

УДК 502/504:627.82

А.Е. КАСЬЯНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

РАСЧЕТ ДРЕНАЖА ЛИНЕЙНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Методами гидромеханики решена задача плоской фильтрации к дренажу основания линейного гидротехнического сооружения. Основание гидросооружения отображает в области фильтрации полукруглое включение, проницаемость которого отличается от проницаемости осушаемого грунта. Дрену отображает точечный сток, мощность которого равна удельному дренажному расходу. Используются методы аналитического продолжения и теорема об окружности. Получены зависимости параметров дренажа и основания сооружения характеристических функций фильтрационного течения в осушаемом грунте и основании. В аналитическом виде представлены зависимости скоростей фильтрации, градиентов фильтрационного потока во всех точках области фильтрации. Дана формула расчета удельного дренажного расхода. Наибольшее влияние на расход дрены и параметры фильтрационного течения оказывает соотношение проницаемостей осушаемого грунта и основания сооружения. Влияние размеров основания и дренажа на параметры фильтрационного потока проявляется при минимальном расстоянии между ними.

Гидромеханический расчет фильтрации, дренаж, основание линейного гидротехнического сооружения, характеристическая функция фильтрационного течения, теорема об окружности, аналитическое продолжение функции, удельный дренажный расход, скорости фильтрации, градиент фильтрационного потока.

Введение. Важным элементом комплекса водохозяйственного объекта с линейным гидротехническим сооружением является дренаж. Дренаж защищает от воздействия грунтовых вод основания дамб обвалования, водопроводящих тоннелей, дорог, каналов. При расчете параметров дренажа, дренажных фильтров необходимы все параметры фильтрационного потока во всей области фильтрации: скорости фильтрации, расход дрены, градиенты фильтрационного потока. Гидромеханический метод расчета позволяет найти указанные величины. Решена плоская задача фильтрации к дрене в однородном грунте, содержащем включение, проницаемость которого отличается от проницаемости грунта. Включение отображает основание линейного гидротехнического сооружения.

Материалы и методы исследования. Вдоль основания линейного сооружения на глубине t и расстоянии S_0 от его оси заложена дрена радиусом r_0 . Сечение основания сооружения представлено полукруглостью радиуса R , где $2R$ – ширина основания, R – глубина основания. Коэффициенты фильтрации осушаемого однородного грунта – K_1 , и основания, которые рассматриваются включением в однородный грунт, – K_2 . На поверхности грунта есть слой воды H . Геометрию сечения основания

гидротехнического сооружения более точно отображает половина эллипса. Расчет для этого случая включает конформное преобразование эллипса на плоскости z_1 окружности римановой поверхности на плоскости z_1 . Аналитические зависимости параметров фильтрационного потока от параметров дренажа и основания сооружения содержат бесконечные ряды и цепные дроби. Ход расчетов аналогичен представленному ниже.

Для определения параметров характеристической функции фильтрационного течения в плоскости $zf(z) = \varphi + i\psi$, где φ – потенциал скорости течения; ψ – функция тока; i – мнимая единица, воспользуемся теоремой об окружности и методом аналитического продолжения [1, 2]. Назовем область фильтрации вне включения $|z| > R$ зоной 1, а внутри включения $|z| < R$ – зоной 2. Обозначим параметры течения, относящиеся к указанным зонам, соответствующими индексами 1 и 2. В точке \bar{z}_0 разместим точечный сток мощностью q (рис. 1). Величина стока равна расходу дрены на единицу ее длины.

Поверхность грунта является эквипотенциалью $j = -K_1 H$, поэтому выполним аналитическое продолжение характеристической функции течения в верхнюю полуплоскость плоскости z , которое заключается в симметричном продолжении зон 1 и 2 в верхнюю полуло-

скость и размещении в точке z_0 точечного стока с мощностью q . В результате в плоскости z мы получаем бесконечный слой грунта проницаемости K_1 , содержащий круговое включение радиуса R , заполненное грунтом проницаемости K_2 . В слое наблюдается течение под действием точечных источника и стока мощности q , которые размещаются в точках z_0 и \bar{z}_0 (рис. 2) [3].

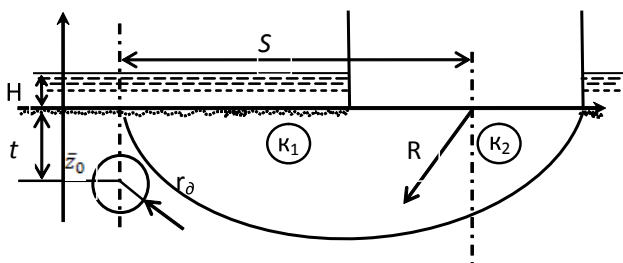


Рис. 1. Схема для расчета фильтрации к дрене и при наличии основания линейного гидротехнического сооружения

Комплексные потенциалы скоростей течения в зонах 1 и 2 соответственно будут иметь вид:

$$\omega_1(z) = \frac{q}{2\pi} \left(\ln \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0} + \lambda \ln \frac{z - \bar{z}_{01}}{z - z_{01}} \right) + C_1, \quad (1)$$

$$\omega_2(z) = \frac{q}{2\pi} (1 - \lambda) \ln \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0} + C_2, \quad (2)$$

$$\bar{z}_{01} = s + \frac{R^2}{z_0 - s}; \quad z_{01} = s + \frac{R^2}{z_0 - s}; \quad \lambda = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}.$$

(3)

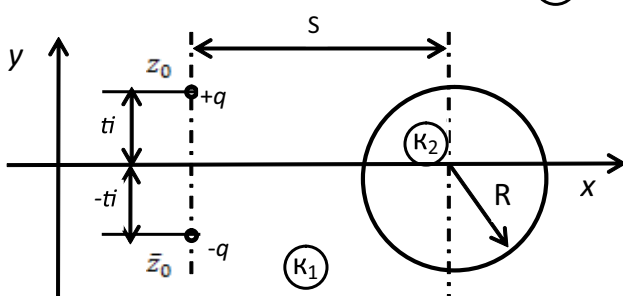


Рис. 2. Схема для расчета фильтрации к дрене в бесконечном слое грунта при наличии кругового включения

Найдем потенциал скорости течения в зоне 1, выделив действительную часть (1):

$$\varphi_1(x, y) = \frac{q}{2\pi} \left(\ln \sqrt{\frac{(x - x_0)^2 + (y - t)^2}{(x - x_0)^2 + (y + t)^2}} + \lambda \ln \sqrt{\frac{A^2 + \bar{B}^2}{A^2 + B^2}} \right) + C_3 \quad (3)$$

где

$$A = (x - s - \frac{R^2(x_0 - s)}{(x_0 - s)^2 + t^2}); \quad \bar{B} = (y - \frac{R^2 t}{(x_0 - s)^2 + t^2});$$

$$B = (y + \frac{R^2 t}{(x_0 - s)^2 + t^2}).$$

Как у С.Ф. Аверьянова [1], П.Я. Полубариновой-Кочиной [2], за контур дрены принимаем эквипотенциаль $j_1 = -K_1(-t + r_0)$, проходящую через точку с координатами $X = X_0, y = -t + r_0$. Положим $C_3 = -K_1 H$, чтобы при $y = 0$ выполнялось очевидное условие $j(x = 0) = -K_1 H$. Подставим в (3) заданные условия и, пренебрегая r_0 по сравнению с другими величинами, найдем:

$$q = \frac{2\pi K_1 (H + t - r_0)}{\ln(\frac{2t}{r_0}) + \lambda \ln \sqrt{\frac{A_0^2 + \bar{B}_0^2}{A_0^2 + B_0^2}}}, \quad (4)$$

при $X = X_0; B_0 = B$; при $y = -t + r_0$.

Введем коэффициент удельного дренажного расхода:

$$\alpha = \frac{q}{q_0}, \quad (5)$$

где $q_0 = \frac{2\pi K_1 (H + t - r_0)}{\ln(\frac{2t}{r_0})}$ — удельный расход дрены в однородном грунте.

Подставив (5) в (4), получим зависимость для расчета коэффициента α :

$$\alpha = (1 + (\ln(\frac{2}{r_0}))^{-1} \lambda \ln \sqrt{\frac{\tilde{A}^2 + \tilde{B}^2}{\tilde{A}^2 + \tilde{B}^2}})^{-1}. \quad (6)$$

В формуле (6) для упрощения записи нулевые индексы опущены и введены относительные величины:

$$\tilde{x}_0 = \frac{x}{t}; \quad \tilde{s} = \frac{s}{t}; \quad \tilde{R} = \frac{R}{t}.$$

Для оценки действия дренажа необходимо знать значения скорости фильтрации в любой точке области течения. Продифференцируем характеристическую функцию течения $w_1(z)$ по z и получим комплексную скорость фильтрации в зоне 1:

$$V_1(z) = V_{1x} - i V_{1y} = \frac{q}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{z - z_0} - \frac{1}{z - \bar{z}_0} \right) + \lambda \left(\frac{1}{z - \bar{z}_{01}} - \frac{1}{z - z_{01}} \right) \right). \quad (9)$$

Дифференциал $w_2(z)$ по z дает комплексную скорость фильтрации внутри включения в зоне 2:

$$v_2(z) = v_{2x} - i v_{2y} = (q/2\pi) (1 - \lambda) ((z - z_0)^{-1} - (z - \bar{z}_0)^{-1}). \quad (10)$$

Разделив (9) на мнимую и действительную части, найдем вертикальную V_{1y}

и горизонтальную V_{1x} , составляющие скорости фильтрации в зоне 1:

$$V_{1y} = -\frac{q}{2\pi} \left(-\frac{y+t}{(x-x_0)^2 + (y+t)^2} - \frac{y-t}{(x-x_0)^2 + (y-t)^2} \right) + \lambda \left(\frac{y+t^*}{(x-x_0^*)^2 + (y+t^*)^2} - \frac{y-t^*}{(x-x_0^*)^2 + (y-t^*)^2} \right) \quad (11)$$

$$x_0^* = S + \frac{R^2(x^0 - S)}{(x_0 - s)^2 + t^2}; \quad t^* = \frac{R^2 t}{(x_0 - s)^2 + t^2}.$$

$$V_{1x} = \frac{q}{2\pi} \left(\frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + (y+t)^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + (y-t)^2} \right) + \lambda \left(\frac{y+t^*}{(x-x_0^*)^2 + (y-t^*)^2} - \frac{y-t^*}{(x-x_0^*)^2 + (y+t^*)^2} \right) \quad (12)$$

Скорость фильтрации внутри включения будут описывать зависимости (11)- (12) без последней скобки, умноженные на коэффициент (1-1).

Интенсивность действия дренажа определяет скорость фильтрации в поверхностном слое грунта. Подставим в (11) и (12) $U = 0$, получим зависимости для ее расчета:

$$V_{1y-0} = -\frac{q}{\pi} \left(\left(\frac{t}{(x-x_0)^2 + t^2} + \frac{t'}{(x-x_0')^2 + t'^2} \right); \quad (13)$$

$$V_{1y02} = -\frac{q}{\pi} \left(\left(\frac{t}{(x-1)^2 + t^2} + \frac{\frac{R^2}{t}}{(x-1)^2 + \frac{R^2}{t}} \right), \quad (14)$$

Введем коэффициент скорости фильтрации:

$$\beta = \frac{V_{1y}}{V_{0y}}, \quad (15)$$

где $V_{0y} = (-q_0 / \pi)(t/(x^2 + t^2))$ – скорость фильтрации в однородном грунте проницаемости K_1 .

Подставим в (15) (13), получим искомую формулу:

$$\beta_1 = \alpha \left(1 + \frac{((\tilde{x} - \tilde{s})^2 + 1) \tilde{\lambda} R^2}{(\tilde{x} - \tilde{s})^2 + \tilde{R}^4} \right). \quad (16)$$

Коэффициент скорости для зоны внутри включения будет иметь вид:

$$\beta_2 = \alpha (1 - \lambda), \quad (17)$$

где все обозначения прежние. Зависимости для расчета коэффициентов α и β позволяют оценить влияние параметров включения на режим работы дренажа.

Оценку фильтрационных деформаций дренажа и основания линейного гидротехнического сооружения выполняют по величине градиента фильтрационного потока J . Градиенты фильтрационного потока для зоны 1 и зоны 2 определяют соответственно из вы-

ражения (9), деленного на K_1 , и выражения (10), деленного на K_2 . Вероятность суффозии возможна при градиенте $J > J_{кр}^c$, где $J_{кр}^c$ – критический градиент суффозии. Вероятность контактного размыва возможна при градиенте $J > J_{кр}^{к.р.}$, где $J_{кр}^{к.р.}$ – критический градиент контактного размыва.

Результаты исследований. Анализ зависимости для расчета коэффициента расхода (5), показывает что наиболее существенное влияние на его величину оказывает соотношение проницаемостей осушаемого грунта и включения, которое характеризуется величиной l и является сомножителем второго члена зависимости (5). Если проницаемость включения K_2 больше проницаемости осушаемого грунта K_1 (l меньше 0), то расход дренажа увеличивается при наличии включения. Коэффициент α получается больше единицы. В противном случае расход дренажа уменьшается. При наличии включения с проницаемостью меньшей, чем проницаемость осушаемого грунта, расход дренажа уменьшается. Коэффициент l получается меньше единицы. Так, при изменении l в 4 раза от 0,2 до 0,8, коэффициент α уменьшается на 15,6% (от 0,935 до 0,789) при $\bar{s} = 0$ и $r_d = 0,025$. Увеличение r_d в два раза, от 0,025 до 0,05, при $\bar{s} = 0$ и $l = 0,2$ уменьшает α на 1,2% (от 0,935 до 0,924).

Удаление дренажа от контура включения в меньшей степени влияет на дренажный расход, так как отношение значений $\bar{A}_0, \bar{B}_0, \bar{B}'_0$ стоит под логарифмом. Ее заметное влияние начинает проявляться в непосредственной близости от контура включения, когда контур дренажа касается контура включения. Четырехкратное увеличение S от 0 до 4,0 при $\bar{r}_d = 0,025$ и $l = 0,2$ вызывает увеличение коэффициента α только на 6,5% (от 0,935 до 1). Размеры основания и дренажа в наибольшей мере влияют на параметры фильтрационного потока при минимальном расстоянии между ними.

На коэффициенты скорости (16) и (17) оказывает наиболее существенное влияние величина l , так как она входит сомножителем. Аналогичное влияние оказывает коэффициент расхода, который также существенно зависит от l . Включение с проницаемостью, меньшей, чем проницаемость осушаемого грунта (l положительное), вызывает повышение скорости фильтрации рядом с включением. В противном случае скорость фильтрации снижается. Максимальное значение это влияние достигает, когда $l = 1$ (включение полностью непроницаемое) или $l = -1$ (включе-

ние представляет собой заполненную водой каверну). Увеличение l в 4 раза, от 0,2 до 0,8, уменьшает коэффициент b_2 на 79,0% (от 0,748 до 0,157) при $\bar{s} = 0$, $r_d = 0,025$. Увеличение \bar{s} от 0 до 0,5 в пределах включения увеличивает коэффициент b_2 на 14,0% (от 0,157 до 0,179) при $r_d = 0,025$ и $l = 0,8$. Увеличение \bar{s} от 1,0 до 4,0 приводит к уменьшению b_1 вне включения при тех же значениях r_d и l на 8,4% (от 1,657 до 1,529). Коэффициенты скорости b_2 внутри включения и вне его b_1 различаются в 9,2 раза (от 0,179 до 1,657) при $\bar{r}_d = 0,025$, $l = 0,8$ и $\bar{s} = 0,5$, $\bar{s} = 1,0$.

Выводы

Даны аналитические формулы расчета скорости фильтрации, расхода дрены, градиентов фильтрационного потока во всей области фильтрации дренажа основания линейного гидротехнического сооружения. Наибольшее влияние на параметры фильтрационного потока оказывает соотношение проницаемостей осушаемого грунта и основания сооружения. При четырехкратном изменении соотношения проницаемостей осушаемого грунта и основания сооружения расход дрены изменяется на 15,6%. При четырехкратном изменении расстояния между дренажной и основанием сооружения расход дре-

ны изменяется только на 6,5%. Еще в меньшей степени на расход дрены влияет изменение ее радиуса. Влияние размеров основания и дренажа на параметры фильтрационного потока проявляется в наибольшей мере при минимальном расстоянии между ними.

Библиографический список

1. Аверьянов С.Ф. Горизонтальный дренаж при борьбе с засолением орошаемых земель: (Расчет). – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 84 с.
2. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория фильтрации грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Касьянов А.Е. Природоохранные технологии осушительных мелиораций: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2012. – 196 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.2016.

Сведения об авторе

Касьянов Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Мелиорация и рекультивация земель» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44; e-mail.ru.: kasian64@mail.ru, тел. 8(499)9763070.

A.E. KASIANOV

Federal state budget educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after K.A. Timiryazev», Moscow

CALCULATION OF DRAINAGE OF LINEAR HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURES

The problem of flat filtration to the drainage of the foundation of a linear hydraulic engineering structure is solved by methods of hydromechanics. The foundation of the hydraulic structure displays a semicircular inclusion in the field of filtration the permeability of which differs from the permeability of the drained soil. The drain is displayed by the dot runoff which capacity is equal to the specific drainage consumption. Methods of analytical continuation and the theorem of a circle are used. There are obtained dependences of parameters of drainage and foundation of the structure of characteristic functions of the filtration flow in the drained ground and foundation. In the analytical way dependences of filtration speeds, gradients of the filtration flow in all points of the filtration area are given. There is given a formula of calculation of the specific drainage consumption. The greatest influence on the drain consumption and parameters of the filtration flow is made by a correlation of permeability of the drained ground and foundation of the structures. The influence of sizes of the foundation and drainage on the parameters of the filtration flow is shown at the minimum distance between them.

Hydromechanical calculation of filtration, drainage, foundation of a linear hydraulic engineering structure, characteristic function of filtration flow, theorem of circle, analytical continuation of function, specific drainage consumption, speeds of filtration, gradient of filtration flow.

References

1. Averianov S.F. Gorizontalnyj drenazh pri borjbe s zasoloniem oroshaemyh zemelj: (Расчет). – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 84 с.
2. Polubarinova-Kochina P. Ya. Teoriya filjtratsii gruntovyh vod. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

3. Kasianov A.E. Prirodoohrannye tehnologii osushitel'nykh melioratsij: monografiya. – M.: FSBEI HE MSUEE, 2012. – 196 s.

The material was received at the editorial office
30.05.2016.

Information about the author

Kasianov Alexandr Evgenjevich, doctor of technical sciences, professor of the chair «Lands reclamation and recultivation» FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, d. 44; e-mail.ru.: kasian64@mail.ru, тел. 8(499)9763070.

УДК 502/504:69.035.4:539.31

Д.Т. БАУТДИНОВ, У.И. АТАБИЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ НАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

Проведен параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи напорного гидротехнического туннеля прямоугольной формы сечения от внутреннего напора воды, которые широко распространены в области гидротехнического строительства и являются одним из самых сложных, трудоемких и дорогих типов сооружений, входящих в состав основных сооружений гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения. Определены тангенциальные напряжения по контуру выработки гидротехнического туннеля при различных отношениях модулей деформаций и коэффициентов Пуассона, позволяющие оценивать прочность грунтового массива при различных глубинах заложения туннеля. Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком, трансверсально-изотропном скальном грунте, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Решение такой задачи невозможно аналитическими методами, поэтому анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип элемента, пригодного для расчета на основе решения тестовой задачи.

Трансверсально-изотропная среда, теория упругости, плоская деформация, модуль деформаций, коэффициент Пуассона.

Введение. Подземные гидротехнические сооружения широко распространены в области гидротехнического и мелиоративного строительства и одновременно являются одними из самых сложных и дорогих типов основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения.

Гидротехнические туннели глубокого заложения могут возводиться с обделкой и без неё, при проходке в слаботрещиноватых скальных неразмываемых грунтах. Применение гидротехнических туннелей без обделки позволяет снизить их стоимость на 20–30% и сократить сроки строительства на 10–15%.

При проектировании гидротехнических туннелей глубокого заложения, прохо-

дящих в анизотропных грунтах с отношением модулей деформаций в разных направлениях более чем 1,4, расчет следует проводить с учетом анизотропии [1].

По деформационности и прочности в различных направлениях массивы скальных грунтов следует считать изотропными при коэффициенте анизотропии не более 1,5. Под коэффициентом анизотропии понимают отношение большего значения характеристики к меньшему в двух заданных направлениях [2].

Эти требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с сильно выраженной анизотропией, модель изотропного тела неприменима.