, x) = \frac{q_1(t, x)}{KH_{\text{ср}}}, \quad f_2(t, x) = \frac{q_2(t, x)}{KH_{\text{ср}}}; \quad (4)$$

q_1, q_2 — заданные функции удельного расхода регулирующей сети.

Решение задач (1)—(3) найдем методом интегральных преобразований, сущность которого заключается в переходе к изображениям в уравнениях (1)—(3) сначала по временной координате t , а затем с помощью конечного интегрального преобразования [5] по пространственной координате y .

В результате получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$s \bar{H}(s, x, p) - K^2 \left[\frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x^2} + p^2 \bar{H} + \frac{\bar{f}_2 - \bar{f}_1 \operatorname{ch} pb}{\operatorname{sh} pb} \right] = \bar{H} + \frac{\beta}{s} \quad (5)$$

с соответствующими граничными условиями

$$\bar{H}(s, 0, p) = \bar{H}_1(s, p), \quad \bar{H}(s, a, p) = \bar{H}_2(s, p). \quad (6)$$

Решение уравнения (5) при условиях (6) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} H(s, p, x) &= \frac{H_1(s, p) \sin \frac{a-x}{K} \sqrt{Kp^2 - s} + H_2(s, p) \sin \frac{x}{K} \sqrt{Kp^2 - s}}{\sin \frac{b}{K} \sqrt{Kp^2 - s}} + \\ &+ \int_0^a R(s, x, p^2, \xi) F(s, p, \xi) d\xi, \end{aligned} \quad (7)$$

где R — функция Грина.

Формула (7) дает решение поставленной задачи в области изображений по переменным t и y . Переход к оригиналу относительно p осуществляется по формуле

$$H(s, x, y) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{py} \bar{H}(s, p, x) dp. \quad (8)$$

Этот интеграл легко вычисляется с помощью теоремы Коши о вычетах. Переходя затем от полученного выражения к оригиналу относительно s , получим искомое решение уравнения (1), которое при условиях (2), (3) имеет довольно громоздкий вид и поэтому здесь не приводится. Остановимся подробнее лишь на одном частном случае рассматриваемой задачи, когда функции, входящие в начальные и граничные условия, являются некоторыми постоянными, кроме того $H_1 = H_2$, $q_1 = q_2$, $H_0 = 0$.

При таких предпосылках решение уравнения (1) будет иметь довольно простой вид

$$H(\tau, \xi, \eta) = \frac{a^2 \xi}{K^2 \delta} A_1 + H_1 A_2 + \frac{q_1 a l}{K h_{cp}} (2A_1 + A_3), \quad (9)$$

где

$$A_1 = \frac{4}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin[\pi(2m+1)\xi]}{(2m+1)^3} (1 - e^{-\pi^2(2m+1)^2\tau}); \quad (10)$$

$$A_2 = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin[\pi(2m+1)\xi]}{(2m+1)} e^{-\pi^2(2m+1)^2\tau};$$

$$A_3 = \frac{16l}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi n \eta \sin[\pi(2m+1)\xi]}{(2m+1) [(2m+1)^2 + 4n^2 l^2]} \times$$

$$\times (1 - e^{-\pi^2 [(2m+1)^2 + 4n^2 l^2] \tau});$$

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{y}{b}, \quad l = \frac{a}{b}, \quad \tau = \frac{k^2 t}{a^2}. \quad (11)$$

Полученные формулы имеют вид, поддающийся табулированию с использованием ЭЦВМ. Для примера, приведенного на рис. 2, даны значения коэффициентов A_1 , A_2 , A_3 в зависимости от

τ и 1 для $\xi = \eta = 0,5$. По формулам (10), (11) можно производить необходимые расчеты по определению динамики грунтовых вод в любой точке внутри прямоугольника как для снижения уровня грунтовых вод (осушение), так и для подъема их (увлажнение).

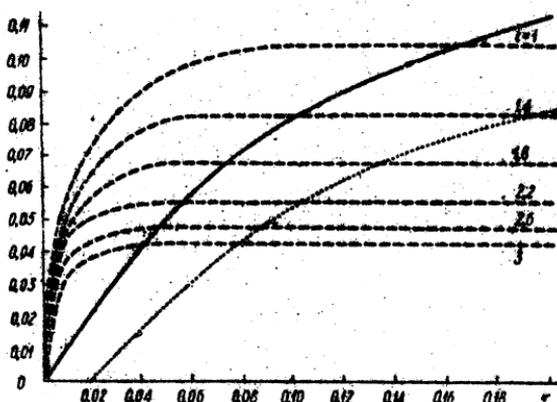


Рис. 2. График функций A_1 (сплошная линия), A_3 (штриховые), $1/10 A_2$ (пунктир.) (для любого τ значения функции A_3 следует умножить на -1).

Так как формула (9) была получена в предположении постоянного дренажного расхода, а в действительности расход дрен является функцией времени, то при расчетах следует пользоваться ступенчатым графиком, разбивая расчетный интервал времени $[0, t]$ на элементарные участки точками t_i и принимая на каждом таком участке $[t_i, t_{i+1}]$ расход постоянным, равным среднему на этом участке. Воспользоваться имеющимися теоретическими зависимостями применительно к нашей задаче нет возможности, так как все они предполагают задание постоянного понижения уровня воды в дренах или же постоянного притока к дренам.

Наиболее приемлемой для нашей схемы является формула по расчету удельного дренажного стока в условиях неустановившегося движения [6]

$$q = \frac{0,845 K b_2 d \beta}{A} \left(\frac{Kt}{A \delta b} \right)^{\beta-1} \exp \left[-\alpha \left(\frac{Kt}{A \delta b} \right)^\beta \right] \quad (12)$$

где b_2 -- начальная высота горизонтального уровня грунтовой воды над плоскостью укладки дрен в начальный момент времени; K -- коэффициент фильтрации; δ -- коэффициент водоотдачи; b -- расстояние между дренами; A, d, β -- параметры, значения которых определяются по специальным таблицам и графикам, приведенным в работе [6].

Чтобы воспользоваться формулой (12) для нашего случая, необходимо найти величину среднего расхода на каждой элементарной ступеньке длиной $t_{i+1} - t_i$. Очевидно, величину среднего расхода за промежуток времени $t_{i+1} - t_i$ можно найти по формуле

$$\bar{q} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} q(\tau) d\tau.$$

Вычислив интеграл, получим

$$\bar{q} = \frac{0,845 b_2 \delta b}{t_{i+1} - t_i} \left[e^{-\alpha \left(\frac{Kt_i}{A \delta b} \right)^\beta} - e^{-\alpha \left(\frac{Kt_{i+1}}{A \delta b} \right)^\beta} \right]. \quad (13)$$

На основе многочисленных расчетов было установлено, что удобнее всего разбивать расчетный интервал времени $[0, t]$ на два интервала $[0, t_{\text{крит}}]$ и $[t_{\text{крит}}, t]$, где $t_{\text{крит}}$ -- значение времени, при котором получается максимальное значение расхода (12). Значение $t_{\text{крит}}$ легко найти, если продифференцировать выражение (12) по t и приравнять нулю. В результате

$$t_{\text{крит}} = \frac{A \delta b}{K} \left[\frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}}. \quad (14)$$

По формуле (13) находим значение расхода для этих интервалов времени.

Если принять положение летнего минимума за начальное положение уровня грунтовых вод (т.е. отсчет вести от этого

минимума) и положить $q_1 = 0$, то подъем поверхности грунтовых вод будет равен

$$H(\xi, \tau) = \frac{a^2 \xi}{K^2 \delta} A_1, \quad (15)$$

где A_1 определяется по формуле (10).

После длительной инфильтрации поверхность грунтовых вод достигает установившегося положения ($t = \infty$) и максимальный подъем поверхности грунтовых вод в любой точке ξ будет равен

$$H(\xi) = \frac{a^2 \epsilon \xi}{2K^2 \delta} (1 - \xi), \quad (16)$$

а посредине между каналами

$$H = \frac{a^2 \epsilon}{8KT}, \quad (17)$$

что хорошо известно из формулы Кене.

Если положить $q_1 = 0$ и $\epsilon = 0$, то получим известную формулу С.Ф. Аверьянова

$$H(\xi, \tau) = H_1 A_2 \quad (18)$$

по определению динамики грунтовых вод между двумя каналами.

Общей характеристикой динамики грунтовых вод на осушаемом массиве является величина среднего снижения. Для ее нахождения проинтегрируем функцию $H(\tau, \xi, \eta)$, определяемую формулой (9), по ξ, η от 0 до 1. В результате получим

$$\bar{H}(\tau) = \frac{a^2 \epsilon}{K^2 \delta} \bar{A}_1 + H_1 \bar{A}_2 + \frac{2q_1 a l}{K h_{cp}} \bar{A}_1, \quad (19)$$

где

$$\bar{A}_1 = \frac{1}{12} - \frac{8}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2(2m+1)\tau}}{(2m+1)^4},$$

$$\bar{A}_2 = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2(2m+1)^2\tau}}{(2m+1)^2} \quad (20)$$

Все изложенное относится к расчетам фильтрации воды к совершенным каналам и дренам. Если каналы (дрены) несовершенны, то в расчетные зависимости следует ввести поправку на несовершенство. Это можно сделать путем уточнения безразмерного времени τ , умножив его на коэффициент "висячести" α , который определяется по формулам С.Ф. Аверьянова [7]. Более полно учесть несовершенство дренажа можно путем исправления линейных размеров потока на величину 2Φ , которая определяется по формуле [1]

$$\Phi = -0,6366 T \ln \sin \frac{\pi b_1}{2T} \quad (21)$$

где b_1 — глубина каналов (глубина заложения дрен).

Для дренажных труб, размеры которых значительно меньше мощности пласта, практически можно считать

$$\Phi_g = 0,73 \lg \frac{2T}{\pi d} \quad (22)$$

Тогда в зависимостях (9)—(11) и (19)—(20) вместо a и b следует ввести a^* и b^* , которые будут определяться по формулам

$$a^* = a + 2\Phi \quad b^* = b + 2\Phi_g \quad (23)$$

Пример расчета. Рассмотрим динамику уровня грунтовых вод на участке, имеющем в плане форму прямоугольника, который осушается горизонтальным систематическим дренажем с расстоянием между дренами $b = 200$ м и водопроводящими каналами глубиной $b_1 = 2,5$ м, расстояние между которыми $a = 500$ м. Дрены диаметром $d = 0,1$ м заложены на глубину $b_2 = 1,2$ м. Требуется определить снижение уровня грунтовых вод в центре массива за промежуток времени $t = 10$ сут при следующих исходных данных: $K = 2,5$ м/сут; $\delta = 0,05$; $H_1 = 1,5$ м; $T = 50$ м. В начальный момент времени поверхность грунтовых вод предполагается горизонтальной и расположенной у поверхности земли.

Расчет начинаем с определения средней величины дренажного расхода за промежуток времени $t = 10$ сут. Для этого по специальным графикам, приведенным в [8], находим, что для условий рассматриваемой задачи параметры α , β , A , входящие в формулу (13), будут равны $\alpha \approx 0,94$; $\beta \approx 1,16$; $A \approx 7,8$.

Расход находим по формуле (13)

$$\bar{q} = \frac{0,845 \cdot 1,2 \cdot 0,05 \cdot 200}{10} (1 - 0,78) \approx 0,223 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Далее определяем дополнительные сопротивления на несовершенство каналов и дрен.

Для каналов по формуле (21) получаем

$$\Phi_k = -0,6366 \cdot 50 \ln \sin \frac{3,14 \cdot 2,5}{2 \cdot 50} = 81 \text{ м.}$$

Для дрен по формуле (22) находим

$$\Phi_g = 0,73 \cdot 50 \cdot \lg \frac{2 \cdot 50}{3,14 \cdot 0,1} = 91 \text{ м.}$$

Линейные размеры по (23) будут равны

$$a^* = 500 + 2 \cdot 81 = 662 \text{ м, } b^* = 200 + 2 \cdot 91 = 382 \text{ м,}$$

$$t^* = \frac{662}{382} = 1,76, \quad \xi = \eta = 0,5.$$

Коэффициент преезопроводности $K^2 = \frac{2,5 \cdot 50}{0,05} = 2500 \text{ м}^2/\text{сут.}$

По формуле (11) будем иметь $\tau = \frac{2500 \cdot 10}{662 \cdot 662} \approx 0,057$.

Находим, что для $\tau = 0,057$ $A_1 = 0,056$, $A_2 = 0,28$, $A_3 = -0,068$ (рис. 2).

По формуле (9), положив $\epsilon = 0$, определим искомое снижение уровня грунтовых вод

$$H = 1,5 \cdot 0,28 + \frac{0,223 \cdot 662 \cdot 1,76}{2,5 \cdot 50} (2 \cdot 0,056 - 0,068) \approx 0,55 \text{ м.}$$

Л и т е р а т у р а

1. Васильев С. В. и др. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. М., 1970.
2. Ивицкий А. И. Теория расчета расстояний между дренами с учетом осушительного действия проводящей сети. — ДАН БССР, 1968, т. 12, № 11.
3. Брусиловский Ш. И., Писецкий Г. А. Определение динамики грунтовых вод на осушаемых землях при взаимно-перпендикулярном расположении водопроводящей и регулирующей сетей. — В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 3. Минск, 1973.
4. Брусиловский Ш. И., Писецкий Г. А. Определение динамики грунтовых вод между дренами с учетом осушительного действия водопроводящих каналов при параллельном расположении каналов и дрена. — В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 4. Минск, 1974.
5. Лыков А. В., Иванов А. В. Конечные интегральные преобразования и их применение к решению задач теплопроводности. — В сб.: Тепло- и массообмен в процессах испарения. М., 1958.
6. Radcenko J. Drenážny adtok pri neustálenom prúdeni podzemnej vody k drémom. — "Vodohosp. Casopis", 1973, ročník XXI, с. 3-4.
7. Аверьянов С. Ф. Расчет понижения и подъема грунтовых вод при осушении системой каналов (дрен). — "Гидротехника и мелиорация", 1957, № 12.

В. К. Свистунов

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ ПРИГРУЗКИ РАЗМЫВУ РУСЛОВЫМ ПОТОКОМ

Наиболее рациональным креплением каналов осушительно-увлажнительных систем, работающих в условиях переменного уровня, являются крепления из хорошо фильтрующих крупнозернистых материалов: щебня, гальки, гравия, крупнопористых бетонных плит и т. д. Особенностью креплений каналов двустороннего действия является то, что они должны обеспечивать своевременное поступление воды в почву из наполненного канала, а также предупреждать возможную деформацию откосов, вызываемую воздействием фильтрационного давления [1] при интенсивном опускании горизонта воды во время опорожнения канала. Кроме того, пригрузка откосов фильтрующим материалом должна противостоять размывающему действию поверхностного и руслового потоков, которые в условиях шлюзования формиру-