

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ БЕСПОЛОСТНОЙ ДРЕНЫ, УСИЛЕННОЙ ДРЕНАЖНОЙ ТРУБОЙ, ПРИ НУЛЕВОМ УКЛОНЕ ДНА

В.И. Штыков<sup>1</sup>, Е.В. Булганин<sup>2</sup>, Б.А. Арын<sup>3</sup>

При проектировании дренажных систем для сооружений с большой площадью фундамента (здания энергоблоков АЭС, подземные резервуары в нефтяной и газовой промышленности, подземная часть гидротехнических сооружений и т.д.) возникает необходимость использования бесполостных дрен как альтернатива или дополнение к пластовому дренажу [1,2]. Бесполостные дренажи представляют собой траншеи, заполненные хорошо проницаемым материалом (щебень, крупнопористый бетон), устраиваемые в основании фундамента для приема и организованного отвода грунтовых вод. Общие принципы гидравлического расчета бесполостного дренажа, подбор геометрических параметров и материала заполнителя из условия обеспечения пропускной способности сечения изложены в работах [3 –7].

Для увеличения пропускной способности бесполостной дрены предлагается закладывать в ее конструкцию дополнительный транспортирующий элемент – перфорированную дренажную трубу. Применение такой конструкции в водоустройстве может быть особенно эффективно:

на безуклонных площадках при невозможности заглубления в основание;

при дефиците крупнозернистого фильтрующего материала, используемого в качестве засыпки;

при возможных резких увеличениях приточности к дрене с целью повышения надежности работы дренажной системы.

В статье изложены основные принципы гидравлического расчета дрен такого типа, получены итоговые зависимости их пропускной способности от геометрических параметров, фильтрационных характеристик заполнителя и диаметра используемой в их конструкции трубы, а также границы применимости полученных зависимостей.

В *1-ом расчетном случае* режим движения в бесполостной дрене принимается ламинарный. В трубчатой дрене за исключением начального участка имеет место турбулентный режим с наличием всех трех областей гидравлического сопротивления.

---

<sup>1</sup> Доктор техн. наук

Тел. (812) 310-50-55

Петербургский государственный университет путей сообщения  
190031, г. С.-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> Инженер

Тел. (812) 493–93-44, E-mail: BulganinEV@vniig.ru

<sup>3</sup> Инженер

Тел. (812) 493–93-44, E-mail: ArynBA@vniig.ru

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21

Рассмотрим случай, когда к дрене имеет место непрерывный по ее длине приток интенсивностью  $q$ . В стенках трубчатой дрены по всей ее длине имеются в необходимом количестве отверстия, через которые внутрь ее обеспечивается удельная приточность интенсивностью  $q_2$ , причем

$$q = q_1 + q_2, \quad (1)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – удельная приточность, приходящаяся на бесполостную и трубчатую часть дрены соответственно,  $\text{м}^2/\text{сут}$  или  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Примем также, что живые сечения потоков как в бесполостной части дрены, так и в трубчатой являются плоскими и вертикальными и на всей длине трубчатой дрены имеет место напорное движение воды.

Запишем уравнения движения для бесполостной части дрены и трубчатой для произвольного сечения 1-1, напор (глубина) в котором равен  $h$  (рис.1).

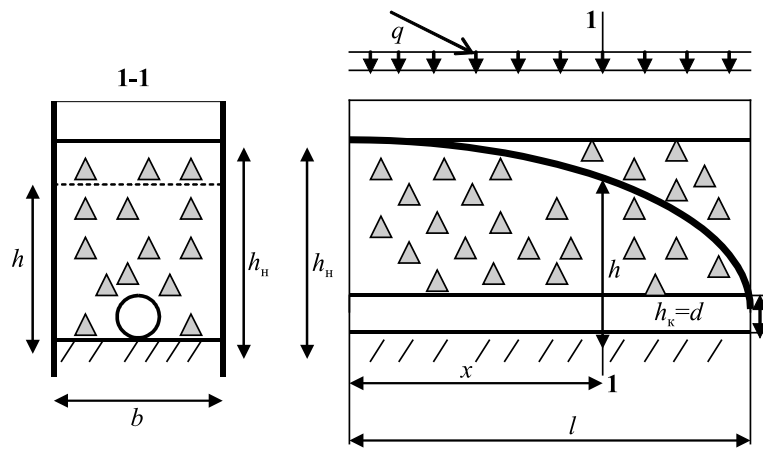


Рис. 1. Расчетная схема бесполостной дрены, усиленной дренажной трубой при нулевом уклоне дна

Для бесполостной части дрены при ламинарном режиме движения воды в ней используем уравнение

$$q_1 x = -K_d \omega \frac{dh}{dx}, \quad (2)$$

где  $\omega = (bh - \frac{\pi d^2}{4})$  – площадь живого сечения бесполостной части дрены,  $\text{м}^2$ ;  $K_d$  – коэффициент фильтрации заполнителя бесполостной части дрены при ламинарном режиме,  $\text{м}/\text{с}$  или  $\text{см}/\text{с}$ ;  $b$  – ширина бесполостной дрены,  $\text{м}$ ;  $d$  – диаметр трубчатой дрены,  $\text{м}$ .

Для этого же сечения применительно к трубчатой дрене действительно уравнение (3) [8]

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{\lambda V^2}{d 2g}, \quad (3)$$

где  $V$  – средняя скорость движения воды в дренажной трубе в рассматриваемом сечении,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

В трубчатой дрене на преобладающей части ее длины имеет место турбулентный режим и соответственно все области гидравлического сопротивления. В этом случае для определения  $\lambda$  рекомендуется использовать формулу Н.Ф. Фролова, которая справедлива для всех областей гидравлического сопротивления при турбулентном режиме движения воды [9, 10]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{13,68R} + \frac{a_2}{\text{Re}} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta$  – шероховатость стенок трубы, мм;  $R$  – гидравлический радиус;  $a_2$  – коэффициент, учитывающий шероховатость труб и каналов и определяемый по СП 32.13330.2012 [9].

Для расчетов в первом приближении, когда еще неизвестна удельная приточность к трубчатой дрене  $q_2$ ,  $\lambda$  можно принимать по величине близкой к той, которая получена по формуле (4) для области сопротивления гидравлически гладких труб, следующей непосредственно за ламинарным режимом. В конце расчета средняя величина  $\lambda_{\text{cp}}$  уточняется и соответственно вносятся коррективы в результаты расчета.

Получим решение уравнения (2), разделив переменные

$$q_1 x dx = -K_{\text{л}} \left( bh - \frac{\pi d^2}{4} \right) dh. \quad (5)$$

Проинтегрируем полученное выражение

$$q_1 x^2 \Big|_0^l = -\frac{K_{\text{л}} \left( bh - \frac{\pi d^2}{4} \right)^2}{b} \Big|_{h_{\text{н}}}^{h_{\text{к}}}. \quad (6)$$

Подставим вместо переменных их пределы изменения и решим уравнение (6) относительно  $q_1$

$$q_1 = \frac{K_{\text{л}}}{l^2 b} \left[ \left( bh_{\text{н}} - \frac{\pi d^2}{4} \right)^2 - \left( bh_{\text{к}} - \frac{\pi d^2}{4} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Получим решение уравнения (3). Выразим среднюю скорость  $V$  в рассматриваемом сечении через протекающий в этом же сечении расход, равный  $q_2 x$ :

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{\lambda_{\text{cp}} q_2^2 x^2 8}{d \pi^2 d^4 g}. \quad (8)$$

Разделим переменные и проинтегрируем полученное выражение:

$$h \Big|_{h_{\text{н}}}^{h_{\text{к}}} = -\frac{8 \lambda_{\text{cp}} q_2^2 x^3}{3 \pi^2 d^5 g} \Big|_0^l. \quad (9)$$

После подстановки вместо переменных их граничных значений получим зависимость для определения  $l$

$$l = \sqrt[3]{\frac{3 \pi^2 d^5 (h_{\text{н}} - h_{\text{к}}) g}{8 \lambda_{\text{cp}} q_2^2}}. \quad (10)$$

Выразим в формуле (10)  $q_2$  через  $q_1$

$$l = \sqrt[3]{\frac{3\pi^2 d^5 (h_n - h_k) g}{8\lambda_{cp} (q - q_1)^2}}. \quad (11)$$

Рассмотрим последовательность расчета на примере. При этом расчет выполним для различных режимов движения жидкости в трубчатой части дрены.

Д а н о : материал заполнителя бесполостной дрены – керамзит;  $d_u = 1,2$  см;  $n = 0,44$ ;  $\eta = 1,36$ ;  $\psi = 1,4$ ;  $\nu = 0,0131$  см<sup>2</sup>/с;  $b = 0,4$  м;  $h_n = 0,1$  м;  $h_k = d = 0,05$  м;  $q = 3,6$  м<sup>2</sup>/сут.

1. Так как нам неизвестны  $l$  и  $q_1$ , то начинаем расчет при  $q_1 = 0,5q$ , коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ , как было рекомендовано выше, вычисляем для области сопротивления гидравлически гладких труб турбулентного режима. Для поливинилхлоридных труб  $\Delta = 0,06$  мм,  $a_2 = 20$ . При этом  $\lambda$  будет равно 0,06.

2. По формуле (11) в 1-ом приближении вычислим  $l$

$$l = \sqrt[3]{\frac{3\pi^2 d^5 (h_n - h_k) q}{8\lambda_{cp} (q - q_1)^2}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 (0,10 - 0,05) 9,81}{8 \cdot 0,06 (2,08 \cdot 10^{-5})^2}} = 28 \text{ м}.$$

3. По известным зависимостям [5] вычисляем расчетное значение диаметра фильтрационного хода заполнителя бесполостной дрены  $d_u$  и коэффициент фильтрации при ламинарном режиме  $K_n$

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta \frac{n}{1-n} \frac{d_{17}}{\psi}}, \quad (12)$$

где  $n$  – пористость заполнителя;  $\eta$  – коэффициент неоднородности материала заполнителя;  $d_{17}$  – диаметр частиц заполнителя, меньше которого в его составе содержится 17% частиц по массе, см;  $\psi$  – коэффициент формы частиц.

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{1,96 \frac{0,44}{1-0,44} \frac{1,2}{1,4}} = 0,4 \text{ см}$$

$$K_n = \frac{ngdu^2}{8\pi^2 \nu}, \quad (13)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинетической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

$$K_n = \frac{0,44 \cdot 9,81 \cdot 0,004^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} = 0,668 \text{ м/с}.$$

4. По зависимости (7) в 1-м приближении определяем  $q_1$

$$q_1 = \frac{K_n}{l^2 b} \left[ \left( bh_u - \frac{\pi d^2}{4} \right)^2 - \left( bh_k - \frac{\pi d^2}{4} \right)^2 \right] =$$

$$= \frac{0,688}{28^2 \cdot 0,4} \left[ (0,4 \cdot 0,1 - 0,00196)^2 - (0,04 \cdot 0,05 - 0,00196)^2 \right] = 0,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

5. Во 2-ом приближении принимаем  $q_1 = 0,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и снова вычисляем  $l$ :

$$l = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 (0,10 - 0,05) \cdot 9,81}{8 \cdot 0,06 (3,93 \cdot 10^{-5})^2}} = 18,3 \text{ м.}$$

6. По формуле (7) вычисляем соответствующую этому значению  $l$  величину  $q_1$ :

$$q_1 = \frac{0,688}{334,9 \cdot 0,4} \left[ (0,4 \cdot 0,1 - 0,00196)^2 - (0,04 \cdot 0,05 - 0,00196)^2 \right] = 0,56 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с.}$$

7. Итоговые результаты после 3-го приближения  $l = 19,1 \text{ м}$ ;  $q_1 = 0,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $q_2 = 3,66 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Расчет выполнен при  $\lambda_{\text{ср}} = 0,06$ .

8. Уточняем величину  $\lambda_{\text{ср}}$ , для этого определим величину  $\lambda$  для устьев участка

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{13,68R} + \frac{\alpha_2}{\text{Re}} \right),$$

где

$$\text{Re} = \frac{Qd}{\omega v} = \frac{q_2 \cdot 19,1 \cdot d}{\omega v} = \frac{3,66 \cdot 10^{-5} \cdot 19,1 \cdot 0,05}{0,00196 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} = 13613,$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{0,0006}{13,68 \cdot 0,0125} + \frac{20}{13613} \right) = 0,047.$$

Соответственно  $\lambda_{\text{ср}} = 0,053$ .

9. Принимая  $\lambda = \lambda_{\text{ср}} = 0,053$ , опять уточняем величины  $l$  и  $q_1$ . При этом получаем  $l = 19,8 \text{ м}$ ,  $q_1 = 0,47 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $q_2 = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таким образом пересчет с учетом уточненного значения  $\lambda_{\text{ср}}$  дает погрешность при определении  $l$  – 3,5%, а при определении  $q_1$  – 8,5%.

10. Вычисляя по отдельности потери напора в бесполостной части дрены на участке с ламинарным и турбулентным режимом, получаем суммарную погрешность в сторону завышения результата  $\approx$  на 11%. Величина полученной погрешности не превышает величину погрешности, с которой определяются в лаборатории, например, коэффициенты фильтрации материала заполнителя бесполостной дрены, поэтому усложнять методику расчета путем выделения участка с турбулентным режимом в бесполостной части дрены в целом не приведет к существенному повышению точности расчета.

Рассмотрим *2-ой наиболее вероятный случай*, когда на преобладающей части бесполостной дрены имеет место переходный режим фильтрации. В отличие от открытых потоков при фильтрации переходный режим имеет очень широкий диапазон изменения числа Рейнольдса.

В трубчатой дрене режим движения (за исключением небольшого по длине начального участка) турбулентный, включающий в себя все три области гидравлического сопротивления. Расчетная схема остается прежней,

но уравнение движения воды в бесполостной части дрены будет иметь другой вид [6]:

$$\frac{dh}{dS} = -\frac{q_1}{K_n \omega} S - \frac{(q_1)^2 S^2}{K_T^2 \omega^2}, \quad (14)$$

где

$$\omega = bh - \frac{\pi d^2}{4} = b\left(h - \frac{\pi d^2}{4b}\right). \quad (15)$$

Обозначим

$$h - \frac{\pi d^2}{4b} = Z. \quad (16)$$

Тогда уравнение (14) будет иметь вид

$$\frac{dZ}{dS} = -\frac{q_1 S}{K_n b Z} - \frac{(q_1')^2 S^2}{K_T^2 b^2 Z^2}. \quad (17)$$

Введем обозначения

$$\frac{q_1'}{K_n b} = U_n \quad (18)$$

$$\text{и} \quad \frac{(q_1')^2}{K_T^2 b^2} = U_T, \quad (19)$$

а также  $\frac{Z}{S} = t$  и преобразуем уравнение (17)

$$\frac{dh}{dS} = -\left(\frac{U_n}{t} + \frac{U_T}{t^2}\right). \quad (20)$$

Разделим переменные в уравнении (20) и проинтегрируем полученное выражение

$$-\int \frac{t^2 dt}{t^3 + U_n t + U_T} = \ln \frac{S}{C}. \quad (21)$$

Рассмотрим следующее приведенное кубическое уравнение:

$$t^3 + U_n t + U_T = t^3 + 3pt + 2q = 0, \quad (22)$$

где

$$p = \frac{U_n}{3}, \text{ а } q = \frac{U_T}{2}.$$

Дискриминант D уравнения (22) равен

$$D = q^2 + p^3 = \frac{U_T^2}{4} + \frac{U_n^3}{27}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что  $D > 0$  и поэтому уравнение (22) имеет один действительный и два мнимых корня.

Используя способ вспомогательных величин  $r$  и  $\phi$  получаем возможность представить знаменатель подинтегрального выражения (21) в виде

$$t^3 + U_n t + U_T = (t - K_1)(t^2 - K_1 t + U_n + K_1^2), \quad (24)$$

где  $K_1$  – корень уравнения (22), который вычисляется по формуле

$$K_1 = -2\sqrt{\frac{U_n}{3}} \operatorname{Sh} \left( \frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{U_T}{\sqrt{U_n^3}} \right). \quad (25)$$

Подставив в (21) вместо  $t^3 + U_n t + U_T$  его выражение из формулы (24) и решив интеграл, получаем следующую формулу

$$(h_n - P) = l \sqrt{\frac{(t_k^3 + U_n t_k + U_T)^{1-\Phi_0}}{(t_k - K_1)^{1-3\Phi_0}}} \exp \left[ \frac{K_1(1-3\Phi_0)}{\sqrt{N_0}} \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1}{\sqrt{N_0}} \right) \right] \quad (26)$$

или

$$h_n = P + l \sqrt{\frac{(t_k^3 + U_n t_k + U_T)^{1-\Phi_0}}{(t_k - K_1)^{1-3\Phi_0}}} \exp \left[ \frac{K_1(1-3\Phi_0)}{\sqrt{N_0}} \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1}{\sqrt{N_0}} \right) \right],$$

где

$$\Phi_0 = \frac{K_1^2}{U_n + 3K_1^2}, \quad (27)$$

$$N_0 = 4U_n + 3K_1^2, \quad (28)$$

$$t_k = \frac{\left( h_k - \frac{\pi d^2}{4b} \right)}{l}. \quad (29)$$

Рассмотрим пример для 2-го расчетного случая, когда на преобладающей части бесполостной дрены имеет место переходный режим фильтрации.

Дано: материал заполнителя бесполостной части дрены – щебень:  $d_{17}=2,45$  см;  $n = 0,48$ ;  $\eta = 1,54$ ;  $\psi = 1,68$ ;  $C_0 = 78$  см<sup>1/2</sup>/с;  $b = 0,4$  м;  $d = 0,05$  м;  $l = 30$  м;  $h_k = d = 0,05$  м;  $q = 4,75$  м<sup>2</sup>/сут;  $\lambda_{cp} = 0,05$ .

О п р е д е л и т ь  $q_1$ ;  $q_2$  и  $h_n$ .

1. Определяем расчетный диаметр фильтрационного хода

$$d_u = 0,57\sqrt[6]{\eta} \frac{n}{1-n} \frac{d_{17}}{\psi} = 0,57\sqrt[6]{1,54} \frac{0,48}{1-0,48} \frac{2,45}{1,68} = 0,82 \text{ см.}$$

2. Вычисляем коэффициенты фильтрации щебня при ламинарном и турбулентном режимах:

при ламинарном режиме

$$K_{л} = \frac{ngdu^2}{8\pi^2\nu} = \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0082^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} = 3,06 \text{ м/с;}$$

при турбулентном режиме

$$K_T = \frac{nC_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2du} = \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,82} = 8,62 \text{ см/с}$$

или 0,086 м/с.

3. Принимаем  $h_n = 0,22$  м и по формуле (10) вычисляем

$$q_2 = \sqrt{\frac{3\pi^2 d^5 (h_n - h_k) g}{8\lambda_{cp} l^3}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 0,17 \cdot 9,81}{8 \cdot 0,05 \cdot 30^3}} = 0,38 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

4. Определяем  $q_1 = q - q_2 = 0,55 \cdot 10^{-4} - 0,38 \cdot 10^{-4} = 0,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Продолжая расчет, убедимся, что  $h_n$  в бесполостной части дрены тоже равен 0,22 м.

5. Предварительно по формулам (18), (19), (25) и (27–29) определяем параметры  $U_n$ ;  $U_T$ ;  $K_1$ ;  $\Phi_0$ ;  $N_0$  и  $t_k$ .

$$U_n = \frac{q_1}{K_n b} = \frac{0,17 \cdot 10^{-4}}{3,06 \cdot 0,4} = 0,139 \sum 10^{-4};$$

$$U_T = \frac{(q_1)^2}{K_T^2 b^2} = \frac{(0,17 \cdot 10^{-4})^2}{(0,086)^2 \cdot 0,4^2} = 0,244 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = -2 \sqrt{\frac{U_n}{3}} \operatorname{Sh} \left( \frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{U_T}{\sqrt{U_n^3}} \right) =$$

$$= -2 \sqrt{\frac{0,139 \cdot 10^{-4}}{3}} \operatorname{Sh} \left( \frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{0,244 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{(0,139 \cdot 10^{-4})^3}} \right) = -0,0055;$$

$$\Phi_0 = \frac{K_1^2}{U_n + 3K_1^2} = \frac{(-0,0055)^2}{0,139 \cdot 10^{-4} + 3(-0,0055)^2} = 0,32;$$

$$N_0 = 4U_n + 3K_1^2 = 4 \cdot 0,139 \cdot 10^{-4} + 3(-0,0055)^2 = 1,456 \cdot 10^{-4};$$

$$t_k = \frac{\left( h_k - \frac{\pi d^2}{4b} \right)}{l} = \frac{(0,05 - 0,0049)}{30} = 0,0015.$$

6. По формуле (26) вычисляем  $h_n$

$$h_n = P + l \sqrt{\frac{(t_k^3 + U_n t_k + U_T)^{1-\Phi_0}}{(t_k - K_1)^{1-3\Phi_0}}} \times \exp \left[ \frac{K_1(1-3\Phi_0)}{\sqrt{N_0}} \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1}{\sqrt{N_0}} \right) \right] =$$

$$= 0,0049 + 30 \sqrt{\frac{(0,337 \cdot 10^{-8} + 0,208 \cdot 10^{-7} + 0,244 \cdot 10^{-6})^{0,68}}{(0,0015 + 0,0055)^{0,04}}} \times$$

$$\times \exp \left[ \frac{-0,0055 \cdot 0,04}{\sqrt{1,465 \cdot 10^{-4}}} \left( 1,57 - \operatorname{arctg} \frac{0,0030 - 0,0055}{\sqrt{1,465 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 0,22 \text{ м.}$$

Теперь представляется возможным уточнить значение  $\lambda_{cp}$ , которое было принято равным 0,05 и соответственно пересчитать  $q_1$ ,  $q_2$  и  $h_n$ .

Для участка, где заканчивается ламинарный режим и начинается область гидравлически гладких труб турбулентного режима  $\lambda = 0,06$ . Вычислим  $\lambda$  для устьевого участка

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{4q_2 30}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,38 \cdot 10^{-4} \cdot 30}{3,14 \cdot 0,052} = 0,58 \text{ м/с};$$

$$\operatorname{Re} = \frac{Vd}{\nu} = \frac{0,58 \cdot 0,05}{0,0131 \cdot 10^{-4}} = 22137;$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{13,68R} + \frac{d_2}{\operatorname{Re}} \right) = -2 \lg \left( \frac{0,006}{13,68 \cdot 1,25} + \frac{20}{22137} \right)$$

откуда  $\lambda = 0,03$ ;  $\lambda_{cp} = 0,045$ .



Для найденного значения  $\lambda_{cp}$  уточним величину  $q_2$

$$q_2 = \sqrt{\frac{3\pi^2 d^5 (h_n - h_k) g}{8\lambda_{cp} l^3}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 0,17 \cdot 9,81}{8 \cdot 0,045 \cdot 30^3}} = 0,40 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Соответственно  $q_1 = q - q_2 = (0,55 - 0,40) \cdot 10^{-4} = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Так как  $\lambda_{cp}$  уменьшилось, то пропускная способность трубы увеличилась, а нагрузка на бесполостную часть дрены уменьшилась, следовательно, величины  $q_1$ ,  $q_2$  и  $h_n$  изменятся.

Определим изменение  $h_n$ , выполнив перерасчет бесполостной части дрены с учетом изменившейся величины  $q_1$ .

1. Определим параметры  $t_k$ ,  $U_n$ ,  $U_T$ ,  $K_1$ ,  $\Phi_0$  и  $N_0$ .

$$t_k = 0,0015; U_n = \frac{0,15 \cdot 10^{-4}}{3,06 \cdot 0,4} = 0,122 \cdot 10^{-4};$$

$$U_T = \frac{(q_1)^2}{K_1^2 b^2} = \frac{(0,15 \cdot 10^{-4})^2}{0,0074 \cdot 0,16} = 0,19 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = -2 \sqrt{\frac{U_n}{3}} Sh \left( \frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{U_T}{\sqrt{U_n^3}} \right) =$$

$$= -2 \sqrt{\frac{0,122 \cdot 10^{-4}}{3}} Sh \left( \frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{0,19 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{(0,122 \cdot 10^{-4})^3}} \right) = -0,00504;$$

$$N_0 = 4U_n + 3K_1^2 = 4 \cdot 0,122 \cdot 10^{-4} + 0,0000762 = 1,25 \cdot 10^{-4};$$

$$\Phi_0 = \frac{K_1^2}{U_n + 3K_1^2} = \frac{0,0000254}{0,122 \cdot 10^{-4} + 0,0000762} = 0,287;$$

$$h_n = 0,0049 + 30 \sqrt{\frac{(0,0015^3 + 0,122 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0015 + 0,19 \cdot 10^{-6})^{0,713}}{(0,0015 + 0,00504)^{0,139}}} \times$$

$$\times \exp \left[ \frac{-0,00504 \cdot 0,139}{0,0122} \left( 1,57 - \text{arctg} \frac{0,003 - 0,00504}{0,0112} \right) \right] = 0,163 \text{ м или } 16,3 \text{ см}.$$

Принимая во 2-ом приближении  $h_n = 19$  см, продолжаем расчет

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot 9,86 \cdot 0,05^5 \cdot 0,14 \cdot 9,81}{8 \cdot 0,045 \cdot 30^3}} = 0,36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$q_1 = q - q_2 = 0,55 \cdot 10^{-4} - 0,36 \cdot 10^{-4} = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Так как расход, скорость в потоке дренажной трубы, а также длина участка с ламинарным режимом существенно меньше соответствующих характеристик на остальной части трубы, то потери напора на участке с ламинарным режимом будут незначительными.

Для того, чтобы убедиться, что неучет ламинарного режима в начале дрены дает не существенную погрешность в определении, например,  $h_n$ , определим потери напора на остальной части трубы, где имеет место турбулентный режим движения (рис. 2).

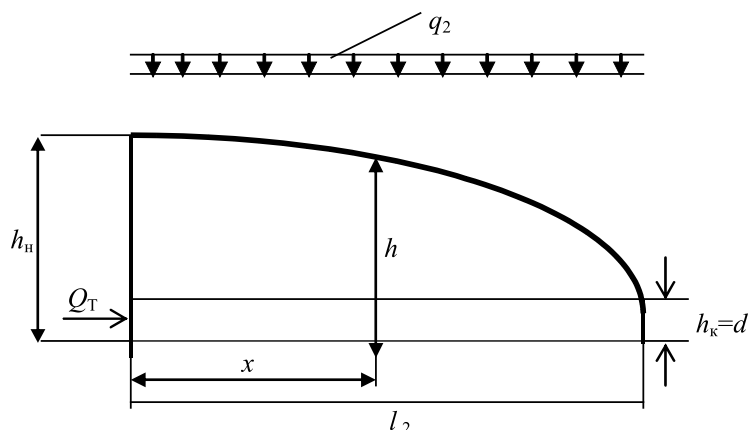


Рис. 2. Расчетная схема участка дренажной трубы с турбулентным режимом

Для рассматриваемого живого сечения имеет место следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{\lambda_{cp}}{d} \frac{V^2}{2g} = -\frac{8\lambda_{cp}(Q_T + q_2x)^2}{\pi^2 d^5 g}. \quad (30)$$

После интегрирования получаем следующую расчетную зависимость

$$h_n - h_k = \frac{8\lambda_{cp} [(Q_T + q_2 l_2)^3 - Q_T^3]}{3q_2 \pi^2 d^5 g}, \quad (31)$$

где  $(h_n - h_k)$  – потери напора на участке с турбулентным режимом;  $Q_T$  – транзитный расход, формируемый на участке с ламинарным режимом и равный  $q_2 l_1$ .

Исходные данные для расчета:  $\lambda_{cp} = 0,045$ ;  $q_2 = 0,36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $d = 0,05 \text{ м}$ ;  $h_k = d = 0,05 \text{ м}$ ;  $l_2 = 26,7 \text{ м}$ ;  $l_1 = 3,3 \text{ м}$ .

$$h_n - h_k = \frac{8 \cdot 0,045 [(1,188 \cdot 10^{-4} + 0,36 \cdot 26,7 \cdot 10^{-4})^3 - (1,188 \cdot 10^{-4})^3]}{3 \cdot 0,36 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81} = 0,136 \text{ м};$$

$$h_n - h_k \cong 0,136 \text{ м}; \quad h_n = 0,186 \text{ м}.$$

Ранее мы принимали, что у нас имеет место турбулентный режим на всей длине трубы и  $(h_n - h_k) = 0,140 \text{ м}$ . Погрешность расчета составляет 2,8%, что вполне допустимо.

Убедимся путем расчета, что на всем протяжении бесполостной части дрены (за исключением небольшого по длине начального участка) наблюдается переходный режим движения воды в заполнителе.

Переходный режим фильтрации имеет место, если соблюдается следующее условие:

$$\text{Re}_d < \text{Re} < \text{Re}_t, \quad (32)$$

где  $\text{Re}_d = 8,6n \sqrt{\frac{d_{17}}{d_u}}$  – критическое число Рейнольдса, обозначающее границу ламинарной фильтрации.  $\text{Re}_t$  – число Рейнольдса, при превышении которого режим фильтрации становится турбулентным.

При этом  $Re_r$  определяется по формуле [7]:

$$Re_r = 1128,6 \frac{n^{2,5} \eta^4}{\psi^3 (1-n)^2 + 1,778 n^{2,5} \eta^4}, \quad (33)$$

где все обозначения известны.

В рассматриваемом нами расчетном случае  $n = 0,48$ ;  $\eta = 1,54$ ;  $\psi = 1,58$ .

Соответственно:

$$Re_r = 1128,6 \frac{0,48^{2,5} \cdot 1,54^4}{1,68^3 (1-0,48)^2 + 1,778 \cdot 0,48^{2,5} \cdot 1,54^4} = 352.$$

Вычисляем, чему равно число Рейнольдса в устье бесполостной части дрены в нашем расчетном случае

$$Re = \frac{V d_u}{\nu}; \quad V_o = \frac{Q}{\omega} = \frac{q_l l}{b h_k} = \frac{0,19 \cdot 10^4 \cdot 30}{0,4 \cdot 0,05} = 0,028 \text{ м/с.}$$

$$Re = \frac{0,028 \cdot 0,004}{0,0131 \cdot 10^{-4}} = 85.$$

Расчеты показывают, что действительно в бесполостной части дрены (за исключением начального участка) имеет место переходный режим фильтрации.

Полученные аналитические зависимости позволяют выполнять подбор требуемых геометрических параметров бесполостных дрен ( $b$ ,  $h$ ) при известном притоке в дрену ( $q$ ), фильтрационных характеристик ее заполнителя (коэффициенте фильтрации), параметров трубчатой дрены (диаметр и материал) и общей длины дрены ( $l$ ). При этом учет дополнительной пропускной способности трубчатой части в конструкции дрены позволяет:

сократить сечения бесполостных дрен, снизив тем самым экономические затраты на строительство дренажной системы в целом;

не увеличивать сечения дрен на участках, где возможно формирование нештатных режимов работы дренажа, например, при прорыве рядом расположенных водонесущих коммуникаций, перенаправлении дренажного стока внутри системы при закупорке отдельных участков дренажа, кратковременном (пиковом) увеличении проточности в дренаж, а также в период строительства системы.

Полученные зависимости также могут быть использованы для повзрочных гидравлических расчетов трубчатых дренажей с обсыпкой хорошо фильтрующим материалом: кольцевой дренаж, систематический, прифундаментный и т.д. Например для оценке целесообразности их перекладки при увеличении удельной проточности в дренаж или подключении дополнительных элементов, а также при ремонтных работах, когда в результате повреждения снижается пропускная способность дренажной трубы.

## Выводы

1. Получены зависимости, позволяющие рассчитывать параметры (длину, удельные проточности к бесполостной и трубчатой частям дрены и максимальную глубину в бесполостной части дрены) бесполостной дрены, усиленной дренажной трубой при нулевом уклоне дна, когда в бесполост-

ной части дрены имеют место ламинарный или переходный режимы движения воды, а в дренажной трубе (за исключением начального участка) турбулентный.

2. Использование полученных зависимостей за счет учета дополнительной пропускной способности вводимой в конструкцию дрены трубы позволяет при проектировании дренажных систем назначать более экономичные геометрические сечения бесполостных дрен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исследование** гидрогеологической обстановки при строительстве котлована 1-го энергоблока Ленинградской АЭС-2 / С.В.Сольский, Д.П.Самофалов, М.П. Головина, Е.В.Булганин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 256. С. 72-81.

2. **Проектирование** систем водообустройства площадных и линейных объектов магистральных газопроводов Севера и Северо-Запада РФ / С.В.Сольский, С.А.Кауфман, С.В.Кубетов, Е.В.Булганин // Газовая промышленность. 2014. № 10. С. 78-83.

3. **Штыков В.И., Козлова А.В.** Гидравлический расчет бесполостного дренажа при грунтовом напорном питании // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2007. Т. 247. С. 84-91.

4. **Штыков В.И., Булганин Е.В.** Гидравлический расчет безуклонных бесполостных дрен трапецеидального поперечного профиля // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2008. Т. 252. С. 35-40.

5. **Штыков В.И.** Исследование фильтрационных свойств зернистых материалов исходя из модели криволинейных ходов // Сб. научн. статей Международной конференции «Современные проблемы теории фильтрации», 1-3 июня 1998 г. г.Ровно: Вестник Украинской государственной академии водного хозяйства. 1998. С.170-173.

6. **Штыков В.И., Гордиенко С.Г.** Бесполостной дренаж: гидравлическое обоснование, расчет и эффективность действия. Санкт-Петербург: ОАО ПП-3. 1997.

7. **Штыков В.И., Гордиенко С.Г.** Гидравлические исследования бесполостного дренажа // Гидротехническое строительство. 1997. № 8. С.41-42.

8. **Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Курганов А.М.** Гидравлический расчет сетей водоотведения жидкости. Санкт-Петербург. 1997.

9. **СП 32.13330.2012** Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03.-85М.: Минрегион России. 2012.

10. **Курганов А.М., Федоров Н.Ф.** Гидравлические расчеты системы водоснабжения и водоотведения: Справочник. Л.: Стройиздат. 1986.