



УДК 626.862.1

Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой

В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б. Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 665–676. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-665-676

Аннотация

Цель: Расчетное обоснование конструкции бесполостного дренажа, обеспечивающей эффективное осушение слабоводопроницаемых грунтов. Ранее была разработана методика гидравлического расчета бесполостной дрена составного профиля, закладываемой с уклоном, но без включения в нее дренажной трубы. Дренажная труба усиливает водоотводящую способность бесполостной дрена с сохранением всех остальных ее преимуществ. **Методы:** Использовано известное дифференциальное уравнение фильтрации жидкости в грунте. Особенно важно, что метод расчета может быть использован при всех режимах движения воды в дренаже: ламинарном, переходном или турбулентном. Для переходного и турбулентного режима применены зависимости, обоснованные экспериментами, проводившимися Северным научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации. Сложная форма поперечного сечения дренажа учитывается с помощью специального коэффициента, который приводит ее к эквивалентному по площади прямоугольному сечению. Доказывается, что такой переход не приводит к значимой погрешности полученных результатов. **Результаты:** Получены зависимости, позволяющие рассчитать расходы, протекающие по бесполостной части дрена и по дренажной трубе. Если дрена имеет большую протяженность, то от нее целесообразно периодически отводить воду в поперечном направлении коллекторами. Выведены зависимости, по которым определяется расстояние между промежуточными коллекторами, куда вода поступает от дрена, закладываемых с уклоном и глубину воды в бесполостной части дрена в характерных сечениях. **Практическая значимость:** Бесполостной дренаж применяется в сельском хозяйстве, в системах инженерной защиты от подтопления и загрязнения окружающей среды. Бесполостные дрена составного профиля привлекли внимание железнодорожников: обеспечивая эффективное осушение земляного полотна, они одновременно увеличивают его несущую способность. Особенно эффективно его применение в слабоводопроницаемых грунтах при заложении в зону сезонного промерзания грунтов.

Ключевые слова: Бесполостная дрена, гидравлический расчет, дренаж, земляное полотно, составное сечение.

Введение

Бесполостные дрены могут иметь круглое, прямоугольное, трапецидальное и треугольное поперечные сечения. Поперечное сечение может быть также составным, например, включающим в себя такие фигуры, как прямоугольник и трапецию. Поскольку в расчетах сечение дрены в формулах характеризуется как одно целое, то подчеркнуть отличие такой дрены можно, используя название: бесполостная дрена составного профиля. Бесполостной дренаж уже применяется в сельском хозяйстве — в системах инженерной защиты от подтопления и загрязнения окружающей среды. В условиях эксплуатации железных дорог бесполостной дренаж может способствовать решению целого ряда проблем. Во-первых, на современном этапе увеличивается нагрузка от подвижного состава, что приводит к увеличению динамических напряжений в грунтах земляного полотна [1–4] и росту вибрации при прохождении грузовых составов [5]. При этом ранее было доказано, что бесполостной дренаж увеличивает несущую способность земляного полотна [6]. Наиболее технологичным является составной профиль, так как он может закладываться в один проход роторным экскаватором с уширителем (рис. 1).

На рис. 1 цифрой 1 показана водоотводящая труба.

В последние годы для увеличения несущей способности земляного полотна получили широкое

применение геоматериалы (геотекстили, георешетки и геоячейки). При этом несущая способность земляного полотна увеличивается на 20–40 %.

Однако в случае слабоводопроницаемых грунтов в зависимости от интенсивности и продолжительности выпадающих осадков с помощью стандартных осушительных систем зачастую не представляется возможным поддерживать влажность в земляном полотне в оптимальных пределах. Переувлажнение же грунтов снижает их несущую способность. Для повышения эффективности осушения было предложено применить бесполостной дренаж, располагая дрены в земляном полотне непосредственно под рельсошпальной решеткой. Оказалось, что при этом мы одновременно увеличиваем несущую способность грунта в 1,7–1,8 раза по сравнению с вариантом усиления земляного полотна с применением георешеток.

Наблюдаются деформации на участках железных дорог в северной зоне, в том числе связанные с избыточным увлажнением [7–10]. В районах сурового климата важно, чтобы в период оттаивания дренаж вступал в действие как можно раньше и сохранял работоспособность как можно дольше в течение года. Для бесполостного дренажа характерна высокая свободная пористость, которая обеспечивает его длительное незамерзание. Также существует проблема истирания балласта, частицы которого загрязняют слой, прилегающий

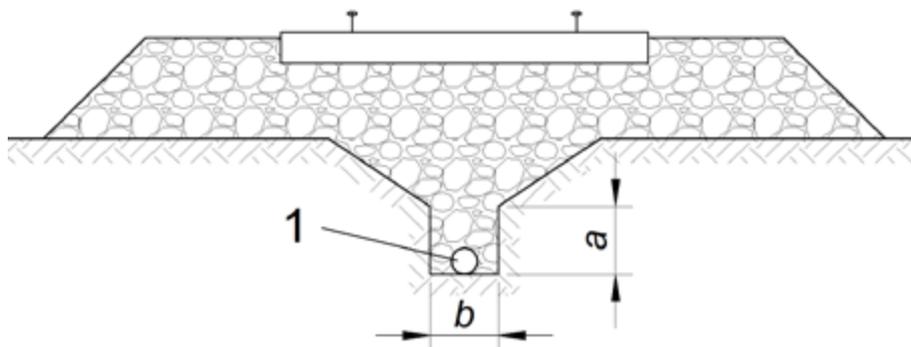


Рис. 1. Бесполостная дрена составного профиля, усиленная трубой

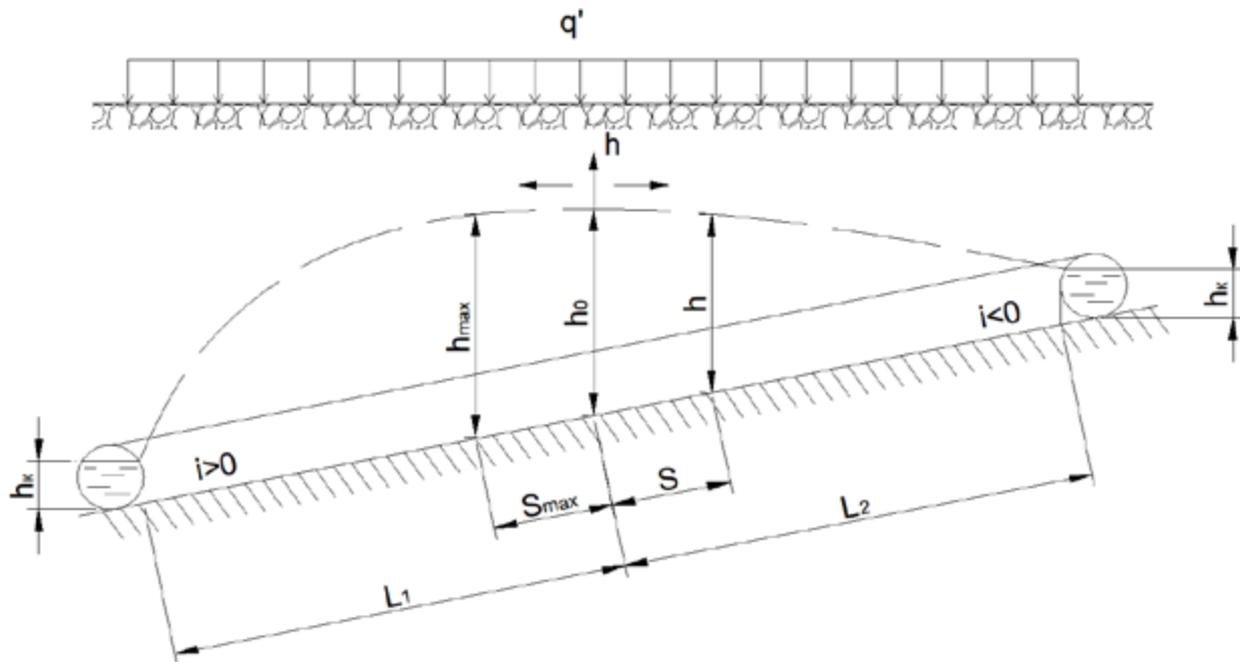


Рис. 2. Расчетная схема бесполостной дрены, усиленной трубой с двухсторонним впадением в коллекторы

к земляному полотну, и создают дополнительную опасность возникновения выплесков [11, 12]. Бесполостной дренаж отводит и аккумулирует в себе частицы истирания балласта. В мире предлагается использовать различные материалы для заполнения бесполостных дрен, вплоть до резиновой крошки, получаемой при переработке автомобильных шин [13]. Однако мы рекомендуем использовать щебень из горных пород, так как он имеет высокие прочностные свойства и не вредит экологии. В районах с глубоким сезонным промерзанием и избыточным увлажнением для увеличения несущей способности земляного полотна поперечному сечению бесполостной дрены предлагается придать треугольную форму. Гидравлический расчет бесполостной дрены треугольного поперечного сечения при переходном режиме был рассмотрен нами ранее [14]. Бесполостной дренаж обладает большей, по сравнению с трубчатым, водозахватной способностью при осушении слабОВОДПРОНИЦАЕМЫХ грунтов, но существенно уступает трубчатому по водоотводящей способности. Также ранее авторами статьи были рас-

смотрены случаи использования трапециевидальной бесполостной дрены [15] и дрены составного сечения без введения в нее трубы [16].

Для уменьшения роли недостатков при сохранении преимуществ в случае бесполостных дрен было предложено усилить их водоотводящую способность путем введения в заполнитель бесполостных дрен дренажной трубы.

Для эффективного осушения и усиления земляного полотна большой интерес представляет составной профиль, причем такой вариант, когда имеет место двустороннее впадение в коллекторы, посредством которых вода через определенное расстояние отводится из бесполостных дрен (рис. 2).

При тех крупностях материала заполнителя, который используется при строительстве и реконструкции железных дорог, движение воды на преобладающей части длины бесполостной дрены происходит не при ламинарном режиме, а при переходном. В фильтрационных потоках переходный режим имеет довольно большой диапазон изменения числа Рейнольдса.

Метод исследования

Примем, что в бесполостной части дрены (за исключением начального участка) имеет место переходный режим движения воды, а в трубчатой — турбулентный, включающий в себя все три области гидравлического сопротивления. При этом имеет место двустороннее впадение в коллекторы. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Запишем уравнение движения в дифференциальной форме для произвольного сечения 1–1 бесполостной части дрены, напор (глубина) в котором равна h :

$$\begin{aligned} \frac{dh}{ds} &= \pm i - \left(\frac{q_1 \cdot s}{K_l \cdot \omega} + \frac{q_1^2 \cdot s^2}{K_l^2 \cdot \omega^2} \right) = \\ &= \pm i - \left\{ \frac{q_1 \cdot s}{K_l \cdot b \left[h + \frac{m}{b} (h-a)^2 - \frac{\pi d^2}{4b} \right]} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{q_1^2 \cdot s^2}{K_l^2 \cdot b^2 \left[h + \frac{m}{b} (h-a)^2 - \frac{\pi d^2}{4b} \right]^2} \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где q_1 — удельная приточность к бесполостной части дрены;

s — расстояние от истока дрены до рассматриваемого живого сечения;

ω — площадь живого сечения бесполостной части дрены в рассматриваемом сечении;

b — ширина бесполостной дрены по основанию;

a — высота прямоугольной части составного профиля дрены;

m — коэффициент откоса;

K_p, K_l — коэффициенты фильтрации заполнителя бесполостной дрены при ламинарном и турбулентном режимах соответственно;

i — уклон дна дрены (знак «+» — для левой части дрены, а «-» — для правой).

Уравнение (1) в таком виде не сводится ни к одному обыкновенному дифференциальному уравнению. Ранее аналогичная проблема имела место, когда мы рассматривали гидравлический расчет бесполостных дрен трапецеидального поперечного сечения [15], не включающих в себя дренажную трубу. Дренажная труба при диаметре 0,05 м занимает менее 1 % от общей площади поперечного сечения бесполостной, и неучитывание этой части площади бесполостной дрены, занимаемой трубой, практически не сказывается на ее водоотводящей способности.

Как и ранее [14–16], воспользуемся заменой составного профиля на эквивалентное по площади живого сечения прямоугольное при одинаковой их высоте (глубине воды в них) h . Учитывая сказанное выше о влиянии неучета части площади живого сечения бесполостной дрены, занимаемой дренажной трубой, на ее водоотводящую способность, эквивалентная ширина прямоугольного поперечного сечения будет определяться зависимостью:

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta (h_0 - a)^2}{h_0}. \quad (2)$$

Здесь h_0 — глубина воды в бесполостной части дрены в начале координатных осей h и s . Так как глубина фильтрационного потока, а следовательно, и величина b_e изменяются, то это обстоятельство учитывается коэффициентом β [14–16]. Зависимость для определения величины β для составного профиля была получена ранее в работе [16].

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)}. \quad (3)$$

Введем обозначения: $\frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = U_l$; $\frac{q_1^2}{K_l^2 \cdot b_e^2} = U_l^2$;
 $\omega = b_e \cdot h$.

С учетом обозначений уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{U_l \cdot s}{h} - \frac{U_t \cdot s^2}{h^2}. \quad (4)$$

Было рассмотрено решение аналогичного уравнения для бесполостной дрены прямоугольного поперечного сечения, усиленного дренажной трубой, но при одностороннем впадении в коллекторы. При этом для уклона дна $i > 0$ было получено следующее решение для определения h_0 .

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \times \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (5)$$

$$\text{где } t_k = \frac{h_k}{L_1}, \quad F_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l}, \quad (6)$$

$$M = (1 - F_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3F_1) \frac{U_t}{K_1^2}, \quad (7)$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2, \quad (8)$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3} \right), \quad (9)$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3} \right)^2}; \quad P = -\left(\frac{i}{3} \right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}. \quad (10)$$

При расчете правой части дрены с обратным уклоном дна ($i < 0$) в формулах, содержащих уклон дна, знак перед i меняется на противоположный и вместо L_1 подставляется L_2 .

Расчет дренажной трубы, заложеной внутри бесполостной дрены с уклоном при одностороннем впадении в коллекторы, был рассмотрен ранее в [15]. При этом было принято, что напорная линия для бесполостной части дрены и линия

для перфорированной трубчатой практически совпадают, так как скорости перетекания из бесполостной части дрены в трубчатую составляют менее 0,1 м/с и местными потерями напора на отверстиях можно пренебречь.

С учетом сказанного дифференциальное уравнение неравномерного движения воды в дренажной трубе с двусторонним впадением в коллекторы, выраженное через глубину воды фильтрационного потока в бесполостной части дрены, будет иметь вид:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot s^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g}, \quad (11)$$

где λ_{mid} — средняя величина коэффициента гидравлического трения в дренажной трубе; q_2 — удельная приточность к дренажной трубе; d — диаметр дренажной трубы.

В результате его решения получаем:

а) для левой части трубчатой дрены:

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_1^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} - i \cdot L_1; \quad (12)$$

б) для правой части трубчатой дрены:

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_2^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} + i \cdot L_2. \quad (13)$$

Результаты исследований

Ход расчета рассмотрим на примере.

Дано: материал заполнителя бесполостной дрены — щебень фракции 5–20 мм: $d_{17} = 1,2$ см; коэффициент неоднородности $\eta = 1,9$; пористость $n = 0,48$; коэффициент формы частиц $\psi = 1,68$; коэффициент Шези $C_0 = 78 \text{ см}^{0,5}/\text{с}$; кинематический коэффициент вязкости $\nu = 0,0131 \text{ см}^2/\text{с}$; коэффициент откоса $m = 1,5$; $b = 0,4$ м; $a = 0,4$ м; $L_1 = 60$ м; $h_k = d = 0,005$ м; удельный приток $q = 9 \text{ м}^2/\text{сут}$; диаметр трубы $d = 0,05$ м; $\lambda_{mid} = 0,04$; $i = 0,003$.

Определить h_{\max} , L_2 , h_0 , q_1 , q_2 .

1. Определяем величину расчетного диаметра фильтрационного хода d_u [16]:

$$d_u = 0,57\sqrt[6]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi} =$$

$$= 0,57\sqrt[6]{1,9} \frac{0,48}{1-0,48} \cdot \frac{1,2}{1,68} = 0,42 \text{ см.}$$

2. Вычисляем коэффициенты фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах [16].

При ламинарном режиме:

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8\pi^2 \cdot v} = \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0042^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 0,803 \text{ м/с.}$$

При турбулентном режиме:

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2d_u} = \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,42} =$$

$$= 6,16 \text{ см/с или } 0,0616 \text{ м/с.}$$

3. Задаемся в первом приближении некоторым значением h_0 , например, равным 0,94 м. При данном значении h_0 по формуле (12) вычисляем q_2 :

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g (h_0 - h_k + i \cdot L_1)}{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot L_1^3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81 (0,94 - 0,05 + 0,003 \cdot 60)}{8 \cdot 0,04 \cdot 60^3}} =$$

$$= 0,374 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

4. Соответственно:

$$q_1 = q - q_2 = 1,04 \cdot 10^{-4} - 0,374 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 0,666 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

5. Вычисляем параметры: U_p , U_r , β , b_e , K_1 , Φ_1 , M , N_1 и t_k .

$$t_k = \frac{0,05}{60} = 0,000833;$$

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)} = \frac{2 \cdot 0,94}{3(0,94 + 0,4)} = 0,47;$$

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta \cdot (h_0 - a)^2}{h_0} =$$

$$= 0,4 + \frac{1,5 \cdot 0,47 \cdot (0,94 - 0,4)^2}{0,94} = 0,62 \text{ м;}$$

$$U_l = \frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,666 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,62} = 1,34 \cdot 10^{-4};$$

$$U_t = \frac{q_1^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = \frac{(0,666 \cdot 10^{-4})^2}{0,0616^2 \cdot 0,62^2} = 3,04 \cdot 10^{-6};$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{1,34 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} =$$

$$= 0,658 \cdot 10^{-2};$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_l}{2} = -\left(\frac{0,003}{3}\right)^3 +$$

$$+ \frac{0,003 \cdot 1,34 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{3,04 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,586 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3} \right) = \frac{0,003}{3} -$$

$$- 2 \cdot 0,658 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{1,586 \cdot 10^{-6}}{(0,658 \cdot 10^{-2})^3} \right) =$$

$$= -1,079 \cdot 10^{-2};$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l} =$$

$$= \frac{(-1,079 \cdot 10^{-2})^2}{3(-1,079 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 1,079 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 1,34 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 0,21;$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1} =$$

$$= (1 - 0,21) \frac{1,34 \cdot 10^{-4}}{-1,079 \cdot 10^{-2}} + (1 - 3 \cdot 0,21) \times$$

$$\times \frac{3,04 \cdot 10^{-6}}{(-1,079 \cdot 10^{-2})^2} = -0,015 \cdot 10^{-2};$$

$$N_1 = 4 \cdot (K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2 = 4 \cdot [(-1,079 \cdot 10^{-2})^2 + 1,34 \cdot 10^{-4}] - (-1,079 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 9,41 \cdot 10^{-4};$$

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] =$$

$$= 60 \sqrt{\frac{[0,833^3 \cdot 10^{-9} - 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,833^2 \cdot 10^{-6} + 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 0,833 \cdot 10^{-3} + 3,04 \cdot 10^{-6}]^{0,79}}{(0,833 \cdot 10^{-3} + 1,079 \cdot 10^{-2})^{0,37}}} \times$$

$$\times \exp \left[\frac{0,015 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 0,833 \cdot 10^{-3} - 1,079 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 0,93$$

Принимаем $h_0 = 0,94$ м.

Однако, как это следует из проведенных ранее исследований, максимальная глубина воды в бесполостной части дрены h_{\max} (рис. 2) и, соответственно, напор в дренажной трубе будут в сечении, расположенном на расстоянии s_{\max} от начала оси s (точки водораздела). Величина s_{\max} может быть вычислена по формуле:

$$s_{\max} = h_0 \sqrt{\frac{(t_{\max} - K_1)^{(1-3F_1)}}{(t_{\max}^3 - i \cdot t_{\max}^2 + U_l \cdot t_{\max} + U_t)^{(1-F_1)}}} \cdot \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_{\max} + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] =$$

$$= 0,94 \sqrt{\frac{(0,061 - 1,079 \cdot 10^{-2})^{0,37}}{(0,061^3 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,061^2 + 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 0,061 + 3,04 \cdot 10^{-6})^{0,79}}} \times$$

$$\times \exp \left[\frac{0,015 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 0,061 - 1,079 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 15,7$$

$$t_{\max} = \frac{h_{\max}}{s_{\max}}, \text{ откуда } h_{\max} = t_{\max} \cdot s_{\max} = 0,061 \cdot 15,7 = 0,96 \text{ м.}$$

Для расчета правой части дрены перепишем уравнения (3–9) и (13), имея в виду, что правая часть дрены по отношению потока имеет обратный уклон.

$$h_0 = L_2 \sqrt{\frac{(t_k^3 + i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 + i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (14)$$

$$\text{где } t_k = \frac{h_k}{L_2}, \quad F_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l}, \quad (15)$$

$$M = (1 - F_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3F_1) \frac{U_t}{K_1^2}, \quad (16)$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2, \quad (17)$$

$$K_1 = -\frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3} \right), \quad (18)$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(-\frac{i}{3} \right)^2};$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3} \right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_l}{2}. \quad (19)$$

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_2^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} + i \cdot L_2. \quad (20)$$

Исходные данные для расчета:

$q = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_{mid} = 0,04$; $h_0 = 0,94 \text{ м}$; величины q_1 и q_2 изменятся и подлежат определению; $i = -0,003$ (обратный уклон по отношению к направлению движения потока); $h_k = 0,05 \text{ м}$. Характеристики заполнителя бесполостной части дрены, включая величины коэффициентов фильтрации K_l и K_p , остаются неизменными. Остаются постоянными также величины коэффициента $\beta = 0,47$ и эквивалентной ширины прямоугольного поперечного сечения $b_e = 0,62 \text{ м}$. Определению подлежат величины q_1 , q_2 и L_2 . Расчет начинаем с того, что задаемся некоторым значением L_2 и, принимая за h_0 величину $0,94 \text{ м}$, вычисленную при расчете левой части дрены, определяем соответствующее значение q_2 . Далее, по зависимости (14) снова вычисляем h_0 , используя исходные данные для правой части дрены. Сравниваем между собой величину h_0 , полученную при расчете левой части дрены и по формуле (14). Если они будут одинаковы, то определяемые последовательно по ходу расчета величины q_1 , q_2 и L_2 и будут искомыми.

Проиллюстрируем ход расчета на примере.

Принимаем $L_2 = 50 \text{ м}$.

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g (h_0 - h_k + i \cdot L_2)}{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot L_1^3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81 (0,94 - 0,05 - 0,003 \cdot 50)}{8 \cdot 0,04 \cdot 50^3}} =$$

$$= 0,409 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

4. Соответственно:

$$q_1 = q - q_2 = 1,04 \cdot 10^{-4} - 0,409 \cdot 10^{-4} =$$

$$0,631 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

5. Вычисляем параметры: U_l , U_p , β , b_e , K_l , Φ_1 , M , N_1 и t_k .

$$t_k = \frac{0,05}{50} = 0,001;$$

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)} = \frac{2 \cdot 0,94}{3(0,94 + 0,4)} = 0,47;$$

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta \cdot (h_0 - a)^2}{h_0} =$$

$$= 0,4 + \frac{1,5 \cdot 0,47 \cdot (0,94 - 0,4)^2}{0,94} = 0,62 \text{ м};$$

$$U_l = \frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,631 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,62} = 1,267 \cdot 10^{-4};$$

$$U_t = \frac{q_2^2}{K_t \cdot b_e^2} = \frac{(0,631 \cdot 10^{-4})^2}{0,0616^2 \cdot 0,62^2} = 2,73 \cdot 10^{-6};$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(-\frac{i}{3} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,267 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(-\frac{0,003}{3} \right)^2} = 0,64 \cdot 10^{-2};$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3}\right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_l}{2} = -\left(-\frac{0,003}{3}\right)^3 - \frac{0,003 \cdot 1,267 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,303 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = -\frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3}\right) = -\frac{0,003}{3} - 2 \cdot 0,64 \cdot 10^{-2} \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{1,303 \cdot 10^{-6}}{(0,64 \cdot 10^{-2})^3}\right) = -0,985 \cdot 10^{-2};$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l} = \frac{(-0,985 \cdot 10^{-2})^2}{3(-0,985 \cdot 10^{-2})^2 - 2 \cdot 0,985 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 1,267 \cdot 10^{-4}} = 0,27;$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_l}{K_1^2} = (1 - 0,27) \frac{1,267 \cdot 10^{-4}}{-0,985 \cdot 10^{-2}} + (1 - 3 \cdot 0,27) \cdot \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{(-0,985 \cdot 10^{-2})^2} = -0,404 \cdot 10^{-2};$$

$$N_1 = 4 \cdot (K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2 = 4 \cdot [(-0,985 \cdot 10^{-2})^2 + 1,267 \cdot 10^{-4}] - (-0,985 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 8,298 \cdot 10^{-4};$$

$$h_0 = L_2 \sqrt{\frac{(t_k^3 + i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp\left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1 + i}{\sqrt{N_1}}\right)\right] =$$

$$= 50 \sqrt{\frac{[1 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6} + 1,267 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 2,73 \cdot 10^{-6}]^{0,73}}{(1 \cdot 10^{-3} + 0,985 \cdot 10^{-2})^{0,19}}} \times$$

$$\times \exp\left[\frac{0,404 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{8,298 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 0,985 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{8,298 \cdot 10^{-4}}}\right)\right] = 0,94 \text{ м.}$$

Представляет интерес ответ на вопрос, а насколько ниже будет уровень грунтовых вод в земляном полотне при введении в бесполостную дренажную трубу диаметром 0,05 м. Для этого с использованием изложенных выше исходных данных нам надо вычислить величину h_{\max} для случая, когда весь расход отводится бесполостной частью дрены при $q_1 = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Расчеты показывают, что благодаря введению в бесполостную дренажную трубу уровень грунтовых вод в земляном полотне будет дополнительно понижен на 27 см либо на такую же величину может быть уменьшена высота бесполостной дрены, что даст возможность снизить расход материалов заполнителя бесполостной дрены при обеспечении нормы осушения.

Выводы

1. Бесполостная дренажная труба, усиленная дренажной трубой, увеличивает свою водоотводящую способность, сохраняя все свои преимущества (не боится пучения и просадок, обладает высокой водозахватной и самоочищающей способностями, долговечна).

2. Движение воды как в пределах бесполостной части дрены, так и в дренажной трубе является плавно изменяющимся, а живые сечения принимаются плоскими. Потери напора на отверстиях в трубе ввиду малости скоростей перетекания (менее 0,1 м/с) незначительны, поэтому во всех точках любого одного и того же живого сечения как в бесполостной части дрены, так и в дренажной трубе величина напора одинакова.

3. Для обеспечения решения уравнения, описывающего движение воды в бесполостной части дрены, составной профиль дрены заменяется прямоугольным. При этом площади их живых сечений эквивалентны.

4. Получены зависимости, позволяющие рассчитать расходы, протекающие по бесполостной части дрены и по дренажной трубе, расстояние между коллекторами при двустороннем впадении в них дрен, закладываемых с уклоном и глубину воды в бесполостной части дрены в характерных сечениях (h_0 и h_{\max}).

Библиографический список

1. Kolos A. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure / A. Kolos, A. Petriaev, I. Kolos et al. // AIP Conference Proceedings. — 2021. — DOI: 10.1063/5.0063962.
2. Kolos A. Railway subgrade stressed state under the impact of new-generation cars with 270 kN axle load / A. Kolos, A. Romanov, V. Govorov et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — I. 49. — Pp. 343–351. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_35.
3. Kolos A. Bearing capacity of high embankment clay soils in terms of heavy axle load operation / A. Kolos, A. Romanov, E. Shekhtman et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — I. 49. — Pp. 403–412. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_42.
4. Lazorenko G. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review / G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, Z. Khakiev et al. // Construction and Building Materials. — 2019. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184.
5. Kolos A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load / A. Kolos, A. Petriaev, A. Konon // AIP Conference Proceedings. — 2021. — DOI: 10.1063/5.0063961.
6. Blazhko L. S. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils / L. S. Blazhko, V. I. Shtykov, E. V. Chernyaev // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 710–715.
7. Bogomolova N. The study of railway embankment deformations in cold regions / N. Bogomolova, M. Bryn, A. Nikitchin et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — Iss. 50 — Pp. 223–229. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24.
8. Yang G. S. Study of thawing and consolidation law of ice-rich embankment / G. S. Yang, B. Bai, X. L. Yao // Yantu Lixue. Rock Soil Mech. — 2020. — Iss. 41.
9. Bogomolova N. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — Iss. 50. — Pp. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
10. Yang G. L. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence / G. L. Yang, X. J. Huang // Chinese J. Geotech. Eng. — 2005. — Iss. 27.
11. Nguyen T. T. Mud pumping under railtracks: Mechanisms, assessments and solutions / T. T. Nguyen, B. Indraratna, R. Kelly et al. // Australian Geomechanics Journal. — 2019. — Iss. 54(4).
12. Leus O. Strength properties of ballast layer, created from new and recycled crushed stone ballast / O. Leus, I. Menendez Pidal, A. Kolos et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Iss. 942(1). — DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012026.
13. Kaushik M. K. Drainage Performance of Different Sizes Tire Chips used Alone and Mixed with Natural Aggregates as Leachate Drainage Layer Material / M. K. Kaushik, A. Kumar, A. Bansal // Geotech. Geol. Eng. — 2016. — DOI: 10.1007/s10706-015-9937-x.
14. Shtykov V. I. Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime / V. I. Shty-

kov, A. B. Ponomarev // *Proceedings of Petersburg Transport University*. — Saint-Petersburg, 2019. — Vol. 16. — iss. 3. — Pp. 523–532. — DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532.

15. Shtykov V. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage / V. Shtykov, A. Ponomarev, J. Yanko // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Iss. 54. — Pp. 768–774. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.129.

16. Shtykov V. I. Hydraulic calculation of non-cavity complex cross-section drains / V. I. Shtykov, Yu. G. Yanko //

Bulletin of scientific research results. — 2021. — Iss. 1. — Pp. 33–49. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-33-49.

Дата поступления: 05.10.2022

Решение о публикации: 19.11.2022

Контактная информация:

Штыков Валерий Иванович — чл.-корр. РАН,
д-р техн. наук, проф.; shtykov41@mail.ru

Пономарев Андрей Борисович — канд. техн. наук,
доц.; pol1nom@yandex.ru

Cavityless Drain of Composite Profile Reinforced with Drainage Pipe

V. I. Shtykov, A. B. Ponomaryev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shtykov V. I., Ponomaryev A. B. Cavityless Drain of Composite Profile Reinforced with Drainage Pipe // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 676. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4--676

Summary

Purpose: Calculated substantiation of cavityless drain structure that provides for effective draining of poorly permeable soils. Hydraulic calculation methodology of composite profile cavityless drain, laid with a slope but without inclusion thitherwards of a drainage pipe, was developed earlier. Drainage pipe reinforces drainage capability of cavityless drain with the preservation of all its other advantages. **Methods:** Known differential equation of liquid filtration in a soil is used. It's of special importance that the calculation method may be used at all modes of water movement in a drainage: laminar, transient or turbulent. The dependencies substantiated with experiments, held by Northern Scientific-Research Institute of Hydrotechnique and Melioration, were applied for transient and turbulent modes. The complex form of drainage transection is taken into account with the help of special coefficient which leads it to equivalent by area rectangular section. It's proved that such transfer doesn't lead to significant inaccuracy of results obtained. **Results:** Dependencies have been obtained allowing to calculate consumptions, flowing along drain cavityless part and along drain pipe. If drain is long, it's feasible to divert a water periodically from it in lateral direction by collectors. Dependencies are derived which according to, the distance between intermediary collectors, whereto a water comes from drains that're laid with a slope, and the water depth in drain cavityless part in characteristic sections are defined. **Practical significance:** Cavityless drainage is applied in agriculture, in the systems of engineering protection from environmental sinking and pollution. Cavityless drains of composite profile have attracted railwaymen's attention providing effective draining of subgrade, they simultaneously increase its bearing capacity. Its application is especially effective on poorly permeable soils when laying in the zone of seasonable freezing of soils.

Keywords: Cavityless drain, hydraulic calculation, drainage, subgrade, composite section.

References

1. Kolos A., Petriaev A., Kolos I. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure. AIP Conference Proceedings. 2021. DOI: 10.1063/5.0063962.
2. Kolos A., Romanov A., Govorov V. Railway subgrade stressed state under the impact of new-generation cars with 270 kN axle load. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 49, pp. 343–351. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_35.
3. Kolos A., Romanov A., Shekhtman E. Bearing capacity of high embankment clay soils in terms of heavy axle load operation. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 49, pp. 403–412. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_42.
4. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Khakiev Z. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review. Construction and Building Materials. 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184.
5. Kolos A., Petriaev A., Konon A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load. AIP Conference Proceedings. 2021. DOI: 10.1063/5.0063961.
6. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Chernyaev E. V. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils. Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 710–715.
7. Bogomolova N., Bryn M., Nikitchin A. The study of railway embankment deformations in cold regions. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 50, pp. 223–229. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24.
8. Yang G. S., Bai B., Yao X. L. Study of thawing and consolidation law of ice-rich embankment. Yantu Lixue. Rock Soil Mech. 2020. Iss. 41.
9. Bogomolova N., Milyushkan Y., Shkurnikov S. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way”. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 50, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
10. Yang G. L., Huang, X. J. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence. Chinese J. Geotech. Eng. 2005, Iss. 27.
11. Nguyen T. T., Indraratna B., Kelly R. Mud pumping under railtracks: Mechanisms, assessments and solutions. Australian Geomechanics Journal. 2019, Iss. 54(4).
12. Leus O., Menendez Pidal I., Kolos A. Strength properties of ballast layer, created from new and recycled crushed stone ballast. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, Iss. 942(1). DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012026.
13. Kaushik M. K., Kumar A., Bansal A. Drainage Performance of Different Sizes Tire Chips used Alone and Mixed with Natural Aggregates as Leachate Drainage Layer Material. Geotech. Geol. Eng. 2016. doi: 10.1007/s10706-015-9937-x.
14. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime. Proceedings of Petersburg Transport University. Saint-Petersburg, 2019, vol. 16., I. 3, pp. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532.
15. Shtykov V., Ponomarev A., Yanko J. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage. Transportation Research Procedia. 2021, I. 54, pp. 768–774. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.129.
16. Shtykov V. I., Yanko Yu. G. Hydraulic calculation of non-cavity complex cross-section drains. Bulletin of scientific research results. 2021, Iss. 1, pp. 33–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-33-49.

Received: October 05, 2022

Accepted: November 19, 2022

Author's information:

Valeriy I. SHTYKOV — Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrey B. PONOMARYEV — PhD in Engineering, Associate Professor; pollnom@yandex.ru