УДК 626.86

© В. М. Марголин, доцент
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет)
E-mail: vlad-margolin@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-92-97

© V. M. Margolin, Associate Professor
(National Research Moscow State University
of Civil Engineering)
E-mail: vlad-margolin@yandex.ru

УЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ В РАСЧЕТАХ ЛИНЕЙНО ПРОТЯЖЕННЫХ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОВЕРШЕННОГО ТИПА, ВОЗВОДИМЫХ МЕТОДОМ «СТЕНА В ГРУНТЕ»

TAKING ACCOUNT OF INITIAL FILTRATION GRADIENT IN CALCULATING LINEAR- EXTENSIVE IMPERVIOUS STRUCTURES ERECTED BY THE "WALL IN TRENCH" CONSTRUCTION METHOD

Рассматривается метод расчета основных конструктивных параметров линейно протяженных противофильтрационных конструкций совершенного типа «стенки» с учетом начального градиента фильтрации материала заполнителя. Показано, что решающим параметром в расчетах водопроницаемости «стенки» является величина начального градиента фильтрации, а не коэффициент фильтрации, как это принято в нормативных документах. Эти конструкции используются для локального снижения уровня грунтовых вод в пределах ограждаемого контура (котлована) взамен традиционных способов для защиты от подтопления карьеров, защиты окружающей среды от вредных стоков со шламонакопителей и др. Существующая методика расчета, изложенная в нормативных документах, не учитывает величину начального градиента, что сказывается на назначении конструктивных параметров «стенки». Учет начального коэффициента фильтрации позволяет повысить точность расчетов противофильтрационных конструкций.

Ключевые слова: противофильтрационные конструкции, метод «стена в грунте», начальный градиент фильтрации.

The article discusses a method of calculating the basic design parameters of linearly-extended impervious constructions of the perfect watertight «wall» type with account of the initial filtration gradient of the filler material. It is shown that the crucial point in the calculation of permeability to water of the «wall» is the value of the initial gradient of filtration, and not the filter coefficient, as it is customary in the normative documents. These structures are used to locally reduce the groundwater levels within the enclosed contour (namely, construction pit) instead of using traditional methods of protection from flooding of the quarries or the environment from harmful effluent from the tailings pond. The existing calculation method contained in the normative documents, does not take into account the value of the initial gradient, which affects the assignment of «the wall» structural parameters. The initial filtration coefficient allows improving the accuracy of the calculation of membrane structures.

Keywords: membrane structures; the «wall in trench» method, initial gradient of filtration.

Введение

Предлагаемая методика расчета, в отличие от существующих нормативных документов [1, 2], учитывает начальный порог фильтрации материала заполнителя «стенки». Фильтрация воды через «стенку» происходит только после преодоления этого порога, когда избыточный градиент превысит начальный градиент фильтрации материала «стенки», после преодоления

которого начнется фильтрация воды. В [1, 2] материал характеризуется только коэффициентом фильтрации, что явно недостаточно. Вопрос о нелинейном характере фильтрации воды в малопроницаемых грунтах с учетом начального градиента фильтрации исследовали в своих работах П. Г. Карман, Б. В. Дерягин, С. А. Роза, С. В. Нерпин, Б. П. Горбунов, М. Ю. Абелев и др. Автор при решении инженерной задачи расчета проти-

вофильтрационных сооружений использует аналогичный подход.

Вопросам использования противофильтрационных конструкций в различных инженерных целях посвящены многочисленные работы [6–13]. В них затрагиваются вопросы совершенствования технологии, исследования параметров продвижения грунтовых вод в окрестностях противофильтрационной завесы, факторы, влияющие на технологические и фильтрационные показатели заполнителей, их состав, анализ способов и проблем возведения этих конструкций при освоении подземного пространства.

Цель исследования

Автор в данной работе предлагает метод расчета основных параметров противофильтрационного сооружения, основываясь на нелинейном характере фильтрации воды через «стенку». Ранее, используя это положение, автором предложен метод определения основных параметров конструкции «стенки» в условиях плоскорадиальной одномерной фильтрации [3]. Одним из существенных моментов предлагаемого способа расчета является то, что в оценке водопроницаемости материала заполнителя, поры которого заполнены связанной водой, решающим показателем водопроницаемости «стенки» является величина начального градиента фильтрации, а не коэффициент фильтрации.

С учетом вышеизложенного приводится теоретическое обоснование способа расчета основных параметров конструкции «стенки» и распределение напоров в материале-заполнителе и перед «стенкой» в условиях плоскопараллельной одномерной фильтрации.

Исследование

Рассмотрим наиболее часто используемый в практике строительства случай в условиях плоскопараллельной одномерной фильтрации для «стенки» совершенного типа с заглублением в водоупор. Получены расчетные зависимости с учетом начального градиента фильтрации и характеристик материала-заполнителя по определению скорости потока, распределения напоров перед «стенкой» и в ее материале, ширины «стенки». Если пренебречь значением начального градиента фильтрации, то результат расчета по полученным формулам для частного случая водопритока через совершенную контурную

«стенку» совпадет со значениями, полученными по формулам в нормативном документе [1, 2].

Расчетная схема решения задачи представлена на рис. 1.

При решении задачи приняты следующие условные обозначения:

H_0 — статический напор (отсчитывается от условной плоскости водоупора); $H_{(b)}$ — напор в сечении перед «стенкой»; $H_{(y)}$ — распределение напора в материале «стенки»; $\tilde{H}_{(y)}$ — то же в массиве грунта перед «стенкой»; h_0 — напор в массиве грунта, оконтуренном вокруг котлована «стенкой», в момент завершения водопонижительных работ; d — расстояние от поверхности грунта до статического уровня; Π — периметр «стенки» вокруг котлована; L — расстояние от внутренней грани «стенки» до точки, где $\tilde{H}_{(y)} = H_0$; b — ширина «стенки»; K, K_1 — коэффициенты фильтрации материала заполнителя «стенки» и грунта; i_0 — начальный градиент фильтрации материала заполнителя «стенки»; $V_{x(i)}, V_x$ — соответственно скорости фильтрации в массиве грунта и в материале «стенки»; q — фильтрационный расход на единицу длины контура «стенки»; Q — общий расход профильтровавшейся воды в массив, оконтуренный «стенкой»; r — расстояние от «стенки» до центра котлована.

Общий расход профильтровавшейся воды в массив, оконтуренный «стенкой», будет равен:

$$Q = q \Pi, \quad (1)$$

где q — единичный расход, профильтровавшийся через «стенку», определяется как

$$q = h_i V_x. \quad (2)$$

Скорость фильтрации через «стенку» определим из следующих уравнений:

а) общего уравнения скорости в случае плоской одномерной фильтрации:

$$\text{при } \frac{dH}{dx} \geq i_0 \quad V_x = -K \left(\frac{dH}{dx} - i_0 \right), \quad (3)$$

$$\text{а при } \frac{dH}{dx} < i_0 \quad V_x = 0;$$

б) уравнения неразрывности потока:

$$\frac{d}{dx} (H \cdot V_x) = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) с учетом (3) будет иметь вид:

$$\frac{d}{dx} \left[H \cdot K \left(\frac{dH}{dx} - i_0 \right) \right] = 0. \quad (5)$$

Рис. 1. Расчетная схема

Интегрируя уравнение (5) по x , получим распределение напора в материале «стенки»:

$$H \cdot K \left(\frac{dH}{dx} - i_0 \right) = C_1, \quad (6)$$

где C_1 — постоянная интегрирования,

Определим единичный водоприток, профильтровавшийся через тело «стенки», согласно (2), (3), (6):

$$q = H_{(b)} \cdot |V_{x(b)}| = H_{(b)} \frac{K \cdot C_1}{H_{(b)}} = KC_1. \quad (6a)$$

Постоянную интегрирования C_1 определим с учетом (6), и после разделения переменных получим

$$\frac{dH}{i_0} - \frac{C_1 \cdot dH}{i_0(i_0 H + C_1)} = dx. \quad (7)$$

Интеграл этого уравнения в указанных пределах будет:

$$\int_{h_0}^H \frac{dY}{i_0} - \int_{h_0}^H \frac{C_1 \cdot dY}{i_0(i_0 Y + C_1)} = \int_0^x dE, \quad (8)$$

откуда уравнение для C_1 будет иметь вид:

$$\frac{H-h_0}{i_0} - \frac{C_1}{i_0^2} \ln \frac{i_0 H + C_1}{i_0 + C_1} = x. \quad (9)$$

Полагая в уравнении (9) $x = b$, получим соотношение напора в сечении перед «стенкой» $H_{(b)}$ и C_1 :

$$\frac{H_{(b)} - h_0}{i_0} - \frac{C_1}{i_0^2} \ln \frac{i_0 H_{(b)} + C_1}{i_0 + C_1} = b. \quad (10)$$

Для определения $H_{(b)}$ необходимо найти распределение напора в массиве грунта перед «стенкой». Уравнение (5) с учетом $j_0 = 0$ примет вид:

$$\frac{d^2 \tilde{H}_{(i)}^2}{dx^2} = 0. \quad (11)$$

Распределение напора в массиве грунта перед «стенкой» определим интегрированием (11) с начальным условием $\tilde{H}_{(i)} = H_0$:

$$\tilde{H}_{(i)}^2 = C_1'(X-L) + H_0^2. \quad (12)$$

Выразим C_1' через C_1 , для этого воспользуемся равенством потоков $q = q'$ в сечении $x = b$:

$$q = K \cdot C_1 = \tilde{H}_{(b)} \cdot K_1 \frac{d\tilde{H}_{(f)}}{dx} = K_1 \frac{C'_1}{2}, \quad (13)$$

откуда:

$$C_1' = 2 \frac{K}{K_1} C_1. \quad (14)$$

Подставляя значение C_1' из (14) в (12) и полагая $x = b$, получим величину напора в точке входа в тело «стенки»:

$$H_{(b)} = \sqrt{2 \frac{K}{K_1} C_1 (b-L) + H_0^2}. \quad (15)$$

При $x = b$, $H = H_{(b)}$, подставляя в (10) значение $\tilde{H}_{(b)}$ из уравнения (15), получим окончательное уравнение для b :

$$b = \frac{\sqrt{H_0^2 - \frac{2K}{K_1} C_1(L-b) - h_0}}{i_0} - \frac{C_1}{i_0^2} \ln \frac{i_0 \sqrt{H_0^2 - \frac{2K}{K_1} C_1(L-b) + C_1}}{i_0 h_0 + C_1}. \quad (16)$$

Значение b определим из трансцендентного уравнения (16), которое представим в виде:

$$b = \frac{Y - h_0}{i_0} - \frac{C_1}{i_0^2} \ln \frac{i_0 Y + C_1}{i_0 h_0 + C_1}, \quad (17)$$

$$\text{где } Y = \sqrt{H_0^2 - \frac{2K}{K_1} C_1 (L-b)}. \quad (18)$$

Единичный водоприток будет равен:

$$q = KC_1. \quad (19)$$

Полученные зависимости (15)–(19) с учетом начального градиента фильтрации материала-заполнителя для расчета совершенного типа «стенки», прорезающей водонасыщенный пласт с заглублением в водоупор, позволяют определить распределения напора перед «стенкой» и в ее материале, определить водоприток в котлован, толщину конструкции «стенки». Если пренебрегать значениями начального градиента ($i_0 = 0$), то полученные решения совпадают с методикой расчета [1, 2]. Но следует отметить, что пренебрегать ими нельзя. На этот факт обращают внимание многие исследователи. Если водоприток определяется с пренебрежением начального градиента фильтрации материала-заполнителя, то погрешность в его определении значительно возрастает. Иными словами, с увеличением толщины «стенки» и значения начального градиента фильтрации материала-заполнителя, а также высоты потока в массиве грунта относительно водоупора и убывания разности напоров (статического и пониженного) возрастает погрешность в определении величины притока воды в котлован, оконтуренный «стенкой».

Количественная оценка указанных погрешностей и факторов, оказывающих влияние на ее величину, подробно изложена в [4] на примере расчета совершенного типа «стенки» с заглублением в водоупор (в условиях плоскорадиальной фильтрации). Для иллюстрации приведем один из примеров исследования. Изменение значений

водопритока и величины погрешности $\Delta = q - q^1$ (где q, q^1 — соответственно расход на единицу длины контура «стенки» с учетом и без учета i_0), которые даны в процентах P от величины единичного водопритока, вычисленного с учетом i_0 , приведены на рис. 2.

Выводы

1. Получены зависимости (15)–(19) с учетом начального градиента фильтрации материала-заполнителя для расчета совершенного типа «стенки», позволяющие найти основные параметры распределения напора перед «стенкой» и в ее материале, определить водоприток в котлован, толщину противофильтрационной конструкции, толщину конструкции «стенки».

2. Пренебрегать значением начального градиента фильтрации материала-заполнителя в инженерных расчетах некорректно, поскольку это приводит к завышению конструктивных размеров «стенки», погрешностям в определении напора перед «стенкой», принятию завышенных характеристик материала-заполнителя и величины водопритока в ограждаемый контур (котлован).

3. Дана количественная оценка результатов расчета с учетом и без учета влияния i_0 на величину водопритока, погрешностей и факторов, оказывающих влияние на величину водопритока, которые даны в процентах от величины единичного водопритока, вычисленного с учетом i_0 .

4. Для использования полученных результатов в инженерных расчетах разработана программа на ЭВМ.

Рис. 2. Количественная оценка погрешности P в процентах от величины единичного водопритока, вычисленного с учетом i_0 (цифра с индексом — нижняя граница, без индекса — верхняя граница значений интервала погрешности; $H = H_0 - h_0 = 5$ м; $h_0 = 7$ м)

5. Результаты расчета по полученным зависимостям без учета начального градиента фильтрации ($i_0 = 0$) совпадают с методикой расчета [1, 2].

Библиографический список

1. СН-477–75. Временная инструкция по проектированию стен сооружений и противофильтрационных завес, устраиваемых способом «стена в грунте». М.: Стройиздат, 1976.
2. Руководство по проектированию стен сооружений и противофильтрационных завес, устраиваемых способом «стена в грунте». М.: Стройиздат, 1977.
3. Марголин В. М. Метод расчета противофильтрационных конструкций с учетом начального градиента фильтрации // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 4–5. С. 37–42.
4. Марголин В. М. Определение погрешностей в расчетах при проектировании противофильтрационных конструкций, сооружаемых методом «стена в грунте», и рекомендации по их совершенствованию // Труды междунар. конф. «Подземный город, геотехнология и архитектура». СПб., 1998. С. 275–280.
5. Марголин В. М. Проектирование эффективных противофильтрационных конструкций, устраиваемых способом «стена в грунте» // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 67–70.
6. Лазарев С. А., Кузнецов С. В. Анализ способов возведения противофильтрационных завес методом «стена в грунте» // Научная мысль. 2015. № 2. С. 220–223.
7. Пермяков М. Б., Тимофеев С. В. Совершенствование технологии устройства противофильтрационных завес способом «стена в грунте» // Архитектура, строительство, образование. 2013. № 2. С. 129–138.
8. Пономаренко Ю. В., Изотов А. А. Проблемы сооружения противофильтрационных завес и «стен в грунте» при освоении подземного пространства на городских подтопленных территориях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 43–45.
9. Ахмедова Н. Р., Ведяшкин А. С. Методика параметров продвижения грунтовых вод в окрестностях противофильтрационной завесы // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2009. № 2. С. 268–272.
10. Саинов М. П. Пространственная работа противофильтрационной стены // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 20–33.
11. Собкалов Ф. П. Про фильтрационные элементы из пластичных и твердеющих материалов, созданных на основе местных низкосортных глин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института им. Б. Е. Веденеева. 2013. Т. 270. С. 67–76.

12. Kenwright J., Dickson R. A., and Fernie R. Structural movement and ground settlement control for a deep excavation within a historic building // Proc. DFI Conference, 2000, Eaglewood Cliffs, New Jersey.

13. Guillaud M., Hamelin J. P. Innovations in diaphragm construction plants // Proc. DFI Conference, Nice, 2002, Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées, Paris. 3–8.

14. Borshchevskiy S. V., Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Kulazhenko Ye. Yu., Kulazhenko O. M. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «slurry wall» for shallow subway stations // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 6 (54). С. 154–163.

15. Alla M. Technological aspects of building round foundations by method «wall in soil» // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2009. № 1 (6). С. 90–91.

16. Factors affecting the technological and filtration calculations are the indices of the fillers of the anti-filtration curtains // Science and safety. 2016. Vol. 1 (19). Pp. 63–67.

17. Permyakov M. B., Davydov A. M. et al. Research of technology of erection of underground constructions and anti-filtration veils // Science and safety. 2015. Vol. 4 (17). Pp. 28–43.

18. Zong D., Liu J., Xiao E., Chen Z. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage control. Part II. Innovation and applications // Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering. 2016. 47 (4). Pp. 483–492.

19. Sealing technique for water leakage of diaphragm wall under complex geological conditions // Modern Tunneling Technology. 2014. 51. Pp. 501–506.

References

1. SN-477–75. Vremennaya instruktsiya po proektirovaniyu sten sooruzheniy i protivofil'tratsionnykh zavес, ustraivaemykh sposobom «stena v grunte» [Temporary instruction for design of walls of the constructions and membrane structures arranged as a «wall in trench»]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976.
2. Rukovodstvo po proektirovaniyu sten sooruzheniy i protivofil'tratsionnykh zavес, ustraivaemykh sposobom «stena v grunte» [Instruction to design the walls of constructions and membrane structures arranged as a «wall in trench»]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977.
3. Margolin V. M. Metod rascheta protivofil'tratsionnykh konstruktсий s uchetom nachal'nogo gradiєnta fil'tratsii [Calculation method for anti-filtration designs taking into account the initial gradient of filtration]. Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov – Bases, foundations, and mechanics of soil, 1998, no. 4–5, pp. 37–42.

4. Margolin V. M. *Opredelenie pogreshnostey v raschetakh pri projektirovanii protivofil'tratsionnykh konstruktsey, sooruzhaemykh metodom «stena v grunte», i rekomendatsii po ikh sovershenstvovaniyu* [Evaluation of errors in calculations at design of the membrane structures constructed by the "wall in trench" method and recommendations about their improvement]. *Trudy mezhdunar. konf. «Podzemnyy gorod, geotekhnologiya i arkhitektura»* [Proc. of the Int. conf. "The underground city, geo-technology and architecture"]. St. Petersburg, 1998, pp. 275–280.
5. Margolin V. M. *Projektirovanie ehffektivnykh protivofil'tratsionnykh konstruktsey, ustraivaemykh sposobom «stena v grunte»* [Design of the effective anti-filtration designs arranged as "wall in trench"]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2015, no. 8, pp. 67–70.
6. Lazarev S. A., Kuznetsov S. V. *Analiz sposobov vozvedeniya protivofil'tratsionnykh zaves metodom «stena v grunte»* [Analysis of ways of construction of anti-filtration structures by the "wall in trench" method]. *Nauchnaya mysl' – Scientific Thought*, 2015, no. 2, pp. 220–223.
7. Permyakov M. B., Timofeev S. V. *Sovershenstvovanie tekhnologii ustroystva protivofil'tratsionnykh zaves sposobom «stena v grunte»* [Improvement of the technology of design of membrane structures erected by the "wall in trench" method]. *Arkhitektura, stroitel'stvo, obrazovanie – Architecture, construction, education*, 2013, no. 2, pp. 129–138.
8. Ponomarenko Yu. V., Izotov A. A. *Problemy sooruzheniya protivofil'tratsionnykh zaves i «sten v grunte» pri osvoenii podzemnogo prostranstva na gorodskikh podtoplennykh territoriyakh* [Problems of building membrane structures as "walls in trench" at development of underground space on the urban flooded territories]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2014, no. 1, pp. 43–45.
9. Akhmedova N. R., Vedyashkin A. S. *Metodika parametrov prodvizheniya gruntovykh vod v okrestnostyakh protivofil'tratsionnoy zavesy* [A technique of parameters of removing waters from the anti-filtration structure neighborhood]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki – News of the Tula state university. Natural science*, 2009, no. 2, pp. 268–272.
10. Sainov M. P. *Prostranstvennaya rabota protivofil'tratsionnoy steny* [Spatial performance of the slurry wall]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering Construction Journal*, 2015, no. 5 (57), pp. 20–33.
11. Sobkalov F. P. *Pro fil'tratsionnye ehlementy iz plastichnykh i tverdeyushchikh materialov, sozdannykh na osnove mestnykh nizkosortnykh glin* [About filtration elements from plastic and hardening materials created on the basis of local low-grade clays]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. B. E. Vedeneeva – News of the All-Russian Research Institute named after B. E. Vedenev*, 2013, vol. 270, pp. 67–76.
12. Kenwright J., Dickson R. A., Fernie R. *Structural movement and ground settlement control for a deep excavation within a historic building*. Proc. DFI Conference, 2000, Eaglewood Cliffs Publ., New Jersey.
13. Guillaud M., Hamelin J. P. *Innovations in diaphragm construction plants*. Proc. DFI Conference, Nice, 2002, pp. 3–8. Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées Publ., Paris.
14. Borschchevskiy S. V., et al. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «slurry wall» for shallow subways' stations. *Nauka ta progres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 6 (54), pp. 154–163.
15. Alla M. Technological aspects of building round foundations by the "wall in trench" method. *Suchasnikhnologii, materiali i konstruktii v budivnitstvi*, 2009, no. 1 (6), pp. 90–91.
16. Factors affecting the technological and filtration calculations are the indices of the fillers of the anti-filtration curtains. *Science and safety*, 2016, vol. 1 (19), pp. 63–67.
17. Permyakov M. B., Davydov A. M., et al. Research of technology of erection of underground constructions and anti-filtration veils. *Science and safety*, 2015, vol. 4 (17), pp. 28–43.
18. Zong D., Liu J., Xiao E., Chen Z. 60 years perspective of the diaphragm wall technology for seepage control. Part II. Innovation and applications. *Shuili Xuebao – Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, no. 47 (4), pp. 483–492.
19. Sealing technique for water leakage of diaphragm wall under complex geological conditions. *Modern Tunneling Technology*, 2014, no. 51, pp. 501–506.