

REFERENCES

1. Water Code of the Russian Federation dated June 3, 2006 № 74-FZ (edited on 08.08.2024, as amended and added, effective from 01.09.2024). Retrieved from <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477133&ysclid=m133wci0qg550605965>.
2. Slabunkova A.V., Surovkina A.P. On the problem of diffuse pollution of water bodies // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2020. № 2(38). P. 2.
3. Letuchy A.V. Landscape farming. Saratov: FGBNU HE Saratov GAU, 2016. P. 3, 14.
4. Rabochev I.S., Muromtsev N.S. Removal of nutrients by drainage waters // Hydraulic engineering and land reclamation. 1980. № 9. P. 78–80.
5. Patent of the Russian Federation № 2579259 C1, MPK E02H 11/00. Drainage well-absorber for receiving and draining surface water / A.A. Ksenzov. Priority on 02.02.2015; published on 04.10.2016. Bul. № 10.
6. Patent of the Russian Federation № 2714837 S1, MPK E02V 11/00. The drainage well is an absorber for receiving and diverting surface drainage water / M.I. Golubenko. Priority published on 19.02.2020. Bul. № 5.
7. Patent of the Russian Federation № 2 816 530 S1, MPK E02V 11/00. Method of draining flooded closed depressions / R.S. Masny, G.T. Balakai, A.N. Babichev, V.A. Monastyrsky, V.I. Olgarenko. Priority on 03.04.2023; published on 01.04.2024.
8. Patent of the Russian Federation № 2812424 C1, MPK E02V 11/00. Control method and device for local treatment of drainage drain / T.I. Drovovozova, A.A. Kirilenko. Priority on 10.02.2023, published on 30.01.2024. Bul. № 4.
9. Patent of the Russian Federation № 2725486 C1, MPK E02V 11/00. Method of construction of the drainage system / V.V. Pchelkin, Yu.N. Nikolsky, I.V. Korneev. Priority on 20.06.2019; published on 02.07.2020. Bul. № 19.
10. Bezborodov Yu.G., Bezborodov A.G. Irrigation of agricultural crops in the arid zone. M.: Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural University named after K.A. Timiryazeva, 2013, 545 p.
11. Patent of the Russian Federation № 2556732, MPK E02V 11/00. A method of draining mineral soils for the implementation of precision agriculture / A.A. Ksenzov. Priority on 06.06.2014; published on 20.10.2015. Bul. № 29.
12. Patent of the Russian Federation № 2655959 C1, MPK E02V 11/00. A method of pumping surface water into the ground / A. Nemchik. Priority on 06.27.2014; published on 05.30.2018. Bul. № 16.
13. Patent of the Russian Federation № 2728365, IPC. System of facilities for drainage drain treatment / V.K. Gubin, E.E. Golovinov, A.P. Solomina, E.B. Strelbitskaya, L.V. Kudryavtseva. Priority on 12.26.2019; published on 07.29.2020. Bul. № 22.
14. Patent of the Russian Federation № 2233075, IPC A01 G 25/00. Drainage and irrigation reclamation system / P.I. Pylenok, V.V. Borodychev, A.M. Saldaev. Priority on 12.02.2003, published on 27.07.2004. Bul. № 21.
15. Patent of the Russian Federation № 2076918, MPK E02V 11/00. Drainage system / V.I. Olgarenko, G.V. Olgarenko. Priority on June 17, 1994, published on April 20, 2002.
16. Av. St USSR № 1631121 A1, MPK E02V 11/00. Drainage and irrigation system / B.S. Maslov, E.I. Oparin. Priority on 12.09.1988; published on 28.02.1991. Bul. № 8.
17. Patent of the Russian Federation № 2663596. S2, MPK E02V 11/00. Drainage and irrigation system / Poddubsky A.A., Shuravilin A.V., Dokukin P.A., Gurina R.R., K.E. Kalajjyan. Priority on 20.12.2016; published on 07.08.2018. Bul. № 22.
18. Patent of the Russian Federation № 2758268 C1. MPK E02V 11/00. Drainage drain storage pond / V.K. Gubin, L.V. Kudryavtseva. Priority on 25.02.2021; published on 27.10.2021. Bul. № 30.
19. A.S. USSR № 896171, MPK E02V 11/00. Drainage and irrigation system / I.V. Minaev. Priority on 10.04.1979; published on 07.01.1982. Bul. № 1.
20. Minaev I.V., Voitovich A.M., Water circulation systems in land reclamation // Hydrotechnics and land reclamation. 1986. № 6. P. 36–42.
21. Borodychev V.V., Chrabrov M.Yu. Finely dispersed sprinkling irrigation of potatoes // Hydrotechnics and land reclamation. 1976. № 6. P. 75–77.
22. Patent of the Russian Federation № 2628341, MPK E02V 11/00. Drainage and irrigation system / V.K. Gubin, M.Yu. Khrabrov, V.P. Maksimenko, L.V. Kudryavtseva, A.P. Solomina, E.B. Strelbitskaya, I.N. Dorofeeva. Priority on 21.04.2016; published on 16.08.2017. Bul. № 23.
23. Patent of the Russian Federation № 2655799 S1, MPK E02V 11/00. Water circulation drainage and irrigation system / V.K. Gubin. Priority on 31.08.2017; published on 29.05.2018. Bul. № 16.
24. Patent of the Russian Federation № 2761875 S1, MPK E02V 11/00. A method of regulated soil hydromelioration in an agricultural landscape in a humid climate with intensive agriculture / L.P. Voronina, A.A. Ermakov, E.V. Morachevskaya, K.V. Pavlov. Priority on 06.12.2020; published on 13.12.2021.

Губин Владимир Константинович, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник, gubin.vladimir2011@yandex.ru; **Колесова Наталья Георгиевна**, ст. науч. сотрудник, natalia.kolesova.g@gmail.com (ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГИМ им. А.Н. Костякова»).

УДК 626-315.3

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-2-9-14

ФИЛЬТРАЦИЯ В НЕОДНОРОДНОМ ОСНОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО СЛОЖНЫМ ПОДЗЕМНЫМ КОНТУРОМ

А.Е. КАЧАЕВ, С.С. ТУРАПИН

Ключевые слова: фильтрация, потери напора, неоднородный грунт, флютебет, элемент, гидротехническое сооружение, плотина.

Keywords: filtration, pressure loss, heterogeneous soil, flutedbet, element, hydraulic structure, dam.

Аннотация. При анализе процесса фильтрации в неоднородном основании гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром определено, что во входном элементе изначально фильтрационный поток направлен перпендикулярно нижним слоям основания сооружения, затем постепенно отклоняется в сторону нижнего бьефа, при этом коэффициент фильтрации изменяется от k'_B до k'_T в выходном элементе фильтрационный поток в начале имеет горизонтальное направление, затем постепенно приближается к вертикальному, то есть — от k'_T до k'_B . Предложена схема к определению закономерности изменения коэффициента фильтрации, который во входном элементе зависит от направления потока относительно слоев подземного основания сооружения. Установлено, что при различных значениях k_{cp} во входном и выходном элементах и $k_{от}$ разницей между ними можно пренебречь. Получены выражения коэффициентов фильтрации в шпунтовом эле-

менте по горизонтальному и вертикальному направлению слоев основания. Установлены зависимости для расчета длин горизонтальных элементов, соответственно, для плоских оснований и оснований со шпунтовыми элементами. Получены выражения для определения предельных расчетных глубин неоднородного основания со сложным подземным контуром, соответственно для горизонтального и шпунтового элементов.

Abstract. When analyzing the filtration process in a heterogeneous foundation of hydraulic structures with a complex underground contour, it was determined that in the inlet element the filtration flow is initially directed perpendicular to the lower layers of the structure foundation, then gradually deviates towards the tailwater, while the filtration coefficient changes from k'_B to k'_T ; in the outlet element the filtration flow initially has a horizontal direction, then gradually approaches the vertical, that is, from k'_T to k'_B . A scheme is proposed for determining the pattern of change in the filtration coefficient, which in the inlet element depends on the direction of the flow relative to the layers of the underground foundation of the structure. It is found that for different values of k_{cp} in the inlet and outlet elements and $k_{от}$, the difference between them can be neglected. Expressions are obtained for the filtration coefficients in the

sheet pile element along the horizontal and vertical directions of the foundation layers. Dependencies are established for calculating the lengths of horizontal elements, respectively, for flat foundations and foundations with sheet pile elements. Expressions are obtained for determining the maximum design depths of a heterogeneous foundation with a complex underground contour, respectively for horizontal and sheet pile elements.

Введение. Эксплуатационные характеристики грунтовых плотин являются главным фактором рационального проектирования и оценки их технического состояния на протяжении всего их жизненного цикла. Вопросы эксплуатации гидротехнических сооружений, построенных насыпным или намывным способом, являются весьма актуальными в контексте растущего перечня объектов гидротехнического назначения, подлежащих капитальному ремонту или реконструкции. В этой связи все факторы, которые тем или иным образом снижают надежность и устойчивость элементов грунтовых плотин в процессе их эксплуатации, требуют изучения. Так, например, для обследования гидротехнических сооружений используются возможности информационного моделирования сооружений гидротехнического назначения. Создание цифровых моделей, или двойников, гидротехнических сооружений также поможет ответить на вопросы, связанные с фильтрацией влаги в основании сооружения сложной геометрии [1].

Одним из главных параметров, определяющих надежную эксплуатацию на протяжении всего жизненного цикла грунтовых плотин в мелиоративном хозяйстве, является фильтрационная способность грунтовых материалов, из которых она построена [2]. Параметрические особенности самого гидротехнического сооружения, характеристики грунтов, особенности рельефа, системы инженерных коммуникаций сооружения тоже влияют на надежность в процессе его эксплуатации. При этом все эти показатели связаны с фильтрацией, с ее стационарностью или нестационарностью [3].

Уникальность каждого сооружения из грунтовых материалов с целью подпора воды в водохранилищах для мелиоративных целей и рыбного хозяйства показывает особенности фильтрации в зависимости от всех вышеперечисленных параметров. Специфика устройства оснований таких сооружений с учетом особенностей грунтов требует специальных подходов к аналитическому и имитационному (информационному) моделированию процесса фильтрации в них. Особое внимание в аналитических исследованиях вопросов, связанных с фильтрационной способностью грунтовых плотин, надо уделить анизотропности грунтов [3] и конструктивному устройству основания таких сооружений [4, 5].

Зачастую сложный рельеф местности, на которой располагается плотина или предлагается к проектированию, накладывает на разработку проекта ряд сложностей, связанных одновременно и с геометрией и конструкцией сооружения, и с особенностями грунтов. Поэтому тема исследования, связанная с аналитическим расчетом фильтрации в неоднородном основании гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром, является весьма актуальной. Поставленный, таким образом, вопрос исследования позволит верифицировать информационные модели грунтовых плотин со сложным подземным контуром,

созданные в различных программных комплексах систем автоматизированного проектирования и расчета.

Целью исследования является разработка методики расчета фильтрации в неоднородном основании гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром.

Вопросами фильтрационной способности грунтовых плотин различной конструкции в нашей стране и за рубежом в разное время занимались: М.М. Гришин, Н.Н. Павловский, Л.Н. Рассказов, С.М. Слиссский, Р.Р. Чугаев, В.Г. Орехов, А.Н. Анискин, В.В. Толстиков, К.Дж. Салямова и др. В исследованиях [6–9] не рассматривался вопрос неоднородности основания (грунта) со сложной геометрией подземной части гидротехнического сооружения. Авторы исследования считают необходимым рассмотреть поставленный вопрос в исследовании на основе существующей теоретической базы расчета коэффициентов фильтрации для слоистых грунтовых структур и их неоднородности с учетом геометрических особенностей подземного контура плотины.

Методы и объект исследования. Для разработки методики расчета фильтрации в неоднородном основании гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром воспользуемся аналитическим подходом к исследованию. Такой подход связан с научным анализом имеющейся по данному вопросу исследования информации, которая позволит разобраться в сложных явлениях и процессах при фильтрации воды через основание плотины со сложной геометрией. Аналитический метод направлен на сбор, сравнение и интерпретацию данных с целью получения информации, установления закономерностей и понимания сути объекта исследования, которым является грунтовая плотина со сложным подземным контуром. Исследования авторов связаны с теоретическим обоснованием расчета процесса фильтрации в неоднородном основании грунтовой плотины, которая имеет сложный подземный контур.

Своего рода аналитическое моделирование процесса фильтрации для рассматриваемого гидротехнического сооружения позволяет создать схему модели, отражающую реальные процессы фильтрации в неоднородном основании плотины со сложным контуром. Объектом теоретического анализа процесса фильтрации в настоящем исследовании является грунтовая плотина со сложным подземным контуром (со шпунтовыми элементами).

Основная часть. Рассмотрим общую схему подземного контура сооружения (рис. 1). В основании сооружения залегает неоднородный грунт из различных по проницаемости слоев. Грунт в каждом слое однородный с коэффициентом фильтрации $k_{фи}$, толщина слоя d . Пользуясь методом коэффициентов сопротивления Р.Р. Чугаева [10] и применяя его к расчету ламинарного фильтрационного потока Н.Н. Павловского, записываем формулу для фильтрационного расхода в виде [11]:

$$q = \frac{H}{\lambda_{вх} + \sum \lambda_{Г} + \sum \lambda_{Ш} + \lambda_{вых}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{вх}$, $\lambda_{Г}$, $\lambda_{Ш}$, $\lambda_{вых}$ – сопротивления, соответственно, входного, горизонтального, шпунтового и выходного эле-

ментов основания. Коэффициенты определяются из соотношений:

$$\lambda_{вх} = \frac{c_{вх}}{k_{вх}}; \tag{2}$$

$$\lambda_{Г} = \frac{c_{Г}}{k_{Г}}; \tag{3}$$

$$\lambda_{шп} = \frac{c_{шп}}{k_{шп}}; \tag{4}$$

$$\lambda_{вых} = \frac{c_{вых}}{k_{вых}}; \tag{5}$$

где $c_{вх}$, $c_{Г}$, $c_{шп}$, $c_{вых}$ – коэффициенты (гидродинамического) сопротивления входного, горизонтального, шпунтового и выходного элементов; $k_{вх}$, $k_{Г}$, $k_{шп}$, $k_{вых}$ – коэффициенты фильтрации элементов. В общем случае в подземном контуре могут быть несколько горизонтальных и шпунтованных элементов.

Для численного определения приведенных выше сопротивляемостей рассмотрим схему плоского флюэта (рис. 2).

Формулу расхода (1) можно переписать в виде:

$$q = \frac{H}{\lambda'_{вх} + \lambda'_{Г} + \lambda'_{вых}}, \tag{6}$$

где $\lambda'_{вх}$, $\lambda'_{Г}$, $\lambda'_{вых}$ – сопротивляемости, соответственно, входного, горизонтального и выходного элементов без шпунтов.

Как известно, для водонасосного пласта, состоящего из горизонтальных слоев (рис. 1б), средний коэффициент фильтрации по горизонтальному направлению определяется по формуле [12]:

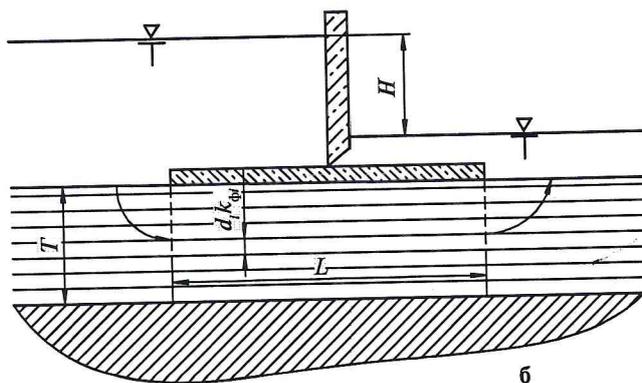
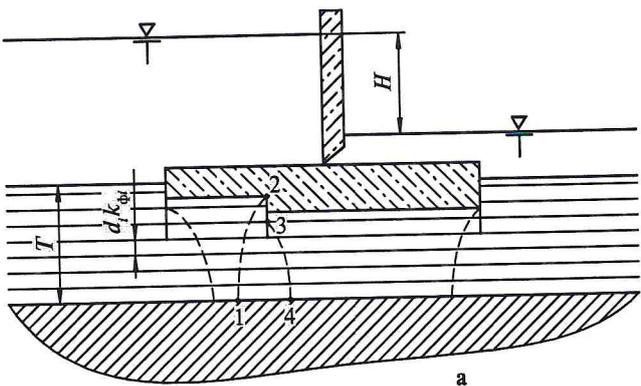


Рис. 1. Схема подземного контура: а – со шпунтом; б – без шпунта

$$k'_{Г} = \frac{\sum k_{\Phi i} d_i}{\sum d_i}. \tag{7}$$

Когда направление фильтрации перпендикулярно слоям (в данном случае – вертикальное), формула для среднего коэффициента фильтрации, отраженная в (7), будет иметь вид:

$$k'_{Г} = \frac{\sum d_i}{\sum \frac{d_i}{k_{\Phi i}}} = \frac{T}{\sum \frac{d_i}{k_{\Phi i}}}, \tag{8}$$

где T – толщина основания, состоящая из множества слоев $k_{\Phi i} d_i$, м.

Ясно, что только для области, находящейся непосредственно под сооружением, где фильтрационный поток горизонтальный можно принимать коэффициент фильтрации в зависимости от (3):

$$k_{Г} = k'_{Г} = \frac{\sum k_{\Phi i} d_i}{T}. \tag{9}$$

Естественно, формула (9) применима для фильтрационных расчетов горизонтальных элементов, показанных на рис. 1а. Формула (8) устанавливает основную зависимость различных показателей в фильтрации через неоднородный грунт.

Что касается входного и выходного элементов, то здесь, как указывалось выше, фильтрационный поток поворачивается на 90°. Во входном элементе он сначала направлен перпендикулярно нижним слоям, а далее постепенно отклоняется в сторону нижнего бьефа и становится параллельным осям, т. е. коэффициент фильтрации изменяется от $k'_{в}$ до $k'_{Г}$. В выходном элементе фильтрационный поток вначале имеет горизонтальное направление, затем постепенно приближается к вертикальному вверх. В этом элементе коэффициент фильтрации изменяется, наоборот, от $k'_{Г}$ до $k'_{в}$.

Эти изменения изображены на рис. 2, где коэффициент фильтрации во входном элементе зависит от направления потока относительно слоев от точки А до В, а в выходном элементе – от В до А. Закон изменения коэффициента фильтрации от А до В или в обратном направлении в данном случае не ясен, но он может быть изображен только выпуклой плавной кривой AMB или вогнутой плавной кривой ANB . В частности, возможна прямая линия AB .

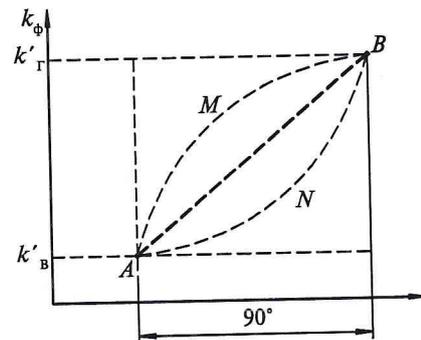


Рис. 2. Схема изменения коэффициентов фильтрации

Определить средний коэффициент фильтрации слоистого (анизотропного) грунта можно из выражения, близкого по смыслу (8):

$$k_{cp} = k'_Г = \frac{k'_Г + k'_В}{2}. \quad (10)$$

Устанавливаем при этом, что значение k_{cp} во входном и выходном элементах может быть либо $k_Г > k_{вх}$ (или) $\geq k_{cp}$; $k_{cp} > k_{вх}$ (или $k_{вых} > k_В$). Хотя коэффициенты фильтрации $k_{вх}$ и $k_{вых}$ могут быть больше или меньше k_{cp} , их разность невелика. Учитывая наличие других неточностей, которые нельзя избежать при вычислении коэффициентов фильтрации и толщины слоев, полагаем, что разность между k_{cp} и $k_{вх}$ (или $k_{вых}$) можно пренебречь.

Следовательно, коэффициент фильтрации во входном и выходном элементах можно принять равным друг другу на основании (10):

$$k_{вх} = k_{вых} = \frac{\sum \frac{d_i}{k_{\phi i}} (\sum k_{\phi i} d_i + T^2)}{T \sum \frac{d_i}{k_{\phi i}}}. \quad (11)$$

Из (9) и (11) закономерно следует, что в частном случае при $k_{\phi i} = k$ (случай однородного грунта) коэффициенты фильтрации оказываются равными $k_{вх} = k_{вых} = k_Г = k$. Для определения коэффициентов сопротивления заменим действительный грунт горизонтального элемента под сооружением однородным воображаемым грунтом, коэффициент фильтрации которого равен $k_{вх} = k_{вых}$.

Используя такой подход для сохранения неизменных величин расхода q , напора H и толщины T нужно заменить действительную длину флютбета L (рис. 16) виртуальной длиной $L_В$, определенной по формуле:

$$L_В = \frac{k_{вх}}{k_{вх}} L. \quad (12)$$

В результате получим воображаемое сооружение с коэффициентом фильтрации однородного грунта основания $k_{вх}$ и длиной флютбета $L_В$. В данном случае формулу для расхода можно записать в виде:

$$q = \frac{k_{вх} H}{0,44 + \frac{L_В}{T} + 0,44}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (12) в (13), получаем:

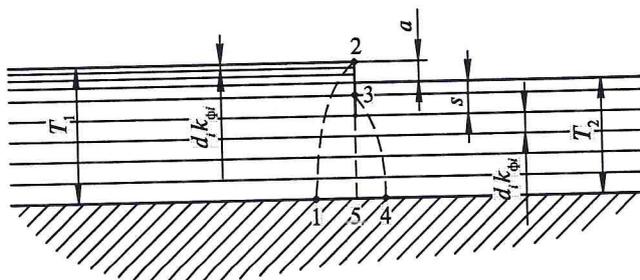


Рис. 3. Расчетная схема для установления коэффициента фильтрации шпунтового элемента

$$q = \frac{H}{\frac{0,44}{k_{вх}} + \frac{L_В}{T} + \frac{0,44}{k_{вх}}}. \quad (14)$$

Сопоставляя равенства (6) и (14), нетрудно определить коэффициенты сопротивления для плоского флютбета:

$$\zeta'_{вх} = \zeta'_{вых} = 0,44; \quad \zeta'_Г = \frac{L}{T}. \quad (15)$$

Для установления коэффициента фильтрации шпунтового элемента k_{III} рассмотрим расчетную схему на рис. 3, в которой $T_1 = T_2 + a$. Предположим, что в ленте T_2 имеются некоторые слои $k_{\phi i} d_i$, а в ленте $a = T_1 - T_2 - k_{\phi i} d_i$.

Итак, в области T_1 , находящейся слева от шпунта, коэффициент фильтрации, соответственно, по горизонтальному и вертикальному направлениям будет определяться из системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} k_Г'' = \frac{\sum k_{\phi i} d_i + k'_{\phi i} d'_i}{T_2 + a}; \\ k_В'' = \frac{T_2 + a \sum k_{\phi i} d_i + k'_{\phi i} d'_i}{\sum \frac{d_i}{k_{\phi i}} + \sum \frac{d'_i}{k'_{\phi i}}}. \end{cases} \quad (16)$$

В области T_2 , находящейся справа от шпунта, формулы для определения коэффициентов фильтрации имеют вид:

$$\begin{cases} k_Г''' = \frac{\sum k_{\phi i} d_i}{T_2}; \\ k_В''' = \frac{T_2}{\sum \frac{d_i}{k_{\phi i}}}. \end{cases} \quad (17)$$

Принимая толщину a незначительной по сравнению с T_1 и T_2 , части площади шпунтового элемента, расположенные слева и справа от шпунта 125 и 534 (рис. 3) можно считать равными.

Следовательно, коэффициенты фильтрации в шпунтовом элементе 1234 (рис. 3) по горизонтальному и вертикальному направлению будут определяться из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} k_Г''' = \frac{k_Г'' + k_Г'''}{2} = \frac{\sum k_{\phi i} d_i + k'_{\phi i} d'_i}{2(T_2 + a)} + \frac{\sum k_{\phi i} d_i}{2T_2}; \\ k_В''' = \frac{k_В'' + k_В'''}{2} = \frac{T_2 + a}{2 \left[\sum \frac{d_i}{k_{\phi i}} + \sum \frac{d'_i}{k'_{\phi i}} \right]} + \frac{T_2}{2 \sum \frac{d_i}{k_{\phi i}}}. \end{cases} \quad (18)$$

При $T_1 = T_2$ ($a = 0$)... $\sum \frac{d'_i}{k'_{\phi i}} = 0$, поэтому формула

(18) становится идентичной формуле (17).

Результаты и обсуждения. Рассматривая явление фильтрации в шпунтовом элементе, видим, что при $(s + a) / T_1 = 0$, т. е. при $s = a = 0$ (без уступа и шпун-

та), направление фильтрационного потока горизонтальное. Поэтому коэффициент фильтрации шпунтового элемента $k_{\text{ш}} = k_{\Gamma}^{\text{III}}$. В случае, когда соотношение $(s+a)/T_1$ приближается к единице (но не равно единице), т. е. $s+a \approx T_1$, фильтрационный поток имеет вертикальное направление (вниз в области слева от шпунта и вверх в области справа от шпунта). Тогда, естественно, $k_{\text{ш}} = k_{\text{в}}^{\text{III}}$.

Из предыдущего анализа ясно, что коэффициент фильтрации шпунтового элемента зависит от $(s+a)/T_1$ и изменяется от k_{Γ}^{III} при $(s+a)/T_1 = 0$ до $k_{\text{в}}^{\text{III}}$ при $(s+a)/T_1 = 1$. Учитывая это, можно найти коэффициент фильтрации шпунтового элемента по формуле:

$$k_{\text{ш}} = \left(k_{\text{в}}^{\text{III}} - k_{\Gamma}^{\text{III}}\right) \frac{s+a}{T_1} + k_{\Gamma}^{\text{III}}, \quad (19)$$

где k_{Γ}^{III} и $k_{\text{в}}^{\text{III}}$ определяются по выражению (18).

Зная значения сопротивляемостей λ_p , легко рассчитываем расход фильтрации в неоднородном основании по формуле (1).

Потери напора в соответствующих элементах подземного контура вычисляем по формулам [10]:

$$\begin{cases} h_{\text{вх}} = h_{\text{вых}} = \lambda_{\text{вх}} q = \frac{\zeta_{\text{вх}}}{k_{\text{вх}}} q; \\ h_{\Gamma} = \lambda_{\Gamma} q = \frac{\zeta_{\Gamma}}{k_{\Gamma}} q; \\ h_{\text{ш}} = \lambda_{\text{ш}} q = \frac{\zeta_{\text{ш}}}{k_{\text{ш}}} q. \end{cases} \quad (20)$$

Для определения предельной расчетной глубины T_p проницаемого основания по напору при расчете коэффициентов сопротивления горизонтальных и шпунтовых элементов ζ_{Γ} и $\zeta_{\text{ш}}$ заменим действительные элементы соответственно воображаемыми горизонтальными элементами плоского флотбета, находящегося над однородным основанием с коэффициентом фильтрации k'_{ϕ} и толщиной $T = T_p$. Пользуясь виртуальным способом, для сохранения неизменных величин расхода q и напора H получаем формулы для расчета виртуальных длин и воображаемых горизонтальных элементов, соответственно, для действительных и шпунтовых элементов в виде:

$$\begin{cases} L'_{\Gamma} = \frac{k'_{\phi}}{k_{\Gamma}} \zeta_{\Gamma} T_p; \\ L'_{\text{ш}} = \frac{k'_{\phi}}{k_{\text{ш}}} \zeta_{\text{ш}} T_p. \end{cases} \quad (21)$$

Используя понятие активной зоны фильтрации по напору [10], можно определить предельную расчетную глубину основания, соответственно, для горизонтального и шпунтового элементов:

$$\begin{cases} T_p^{\Gamma} = 0,5 L'_{\Gamma}; \\ T_p^{\text{ш}} = 0,5 L'_{\text{ш}}. \end{cases} \quad (22)$$

где L'_{Γ} и $L'_{\text{ш}}$ находим по формулам (21).

Так как величины $\zeta_{\text{вх}}$, ζ_{Γ} , $\zeta_{\text{ш}}$, $\zeta_{\text{вых}}$, k_{Γ} , $k_{\text{ш}}$ в формулах (21) зависят от T_p , необходимо установить T_p , ре-

шив уравнение (17). При определении расхода фильтрации по формуле (1) предполагается, что расчетный водоупор совпадает с действительным водоупором, т. е. $T_p = T$. Известно, что при больших действительных глубинах T величина расхода преувеличена, а при вычислении потери напора по формуле (20) использование расчетной глубины T_p по формуле (22) уместно только при $T_p \leq T$. В противном случае ($T < T_p$) расчетная глубина принимается равной действительной глубине.

Выводы. В процессе аналитического исследования цели настоящей работы можно заключить следующее. При анализе процесса фильтрации в неоднородном основании гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром определено, что во входном элементе изначально фильтрационный поток направлен перпендикулярно нижним слоям основания сооружения, затем постепенно отклоняется в сторону нижнего бьефа, при этом коэффициент фильтрации изменяется от $k'_{\text{в}}$ до k'_{Γ} ; в выходном элементе фильтрационный поток в начале имеет горизонтальное направление, затем постепенно приближается к вертикальному, то есть от k'_{Γ} до $k'_{\text{в}}$.

Предложена схема к определению закономерности изменения коэффициента фильтрации, который во входном элементе зависит от направления потока относительно слоев подземного основания сооружения. Установлено, что при различных значениях $k_{\text{ср}}$ во входном и выходном элементах и $k_{\text{вх}}$ разницей между ними можно пренебречь. Получены выражения коэффициентов фильтрации в шпунтовом элементе по горизонтальному и вертикальному направлению слоев основания.

Установлены зависимости для расчета длин горизонтальных элементов, соответственно, для плоских оснований и оснований со шпунтовыми элементами. Получены выражения для определения предельных расчетных глубин неоднородного основания со сложным подземным контуром, соответственно, для горизонтального и шпунтового элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- Скляренко В.О., Матюшенко П.С. Методика исследований фильтрации через основание грунтовой плотины с устройством противофильтрационных завес методом ЭГДА // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2018. № 2(70). С. 181–189.
- Ладенко С.Ю., Иванова Т.В., Абрамов Н.А. Признаки развития деструктивных процессов в теле и основании грунтовой плотины, связанные с изменением фильтрационного режима // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 297. С. 11–21.
- Мирсаидов М.М., Султанов Т.З., Юлдошев Б.Ш. Методы оценки напряженного состояния грунтовых плотин с учетом влажностных свойств грунта. Ташкент: Adabiyot uchqunlari, 2020. 156 с.
- Гидротехнические сооружения. Ч. 1: учебник для вузов. Изд. второе, испр. и доп. / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов, Н.А. Анискин, В.В. Малаханов, А.С. Бестужева, М.П. Саинов, П.В. Солдатов, В.В. Толстикова. М.: АСВ, 2011. 536 с.
- Ахмедов М.А., Салаямова К.Дж. Анализ и оценка поврежденных гидротехнических сооружений. Ташкент: Фан ва технология, 2016. 160 с.
- Орехов Г.В., Кыонт Ч. Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19(2). С. 281–293.
- Aniskin N.A., Sergeev F.A., Bokov I.A. Filtration and Temperature Regime of a Frozen-Type Soil Dam in the Cryolithozone // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20, No. 1. Pp. 143–153. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-143-153.

8. Салымова К.Д., Турдикулов Х.Х., Мифтахова И.Р. Расчет выскокой грунтовой плотины с учетом напряженного состояния и порового давления (с учетом данных натурных наблюдений) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 24–32. DOI: 10.34031/article_5d35d0b7694ea7.79490804

9. Анискин Н.А., Рассказов Л.Н., Ядгоров Е.Х. Фильтрация и поровое давление в ядре каменно-земляной плотины // Гидротехническое строительство. 2016. № 6. С. 16–22.

10. Чугаев Р.Р. Подземный контур гидротехнических сооружений. 2-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1974. 237 с.

11. Баламирзоев А.Г. Определение параметров для гидротехнических сооружений со сложным подземным контуром // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 2. С. 82–87.

12. Анискин Н.А., Сергеев С.А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 1. С. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1

REFERENCES

1. Sklyarenko E.O., Matyushenko P.S. Methodology for studying filtration through the base of an earth dam with the device of anti-filtration curtains using the EGDA method // Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture. 2018. No. 2 (70). Pp. 181–189.

2. Ladenko S.Yu., Ivanova T.V., Abramov N.A. Signs of the development of destructive processes in the body and base of an earth dam associated with a change in the filtration regime // Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev. 2020. Vol. 297. Pp. 11–21.

3. Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Yuldoshev B.Sh. Methods for assessing the stress state of earth dams taking into account the moisture properties of the soil. Tashkent: Adabiyot uchqunlari, 2020. 156 p.

4. Hydraulic structures. Part 1: textbook for universities. Second edition, revised and supplemented / L.N. Rasskazov, V.G. Orekhov,

N.A. Aniskina, V.V. Malakhanov, A.S. Bestuzheva, M.P. Sainov, P.V. Soldatov, V.V. Tolstikov. M.: ASV, 2011. 536 p.

5. Akhmedov M.A., Salyamova K.J. Analysis and assessment of damage to hydraulic structures. Tashkent: Fan va technology, 2016. 160 p.

6. Orekhov G.V., Kyong C. Analysis of filtration through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using the PLAXIS 2D program // Bulletin of MGSU. 2024. Vol. 19(2). Pp. 281–293.

7. Aniskina N.A., Sergeev F.A., Bokov I.A. Filtration and Temperature Regime of a Frozen-Type Soil Dam in the Cryolithozone // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20, No. 1. Pp. 143–153. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-143-153.

8. Salyamova K.D., Turdikulov H.Kh., Miftakhova I.R. Calculation of a high earth dam taking into account the stress state and pore pressure (taking into account field observations) // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 24–32. DOI: 10.34031/article_5d35d0b7694ea7.79490804

9. Aniskina N.A., Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh. Filtration and pore pressure in the core of a rock-earth dam // Hydrotechnical construction. 2016. No. 6. Pp. 16–22.

10. Chugaev R.R. Underground contour of hydraulic structures. 2nd edition, revised. L.: Energia, 1974. 237 p.

11. Balamirzoev A.G. Determination of parameters for hydraulic structures with a complex underground contour // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences. 2003. No. 2. Pp. 82–87.

12. Aniskina N.A., Sergeev S.A. Stability of the slope of an earth dam during reservoir depletion // Construction: science and education. 2022. Vol. 12. Issue 3. Article 1. Pp. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1

Качаев Александр Евгеньевич, науч. сотрудник отдела сельхозводоснабжения, doctor_cement@mail.ru; **Турапин Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, врио директора, praduga@yandex.ru (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Московская обл. г. Коломна)

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-2-14-20

УДК 504.53.06:631.6.02

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИАЗОТРОФОВ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ

С.А. МАКСИМОВ, Е.Б. СТРЕЛЬБИЦКАЯ, И.А. РЕМЕЗ

Ключевые слова: ризосферные микроорганизмы, diazotrophs, ассоциативная азотфиксация, взаимодействие diazotrophs с растениями, математическое моделирование.

Keywords: rhizosphere microorganisms, diazotrophs, associative nitrogen fixation, interaction of diazotrophs with plants, mathematical modeling.

Аннотация. В статье рассматривается необходимость использования уникальной способности ризосферных микроорганизмов фиксировать атмосферный азот и являться источником биологического азота для сельскохозяйственных растений. Проанализированы имеющиеся данные о механизмах ассоциативной азотфиксации, масштабах и значении этого процесса при микробно-растительных взаимоотношениях. Детально изучены и систематизированы факторы, оказывающие существенное влияние на процесс азотфиксации и определяющие активность деятельности ассоциативных diazotrophs, эффективность всего процесса азотфиксации. Представлена функциональная схема растительно-микробных взаимодействий в почве, раскрывающая основные механизмы этого процесса, а также схема комплекса математических моделей микробиологических процессов для описания биогеохимической трансформации, накопления или расходования веществ в почве. Исследования закономерностей и особенностей взаимодействия diazotrophs с растениями, моделирование и анализ изменений количественных показателей их развития под влиянием различных факторов, включение алгоритмов этих моделей в комплексные модели продуктивности агроэкосистем позволяют более грамотно и обоснованно подходить к планированию мелиоративных режимов, разработке агробиологических технологий и регулированию почвенного плодородия на мелиорируемых землях.

Annotation. The article discusses the need to use the unique ability of rhizosphere microorganisms to fix atmospheric nitrogen and be a source of biological nitrogen for agricultural plants. The available data on the mechanisms of associative nitrogen fixation, the scale and significance of this process in microbial-plant relationships are analyzed. The factors that have a significant impact on the process of nitrogen fixation and determine the activity of associative diazotrophs, the efficiency of the entire process of nitrogen fixation are studied in detail and systematized. A functional scheme of plant-microbial interactions in the soil is presented, revealing the main mechanisms of this process, as well as a scheme of a complex of mathematical models of microbiological processes to describe biogeochemical transformation, accumulation or consumption of substances in the soil. Research into the patterns and characteristics of interactions between diazotrophs and plants, modeling and analysis of changes in quantitative indicators of their development under the influence of various factors, and the inclusion of algorithms of these models in complex models of agroecosystem productivity will allow for a more competent and reasoned approach to planning melioration regimes, developing agrobiological technologies, and regulating soil fertility on reclaimed lands.

Введение. В современных условиях развития сельского хозяйства России при широком использовании адаптивно-ландшафтных систем земледелия неизменно растет интерес к дополнительным источникам элементов питания растений, особенно азотного [1]. Величина урожаев сельскохозяйственных культур, наряду с другими лимитирующими факторами, в зна-