

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-13>  
 УДК 627.13:51

В.А. Шаланин, К.И. Патлай

ШАЛАНИН ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ – старший преподаватель,  
 e-mail: vic\_stro\_@mail.ru  
 ПАТЛАЙ КИРИЛЛ ИГОРЕВИЧ – магистрант, e-mail: patlayuuu@mail.ru  
 Кафедра инженерных систем зданий и сооружений Инженерной школы  
 Дальневосточный федеральный университет  
 Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

## Численное моделирование фильтрации грунтовых вод через прямоугольную перемычку из однородного грунта на водонепроницаемом основании

**Аннотация:** В настоящее время в практике гидротехнического строительства для фильтрационных расчетов применяют современные методы численного моделирования. В предлагаемой статье выполнено моделирование фильтрации грунтовых вод через однородную земляную перемычку с вертикальными откосами, расположенную на непроницаемом основании. При помощи программного комплекса для гидродинамических расчетов GEO-SLOPE GeoStudio определены основные характеристики фильтрационного потока и построены кривые депрессии. Для подтверждения достоверности полученные результаты были сопоставлены с рассчитанными по апробированной методике. В выводе приведены рекомендации по использованию граничных условий для получения более высокой точности моделирования.

**Ключевые слова:** фильтрация грунтовых вод, промежуток высачивания, кривая депрессии, валидация численного метода.

### Введение

Земляные плотины получили широкое распространение в практике гидротехнического строительства благодаря простоте конструкции, долговечности и низкой стоимости возведения. Они, в частности, предназначены для концентрации напора в месте расположения сооружения, для создания водохранилищ, обеспечения судоходных глубин, ирригации, обводнения земель, регулирования стока речных вод для водоснабжения, т.е. для хозяйственных, энергетических и рекреационных целей [4].

По конструкции поперечного профиля самой простой является перемычка с вертикальными откосами, выполненная из однородного грунта. Лучшими материалами для однородных земляных плотин считаются суглинки, супеси, песчаные и песчано-гравелистые грунты [7].

Для расчета нормальной и казуальной прочности земляной плотины, общей устойчивости откосов и проектирования элементов поперечного профиля выполняют фильтрационный расчет. Целью фильтрационного расчета является определение: а) фильтрационного расхода воды, просачивающейся через тело плотины; б) положения депрессионной кривой [5].

В случае однородной плотины фильтрация грунтовых вод осуществляется непосредственно через ее тело. При этом весьма актуальным остается определение точки выхода кривой депрессии в нижний бьеф, которая влияет на «выходную глубину» фильтрационного потока. Подобную гидравлическую задачу можно решить, задавая либо гидравлический напор

на выходе из плотины, либо гидравлический уклон. Важным аспектом является установление величины промежутка высачивания, имеющего существенное значение при построении кривых депрессии для относительно коротких грунтовых плотин и используемого при расчетах откосов на устойчивость [2].

Созданию методик гидравлических расчетов посвящены работы Н.Н. Павловского, П.Я. Полубариновой-Кочиной, Ф. Шаффернака, Р.Р. Чугаева, П.Г. Киселева, А.А. Угинчуса, С.Н. Нумерова, Л.Н. Рассказова и др. Большинство существующих апробированных методик расчета приведено в справочниках [6, 7].

Все существующие методы фильтрационных расчетов («виртуальный» способ, метод фрагментирования области фильтрации, замена верхового клина эквивалентным массивом и пр.) содержат большое количество допущений, часто не позволяющих решить задачу аналитически. Например, в практике фильтрационных расчетов для определения дебита скважин используются данные натуральных пробных откачек. Последний вид гидрогеологических изысканий является достаточно дорогим и не всегда надежным.

Поэтому в практике гидротехнического строительства все чаще применяют современные методы численного моделирования. Численные методы в области гидродинамики позволяют получить общую картину течения жидкости и графически визуализировать поля скоростей, давлений или температур [11]. В частности, для решения задач в области массопереноса жидкости через насыщенные и ненасыщенные пористые среды целесообразно использовать программный комплекс GeoStudio. Его преимуществом является учет изменения температуры, давления грунтовых вод и возможность решения нестационарной задачи. Однако применение численных методов требует доказательств корректности постановки задачи и результатов расчета. Такие доказательства получают при помощи валидации.

Цель настоящей работы – провести численное моделирование движения фильтрационного потока сквозь однородный грунтовый массив при задании различных условий однозначности в программном комплексе GeoStudio, произвести валидацию. Валидация программного комплекса при проведении практических инженерных расчетов проводится путем сопоставления с результатами экспериментально проверенных методов фильтрационных расчетов. Такие методы разработаны и проверены в лабораторных условиях для однородных грунтов и плоской задачи, которая рассматривается и в наших исследованиях.

### Теоретические основы расчета

Фильтрационный расчет прямоугольной однородной перемычки на водонепроницаемом основании (рис. 1, а) выполняют, используя уравнение Дюпюи для плавно изменяющегося движения жидкости [1]:

$$h = \sqrt{h_2^2 + 2x \frac{q}{k}}, \quad (1)$$

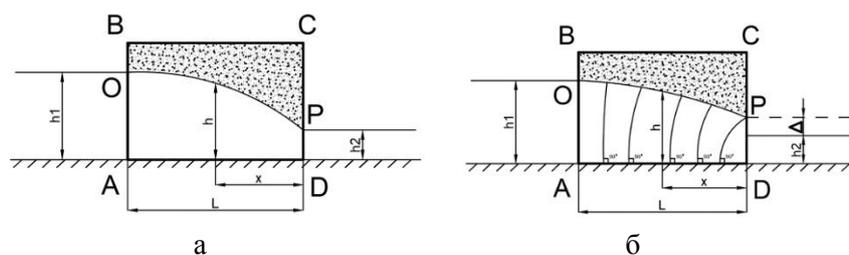
где  $h$  – глубина в произвольном живом сечении, находящемся на расстоянии  $x$  от границы грунтового массива;  $h_2$  – глубина воды в нижнем бьефе;  $k$  – коэффициент фильтрации грунта;  $q$  – расход воды, фильтрующей через тело плотины, определяемый по формуле

$$q = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} k, \quad (2)$$

где  $h_1$  – глубина воды в нижнем бьефе;  $L$  – длина массива.

Задавая различные значения  $x$ , вычисляют соответствующие значения  $h$  и по полученным точкам строят кривую депрессии  $OP$ .

На практике вследствие возникновения в области выклинивания из тела плотины фильтрационного потока с резко изменяющимся движением, обусловленного искривлением живых сечений, на участке  $\Delta$  происходит высачивание грунтовой воды непосредственно в атмосферу (рис. 1, б). Участок  $\Delta$  получил название *промежуток высачивания* [8].



**Рис. 1. Схема построения кривой депрессии:**  
**а – без промежутка высачивания; б – с промежутком высачивания**

Высота выхода фильтрационного потока на низовом откосе определяется по графической зависимости  $\frac{\Delta}{h_1} = f\left(\frac{L}{h_1}, \frac{h_2}{h_1}\right)$ , полученной П.Я. Полубариновой-Кочиной [3].

### Параметризация фильтрации жидкости через земляные плотины

Формула числа Рейнольдса ( $Re$ ), согласно М.Д. Миллионщикову, имеет вид [6]:

$$Re = \frac{lv}{mv}, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость фильтрации, м/с;  $m$  – пористость грунта, %;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $l$  – внутренний линейный масштаб пористой среды.

Преобразуя данное выражение и заменив скорость фильтрации согласно основному закону фильтрации, имеющему вид

$$v = kI, \quad (4)$$

где  $I$  – гидравлический уклон, равный потерям напора на единицу длины на пути фильтрации, получим следующую зависимость:

$$Re = \frac{h_1 - h_2}{L} \times \frac{k^{1,5}}{m^{1,5}} \times \frac{1}{\sqrt{g\nu}}, \quad (5)$$

в которую добавлено ускорение силы тяжести  $g$ .

Так как отношение  $\frac{h_1 - h_2}{L}$  уже является безразмерной величиной, то для моделирования фильтрации жидкости через земляные плотины формируем два безразмерных комплекса:

$$\begin{aligned} 1) \Pi_1 &= \frac{h_1 - h_2}{L} \text{ (геометрическое подобие);} \\ 2) \Pi_2 &= \frac{k^{1,5}}{m^{1,5}} \times \frac{1}{\sqrt{g\nu}} \text{ (динамическое подобие).} \end{aligned} \quad (6)$$

Задавая различные значения представленных параметров, можно получить разные координаты депрессионной кривой, разные величины фильтрационного расхода и промежутка высачивания.

Для численного моделирования была выбрана следующая задача.

Прямоугольная перемычка длиной 10 м из мелкозернистого песка (пористость грунта  $m = 0,5$ ) расположена на водонепроницаемом основании, уровень воды в нижнем бьефе  $h_2$  равен 1 м, разница между уровнями воды в верхнем и нижнем бьефах  $\Delta h$  равна 5 м, кинематический коэффициент вязкости равен  $1,51 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, коэффициент фильтрации для первого вида мелкозернистого песка – 0,000125 м/сут, для второго – 0,000075 м/сут.

### Последовательность расчетов по формуле Дюпюи

1. По графику Полубариновой-Кочиной определена величина промежутка высачивания ( $\Delta$ , м) для каждого опыта. Отметим, что в половине случаев промежуток высачивания отсутствует, и «выходная» глубина потока равна глубине воды в нижнем бьефе.

2. Выполнен фильтрационный расчет прямоугольной грунтовой перемычки по апробированному методу. Для этого по формуле (2) определен расчетный фильтрационный расход воды для каждого опыта. Затем по формуле (1) рассчитаны точки кривых депрессии, расположенные на расстоянии  $x$  от нижнего бьефа. При этом величина  $x$  принимает значения от 0 до 10 м с интервалом в 1 м.

### Расчеты в программном комплексе GeoStudio

3. Осуществлено численное моделирование фильтрации в программном комплексе GeoStudio. В основу численного метода расчета положено следующее уравнение [9]:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \frac{k_w}{\rho_w g} \right) \frac{\partial u_w}{\partial y} + k_w I \right) = 0, \quad (7)$$

где  $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $u_w$  – давление грунтовой воды, Па;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $k_w$  – гидравлическая проводимость изотермически жидкой воды, м/с, определяемая по формуле:

$$k_w = k_{sat} \int_{\theta_{res}}^{\theta_w} \frac{\theta_w - x}{\varphi^2(x)} dx / \int_{\theta_{res}}^{\theta_{sat}} \frac{\theta_{sat} - x}{\varphi^2(x)} dx, \quad (8)$$

где  $k_{sat}$  – гидравлическая проводимость насыщенного грунта, м/с;  $\theta_w$  – объемное содержание воды;  $\theta_{res}$  – объемное остаточное содержание воды;  $\theta_{sat}$  – объемное содержание воды в насыщенных условиях;  $x$  – переменная интегриации, характеризующая содержание воды;  $\varphi(x)$  – давление всасывания, кПа.

$$\theta_w = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + (\alpha' \varphi)^n)^m}, \quad (9)$$

где  $\alpha'$ ,  $n$ ,  $m$  – параметры Ван Генухтена, определяющие форму функции объемного содержания воды [10].

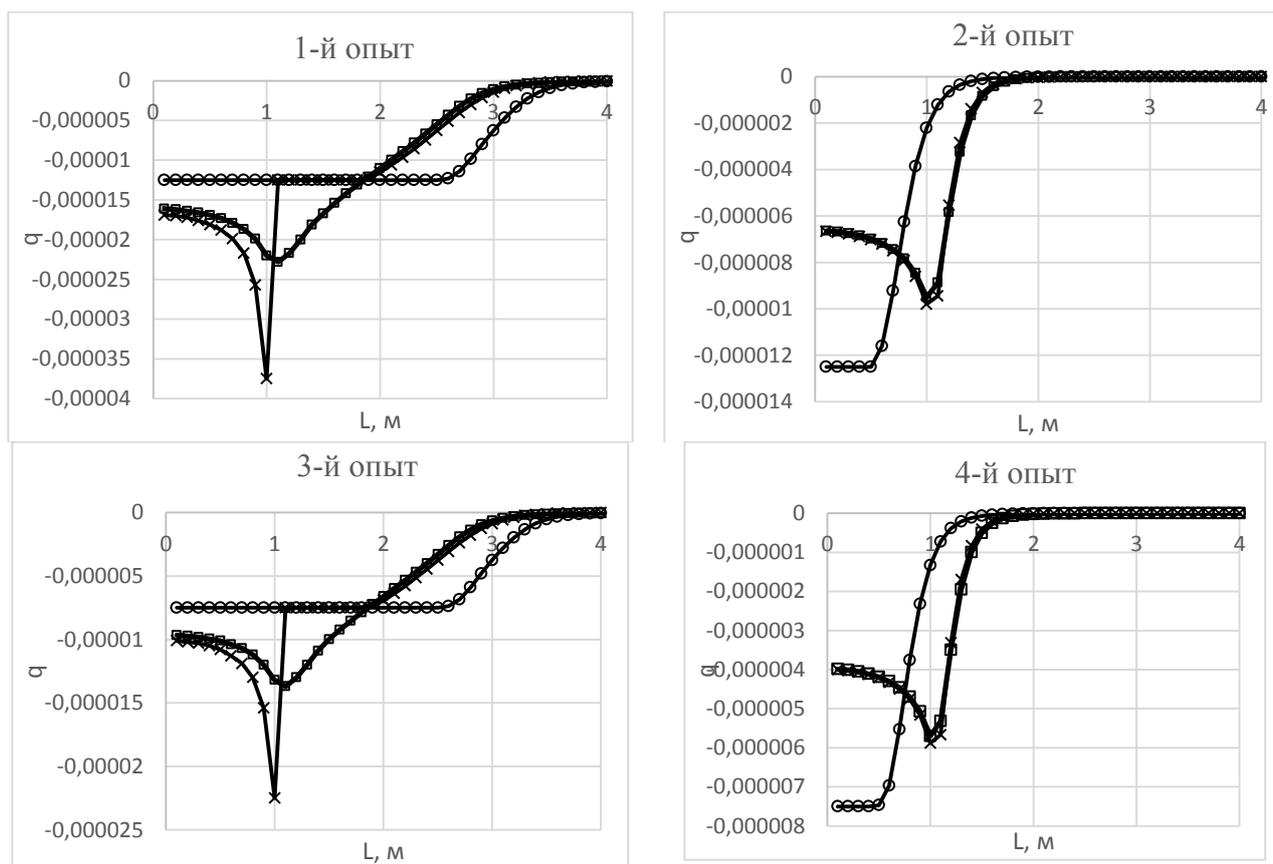


Рис. 2. Графики удельного расхода для соответственно 1, 2, 3 и 4-го опытов:  
 □ при граничном условии  $H$ ; × при граничном условии  $H+$ ; ○ при граничном условии  $I$ .

Математическая зависимость (7) получена на основании закона сохранения массового расхода жидкости переменной плотности. Массопереносом водяного пара и тепловым расширением жидкости пренебрегаем.

Для формирования модельной задачи использовались три типа граничных условий: 1) на выходе задана величина гидравлического напора ( $H$ ); 2) задана величина гидравлического уклона ( $I$ ); 3) заданы обе характеристики ( $H+I$ ).

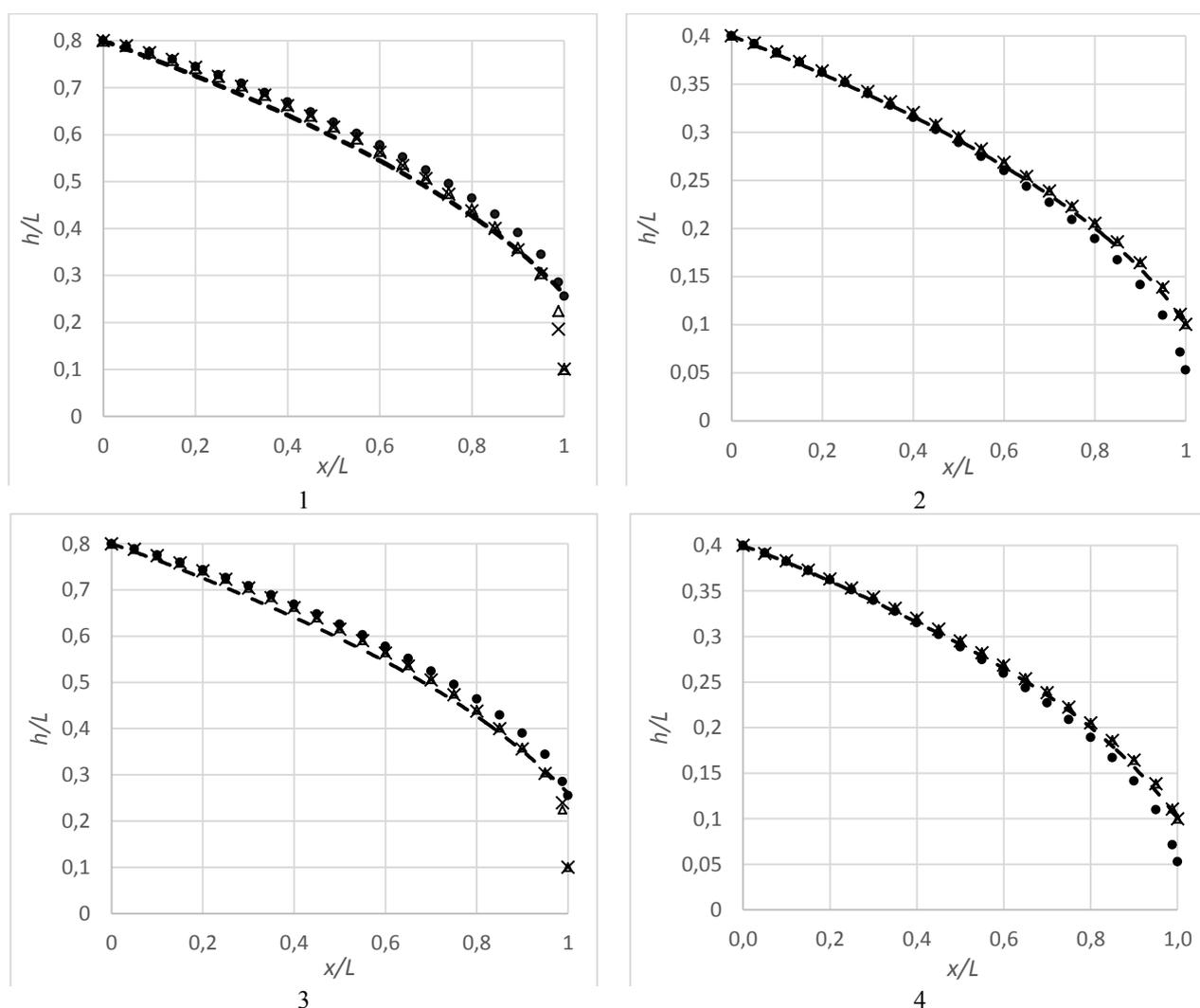
4. По результатам численного моделирования построены графики удельного расхода грунтовой воды при различных граничных условиях (рис. 2).

5. По методу трапеций вычислены площади, ограниченные графиками, затем рассчитаны соответствующие фильтрационные расходы  $q$ .

### Результаты эксперимента

Получившиеся в результате численных экспериментов величины фильтрационного расхода были сопоставлены с рассчитанными по апробированному методу.

Получившиеся в результате численных экспериментов кривые депрессии были сопоставлены с кривыми депрессии, построенными по апробированному методу. Соответствующие графики в безразмерном виде представлены на рис. 3.



**Рис. 3. Сравнение расчетных данных и результатов численного моделирования для 1, 2, 3 и 4-го опытов соответственно:**  
 – расчетные данные,  $\times$  при граничном условии  $H$ ,  $\Delta$  при граничном условии  $H+I$ ,  
 $\bullet$  при граничном условии  $I$ .

## Выводы

Результаты проведенного численного моделирования подтверждают возможность использования программного комплекса GeoStudio для фильтрационного расчета однородных прямоугольных земляных плотин.

Анализ данных численных экспериментов говорит о том, что при заданных величинах выходного напора и гидравлического уклона возможно получить форму кривой депрессии фильтрационного потока, наиболее точно согласующуюся с расчетными значениями, полученными по формуле Дюпюи в сочетании с методом П.Я. Полубариновой-Кочиной. Наиболее точные значения фильтрационного расхода грунтовой воды при наличии промежутка высачивания получаются при использовании граничных условий  $H$  и  $H+I$ . Если промежуток высачивания отсутствует, то допустимо задавать величину гидравлического уклона.

Программный комплекс позволяет получить не только форму кривой депрессии и фильтрационный расход, но и полную картину потока жидкости (включая значения скоростей и давлений в каждой точке расчетной области).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анахаев К.Н. Расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемом основании разной мощности // Гидротехническое строительство. 2011. № 2. С. 29–32.
2. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. 5-е изд. М.: Горная книга, 2009. 519 с.
3. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
4. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А. и др. Гидротехнические сооружения. Ч. 1. 2-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2011. 576 с.
5. СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. М.: Минстрой России, 2012. 47 с.
6. Справочник по гидравлическим расчетам. 4-е изд. / под ред. П.Г. Киселева. М.: Эколит, 2011. 312 с.
7. Справочник проектировщика. Гидротехнические сооружения / под общ. ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 545 с.
8. Чугаев Р.Р. Гидравлика: репринт 4-го изд. М.: Бастет, 2008. 672 с.
9. Domenico P.A., Schwartz W. Physical and Chemical Hydrogeology. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1998, 528 p.
10. Genuchten M.Th., van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America J. 1980;44(5):892–898.
11. Smith I.M., Griffiths D.V. Programming the Finite Element Method. 5<sup>th</sup> edition. New York, John Wiley & Sons Ltd., Wiley, 2013. 682 p.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2019. N 2/39

*Engineering Hydrology*

[www.dvfu.ru/en/vestnikis](http://www.dvfu.ru/en/vestnikis)

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-13>

Shalanin V., Patlay K.

VIKTOR SHALANIN, Senior Lecturer, e-mail: vic\_stro\_@mail.ru

KIRILL PATLAY, Graduate Student, e-mail: patlayyyy@mail.ru

Department of Engineering Systems of Buildings and Structures, School of Engineering  
*Far Eastern Federal University*

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

## Numerical simulation of the groundwater filtration process through a rectangular dam of homogeneous soil on a waterproof base

**Abstract:** Currently, in the practice of hydraulic engineering construction, modern methods of numerical simulation are used for filtration calculations. In the proposed article, the modeling of

groundwater filtration through a homogeneous earthen dam with vertical slopes located on an impermeable base was performed. Using the GEO-SLOPE GeoStudio software for hydrodynamic calculations, the main characteristics of the filtration flow were determined and the depression curves were plotted. To confirm the reliability of the results, they were compared with those calculated by the approved method. The conclusion provides recommendations on the use of boundary conditions to obtain higher modeling accuracy.

*Keywords:* groundwater filtration, spacing, depression curve, numerical validation.

## REFERENCES

1. Anakhaev K.N. Calculation through earthen dams on an permeable base of different power. Hydraulic Engineering. 2011;2:29–32.
2. Mironenko V.A. Groundwater dynamics. 5<sup>th</sup> ed. M., Gornaya Kniga, 2009. 519 p.
3. Polubarinova-Kochina P.Ya. Theory of the movement of groundwater. M., Nauka, 1977, 664 p.
4. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A. et al. Hydrotechnical structures. Part 1. 2<sup>nd</sup> ed., M., ASV, 2011, 576 p.
5. SP 39.13330.2012 Dams of soil materials. M., Minstroy Rossii, 2012, 47 p.
6. Handbook of hydraulic calculations. Team of authors; ed. P. Kiselev. 4<sup>th</sup> ed., M., Ecolit, 2011, 312 p.
7. Reference Designer. Hydrotechnical structures. Ed. Nedrigi V.P. M., Stroyizdat, 1983, 545 p.
8. Chugaev R. R. Hydraulics. 4<sup>th</sup> ed. M., Bastet, 2008, 672 p.
9. Domenico P.A., Schwartz W. Physical and Chemical Hydrogeology. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1998, 528 p.
10. Genuchten M.Th., van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America J. 1980;44(5):892–898.
11. Smith I.M., Griffiths D.V. Programming the Finite Element Method. 5<sup>th</sup> edition. New York, John Wiley & Sons Ltd., Wiley, 2013. 682 p.