

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626/627

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293

## Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D

Генрих Васильевич Орехов, Чан Мань Кыонг

Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В современных условиях изменения климата защита ирригационных сооружений, особенно плотин, является важной задачей. Фильтрация — одна из основных причин разрушения плотин, поэтому требуется исследовать режимы фильтрации и искать решения для предотвращения разрушений сооружений в результате фильтрационных процессов в земляных плотинах. Анализ фильтрационных режимов в теле грунтовых плотин производится с помощью математического моделирования с использованием численных моделей конечных элементов. В качестве объекта исследования принята однородная земляная плотина с несовершенной диафрагмой на непроницаемом основании. Цель исследования — определить влияние относительных параметров: высоты диафрагмы, расположения диафрагмы в теле плотины, их количества. Анализируются влияние параметров диафрагмы на фильтрационный расход, проходящий через тело плотины, и ее скорость.

**Материалы и методы.** Исследование выполнено с помощью численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 2D. Модель плотины построена на основе типовых конструктивных решений, применяемых на практике.

**Результаты.** Размещение диафрагмы в теле плотины снижает фильтрационный поток через плотину, а высота диафрагмы обратно пропорциональна расходу фильтрации. Максимальная фильтрационная скорость зафиксирована на верхнем конце диафрагмы, ее величина прямо пропорциональна высоте диафрагмы. При смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа фильтрация несколько уменьшается. Значение максимальной скорости увеличивается при смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа.

**Выводы.** Разрушение плотины из-за фильтрации может привести к серьезному материальному ущербу и гибели людей. Внедрение методов, снижающих фильтрационные расходы и скорость фильтрации, важно для обеспечения безопасных условий работы плотины.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фильтрация, земляная плотина, метод конечных элементов, несовершенная диафрагма, разрушение плотины, фильтрационный расход, скорость фильтрации

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Орехов Г.В., Чан Мань Кыонг. Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 281–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293

Автор, ответственный за переписку: Чан Мань Кыонг, cuonghtcs@gmail.com.

## Analysis of seepage through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using PLAXIS 2D

Genrikh V. Orekhov, Tran Manh Cuong

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In the current climate change conditions, the protection of irrigation structures, especially dams, is a very important task. Seepage is one of the main causes of dam failure, so it is very important to investigate the seepage regimes and find solutions to prevent dam failures as a result of the seepage processes in earth dams. In this paper, the analysis of the seepage regimes in the body of earth dams is performed by means of mathematical modelling using numerical finite element models. A homogeneous earth dam with an imperfect diaphragm on an impermeable foundation is taken as the object of study. The purpose of the study is to determine the influence of relative parameters: diaphragm height, diaphragm location in the dam body, their number. In addition, the influence of diaphragm parameters on the seepage flow through the dam body and its velocity is analyzed.

**Materials and methods.** The study was carried out with the help of numerical modelling using PLAXIS 2D software. The model of the dam is based on typical design solutions used in practice.

**Results.** The results of the study show that the placement of the diaphragm in the dam body reduces the seepage flow through the dam and the height of the diaphragm is inversely proportional to the seepage rate. The maximum seepage rate

was recorded at the upper end of the diaphragm and its magnitude is directly proportional to the height of the diaphragm. When the diaphragm is displaced towards the downstream side, the filtration rate slightly decreases. The value of maximum velocity increases when the diaphragm is displaced towards the downstream end.

**Conclusions.** Dam failure due to seepage can result in serious property damage and loss of life. Implementing methods that reduce seepage discharge and seepage velocities is important to ensure safe dam operating conditions

**KEYWORDS:** seepage, earthen dam, finite element method, diaphragm, dam failure, seepage discharge, seepage velocity

**FOR CITATION:** Orekhov G.V., Tran Manh Cuong. Analysis of seepage through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using PLAXIS 2D. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):281-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293 (rus.).

*Corresponding author:* Tran Manh Cuong, cuonghtcs@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Земляные плотины являются наиболее распространенным типом водоподпорных сооружений. Они строятся для разных целей, таких как гидроэнергетика, защита от наводнений, ирригации, сооружение искусственных водоемов и т.д. [1, 2]. В Социалистической Республике Вьетнам было построено и строится сейчас большое количество гидротехнических объектов в основном из местных грунтовых материалов, образующих многочисленные водохранилища разного размера и назначения. В настоящее время на территории страны насчитывается около 1200 водохранилищ<sup>1</sup>, образованных грунтовыми плотинами, которые за период длительной эксплуатации достигли стадии износа основных строительных конструкций и нуждаются в ремонте и реконструкции. Многие из этих плотин относятся к малым и средним (III и IV классы опасности). Оценка эксплуатационной надежности и безопасности этих гидротехнических объектов — актуальная проблема для Вьетнама.

Грунтовая плотина, состоящая из ряда элементов, должна соответствовать показателям конструктивной надежности этих элементов. Это, прежде всего, прочность (механическая и фильтрационная), устойчивость, трещиностойкость противофильтрационных элементов, коррозионная и биологическая стойкость и др. Одна из основных причин разрушения грунтовых плотин — недоучет фильтрационных процессов на стадии проектирования и периода эксплуатации [3–5]. В грунтовых плотинах для снижения фильтрационного воздействия на тело плотины применяются различные противофильтрационные элементы [6, 7]. Широкое распространение получили диафрагмы, устанавливаемые в теле плотины. Эти конструктивные элементы могут быть высотой, равной высоте плотины (совершенные диафрагмы), или иметь частичную высоту (несовершенные). Последние наиболее часто используются в низконапорных грунтовых плотинах (высотой до 30 м). Это значительно удешевляет сооружение. Диафрагмы, как противофильтрационные элементы, получили распространение и в связи с широким внедрением полимерных материалов [8].

<sup>1</sup> По данным отчетов об управлении безопасностью водоснабжения Генерального управления орошения Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама. Вьетнам, октябрь 2020.

Фильтрация служит важным фактором, который необходимо тщательно изучить при создании сооружения. Она должна контролироваться и в процессе эксплуатации, чтобы предотвратить эрозию, движение мелких материалов, составляющих тело плотины, или внешнюю эрозию, отслаивание [9, 10]. При однородной конструкции плотины накопление избыточного порового давления в теле плотины и фильтрация являются проблемой, особенно для водохранилищ с резкими и частыми колебаниями за короткое время [11]. Неправильная оценка фильтрационных процессов, ошибки в выборе противофильтрационных элементов могут привести к неустойчивости и повреждению всей или части поверхности низового откоса.

В земляных плотинах изучение фильтрации можно применять для оценки кривой депрессии, порового давления в поперечном сечении земляной плотины или основания плотины, градиента фильтрационного потока через плотину. Анализ фильтрации также используется для оценки эффективности выбора различных конструкций противофильтрационных элементов, применяемых для сооружения [12].

В настоящей статье исследуется фильтрация в теле однородной плотины с несовершенной диафрагмой различной геометрии и положения в поперечном сечении плотины. Выбор такого противофильтрационного элемента связан с тем, что в последнее время с широким применением полимеров в строительстве хорошо себя зарекомендовали различные пленочные водонепроницаемые листовые материалы, имеющие низкую стоимость и сравнительно большую долговечность, что привлекательно при массовом строительстве низконапорных грунтовых плотин.

Анализ фильтрации может быть выполнен различными методами: аналитическими, экспериментальными, численными. К.К. Винсент и его коллеги применили формулу закона Дарси для расчета фильтрации в земляной плотине [12]. М.М. Саззид, М. Рой и М.С. Рахман использовали аналитические и численные методы для расчета фильтрационного потока через плотину [13]. Х.А.А. Абдель-Гавад и соавт. выбрали метод граничных элементов для расчета фильтрации с горизонтальными фильтрами на непроницаемых основаниях [14].

С помощью программного обеспечения SEEP2D R.H. Irzooki рассчитал фильтрацию через плотину с горизонтальным дренажем [15]. Математическое моделирование на основе численных методов становится наиболее популярным способом определения основных параметров фильтрационного потока в различных конструкциях грунтовых плотин [16, 17]. Этот способ менее трудозатратен, чем физическое моделирование. Возрастающие возможности персональных компьютеров делают математическое моделирование хорошим выбором. Одновременно следует отметить, что математическое и физическое моделирование, как способы исследования сложных гидродинамических задач, не лишены недостатков. В настоящее время эти два способа исследования дополняют друг друга в стремлении получить надежные результаты.

В представленной статье авторы использовали программу PLAXIS 2D (плоская задача) для расчета фильтрации через земляную плотину с несовершенной диафрагмой на непроницаемом основании для различных режимов фильтрации и расположения, и геометрии диафрагмы. Исследование направлено на определение влияния диафрагмы, а также ее высоты и положения в теле плотины на фильтрационный расход и скорость через поперечное сечение плотины, что позволило обоснованно выбрать наиболее оптимальные технические решения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Применяемые модели

В данном исследовании была принята однородная грунтовая плотина на непроницаемом основании. Высота плотины  $H = 22$  м, гребень плотины  $B = 6$  м, ширина по подошве  $L = 132$  м. Нормальный подпорный уровень  $H_1 = 20$  м, в нижнем бьефе нет воды. Верховой и низовой откосы заложением 3:1 (рис. 1). Ширина гребня выбирается в соответствии с рекомендациями Бюро мелиорации США (U.S. Bureau of Reclamation)<sup>2</sup>, а заложение верхового

<sup>2</sup> Design Standards No. 13. Embankment Dams, Chapter 6 “Freeboard” // Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, 2021.

и низового откосов в соответствии с рекомендациями Терзаги и Стрэнджа<sup>2</sup>.

Сначала плотина исследовалась без диафрагмы, затем в середине поперечного сечения плотины добавлена диафрагма. Изучено пять различных высот несовершенной диафрагмы. Высота диафрагмы обозначена  $H_d$ . Исследовалось пять значений, отнесенных к напору  $H_1$ :  $H_d/H_1 = 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75$ , а также три различных положения диафрагмы по длине  $L$  для высоты диафрагмы  $H_d/H_1 = 0,25; 0,5$  и  $0,75$ . Для этого введена прямоугольная система координат, ноль которой совпадает с точкой гребня плотины со стороны верхнего бьефа (рис. 1, красные линии). Крайнее левое положение диафрагмы соответствует цифре 1 на рис. 1 ( $X/B = 0$ ). Среднее и крайнее правое положения соответствуют цифрам 2 и 3.

На рис. 2 показана деформация сетки рассматриваемой области. Исследовано влияние наличия диафрагмы, а также ее высоты и расположения в теле плотины на общий фильтрационный расход и скорости фильтрации в поперечном сечении. При построении сетки в месте расположения диафрагмы выбирается меньший размер элемента для точного изучения изменения потока при наличии диафрагмы и изменении ее высоты.

### Математический анализ

Переменные, участвующие в исследовании, могут быть выражены следующим образом:

$$\Phi(H_1; B; K; q; V; H_d; H_2; X; \rho; g) = 0,$$

где  $H_1$  — нормальный подпорный уровень, м;  $B$  — ширина гребня плотины, м;  $K$  — коэффициент фильтрации, м/сут;  $q$  — суммарный фильтрационный расход на единицу длины плотины, м<sup>2</sup>/сут;  $V$  — скорость воды, проходящей через поперечное сечение плотины, м/с;  $H_d$  — высота диафрагмы, м;  $H_2$  — глубина воды нижнего бьефа, м;  $X$  — расстояние по горизонтали, измеренное от пересечения гребня с выступом верхового откоса, м;  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — гравитационное ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Применяя теорему Бэкингема  $\pi$  и принимая  $H_1$ ,  $\rho$  и  $K$  в качестве повторяющихся переменных, количество переменных, влияющих на проблему  $n$ ,

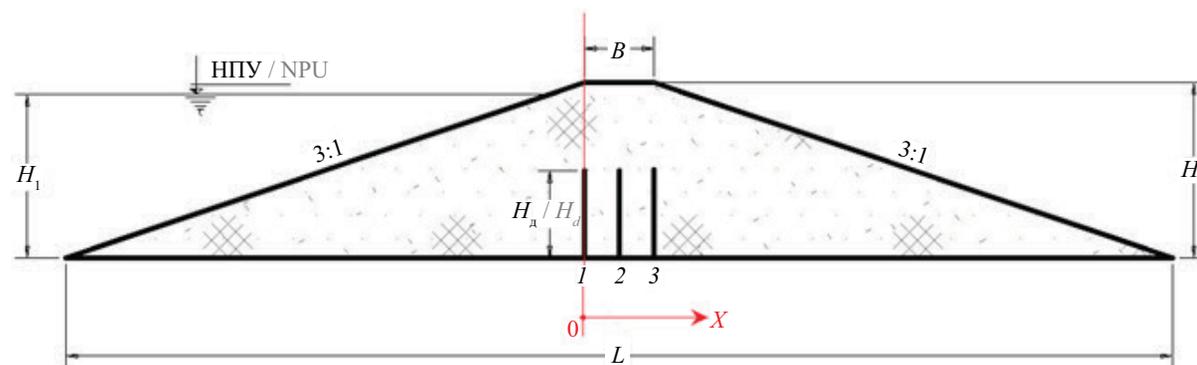


Рис. 1. Поперечное сечение плотины

Fig. 1. Cross section of the dam

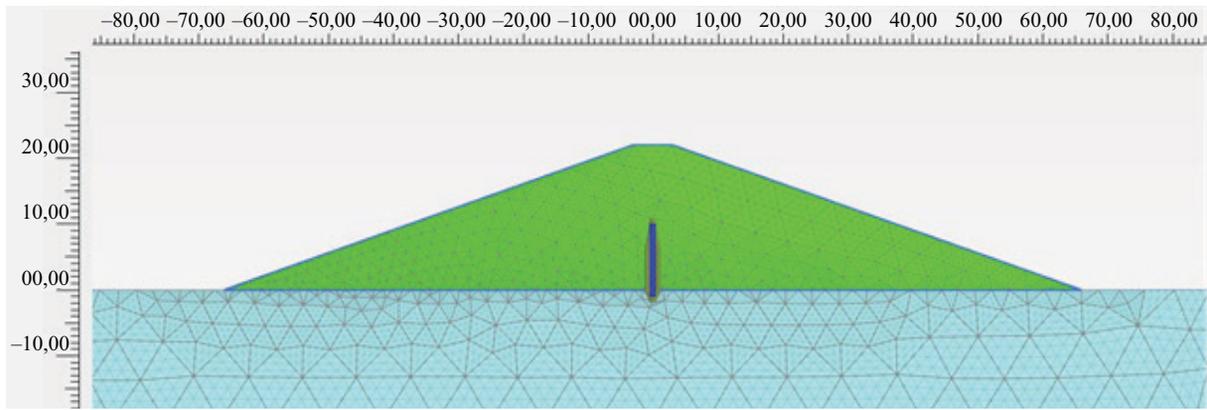


Рис. 2. 2D-сетка и граничные условия

Fig. 2. 2D mesh and boundary conditions

равно 10, а количество задействованных фундаментальных измерений  $m = 3$ , т.е. длина, масса и время, поэтому количество безразмерных параметров  $\pi$ -термов будет равно 7 и может быть записано так:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= H_d/H_1, \quad \pi_2 = B/H_1, \\ \pi_3 &= q/K \cdot H_1, \quad \pi_4 = V/K, \\ \pi_5 &= g \cdot H_1/K^2, \quad \pi_6 = H_2/H_1, \\ \pi_7 &= X/H_1. \end{aligned}$$

Функциональная связь для  $\pi$ -членов может быть выражена как:

$$\Phi\left(H_d/H_1; B/H_1; q/K \cdot H_1; V/K; g \cdot H_1/K^2; H_2/H_1; X/H_1\right) = 0.$$

Для изучения влияния положения противофильтрационной диафрагмы  $\pi_7$  делится на  $\pi_2$ .

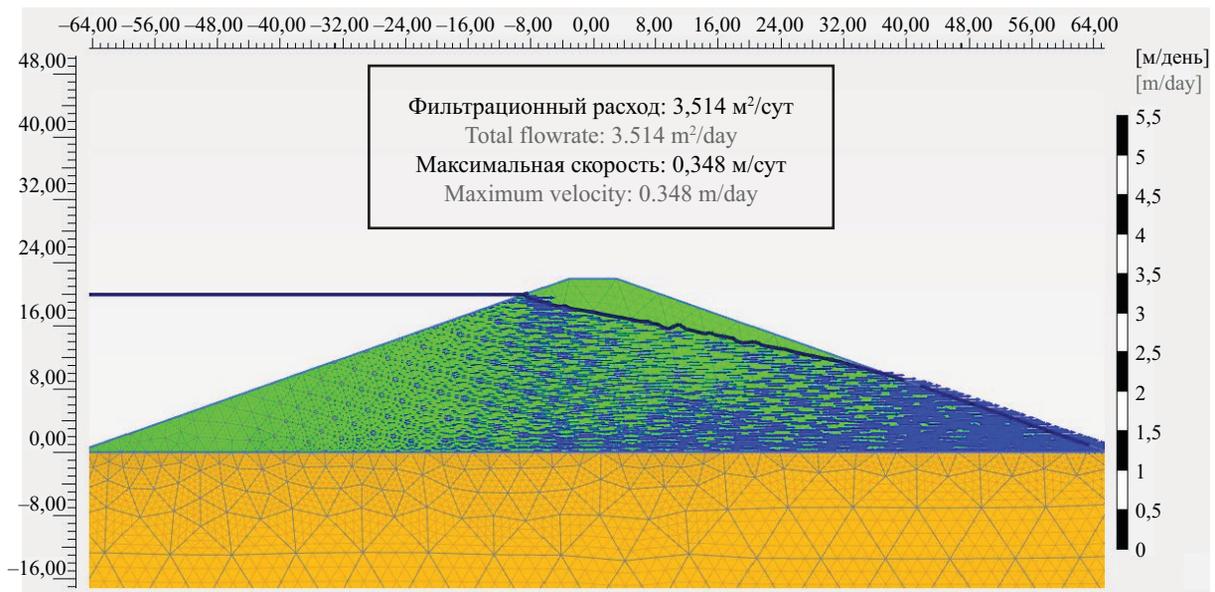
Принимая  $B, H, g$  и  $K$  за постоянные значения, окончательное функциональное соотношение можно свести к следующему:

$$\Phi\left(H_d/H_1; q/K \cdot H_1; V/K; H_2/H_1; X/B\right) = 0.$$

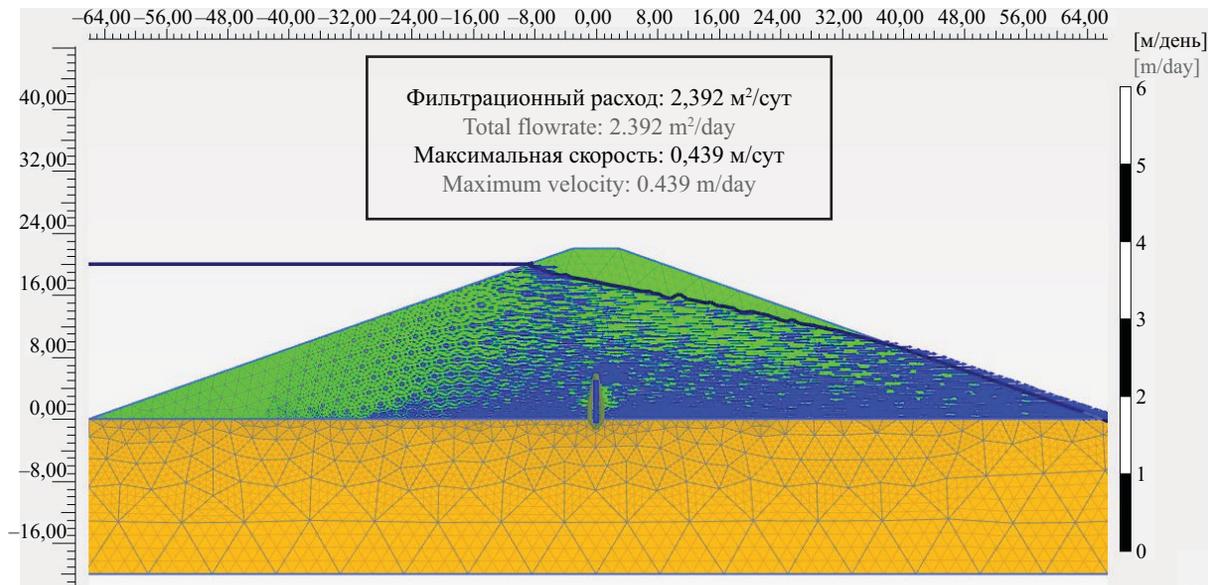
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого значения высоты диаграммы и ее положения в теле плотины получен фильтрационный расход через земляную плотину и отображена скорость по ее поперечному сечению. На рис. 3 представлены векторы потока и скорости в поперечном сечении плотины для различной высоты и расположения диафрагмы (в нижнем бьефе нет воды  $H_2 = 0$ ). Расчеты показали, что максимальная скорость приходится на низовой откос в случае отсутствия диафрагмы, на верхний конец диафрагмы для случаев использования диафрагмы. Это может быть связано с препятствием потоку из-за наличия диафрагмы, которая уменьшает площадь, через которую просачивается вода в месте расположения диафрагмы.

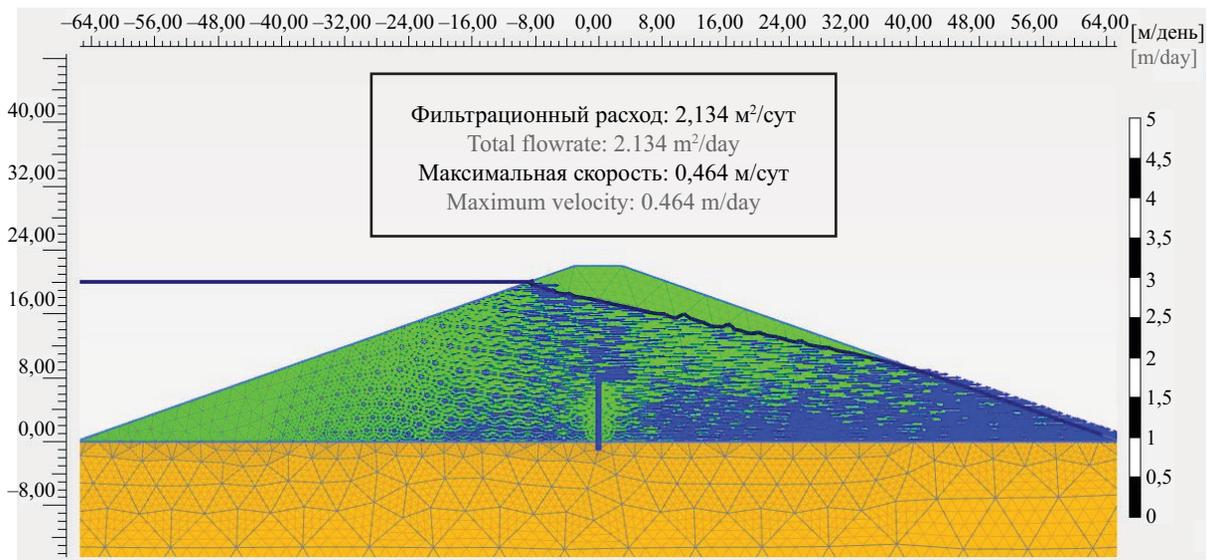
В случае отсутствия диафрагмы и расположения диафрагмы в середине поперечного сечения плотины безразмерный член  $H_d/H_1$  построен против безразмерного члена  $(q/K \cdot H_1)$  для изучения влияния высоты диафрагмы на общий фильтрационный расход, как показано на рис. 4.



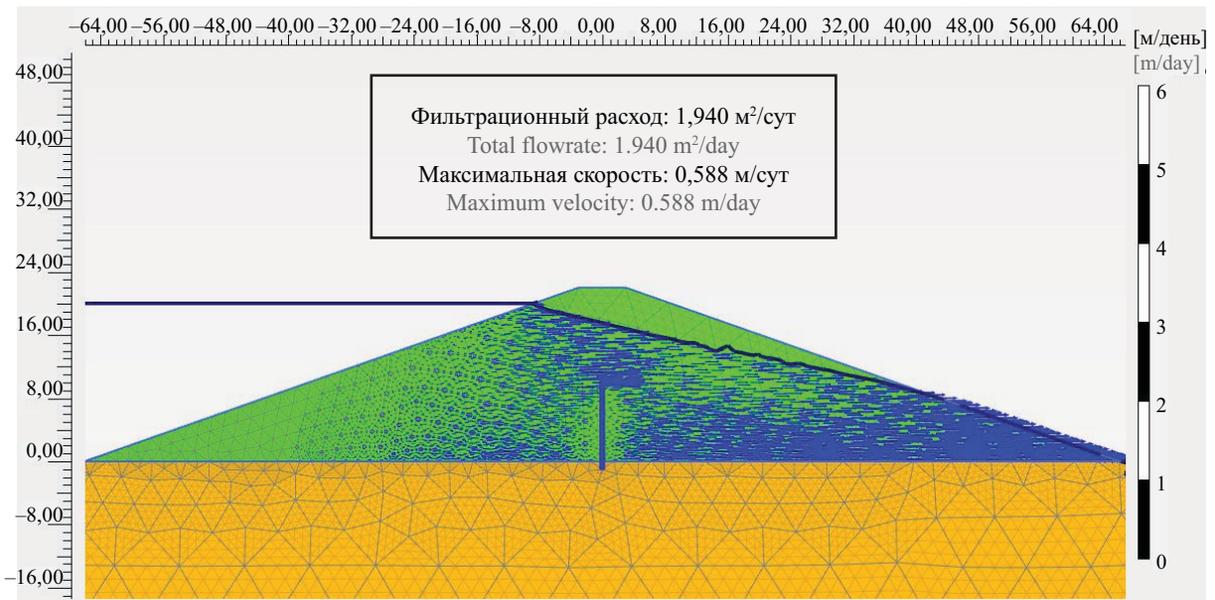
a



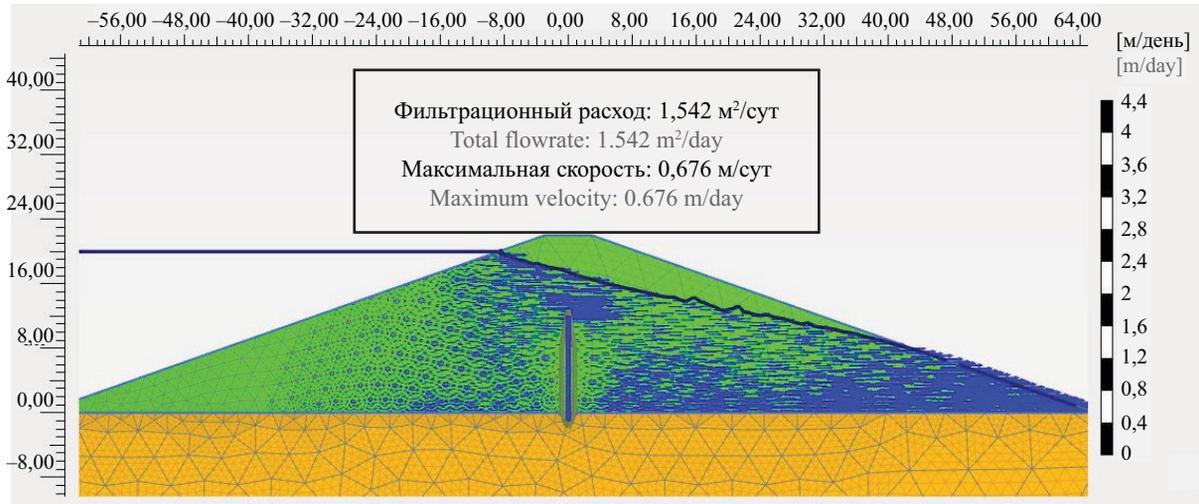
b



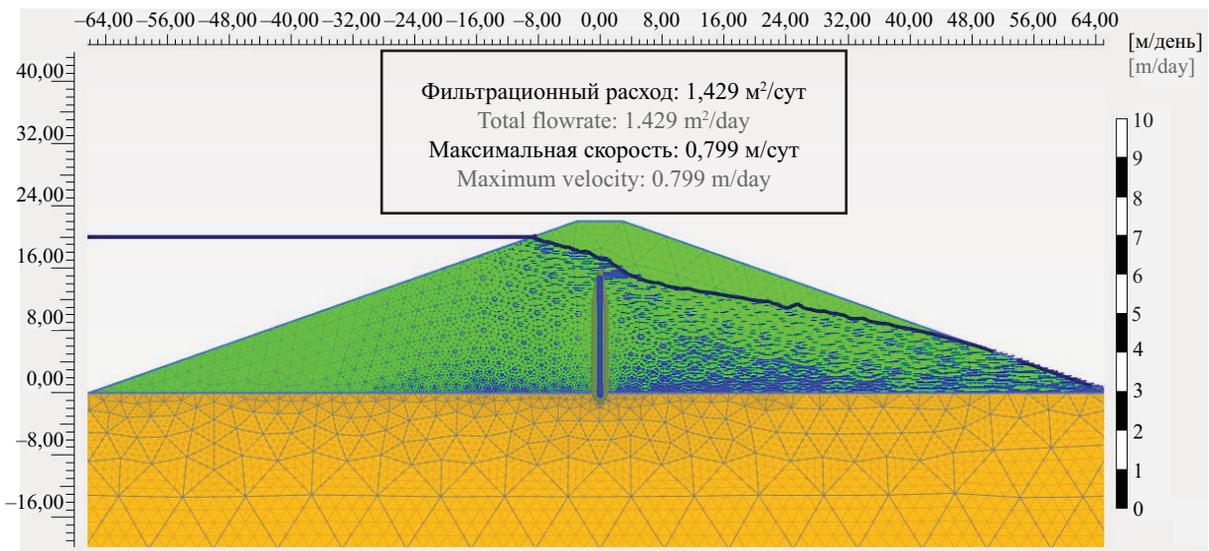
c



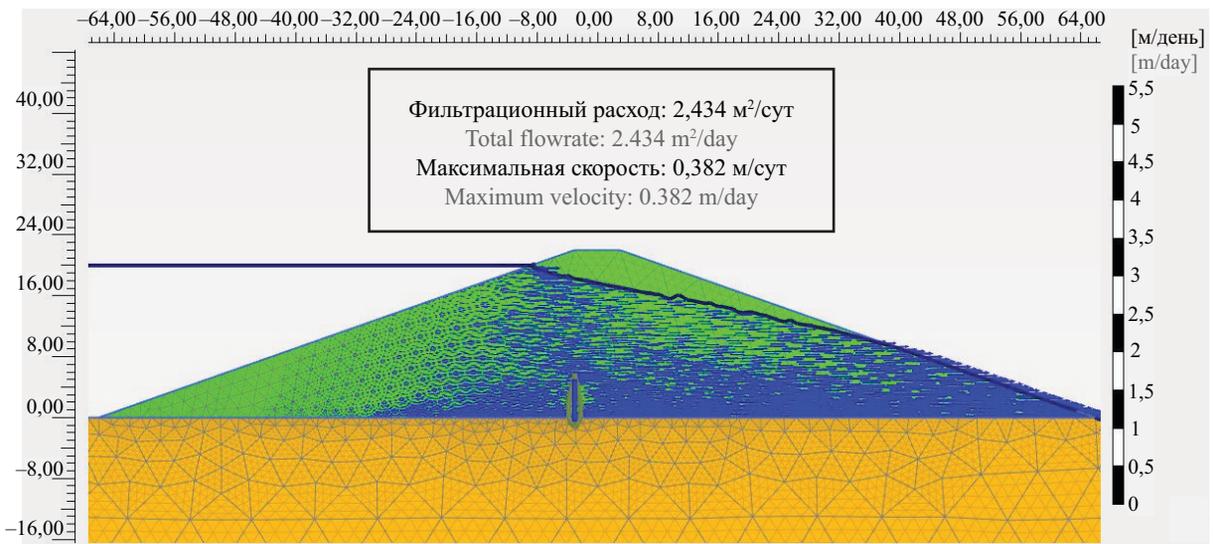
d



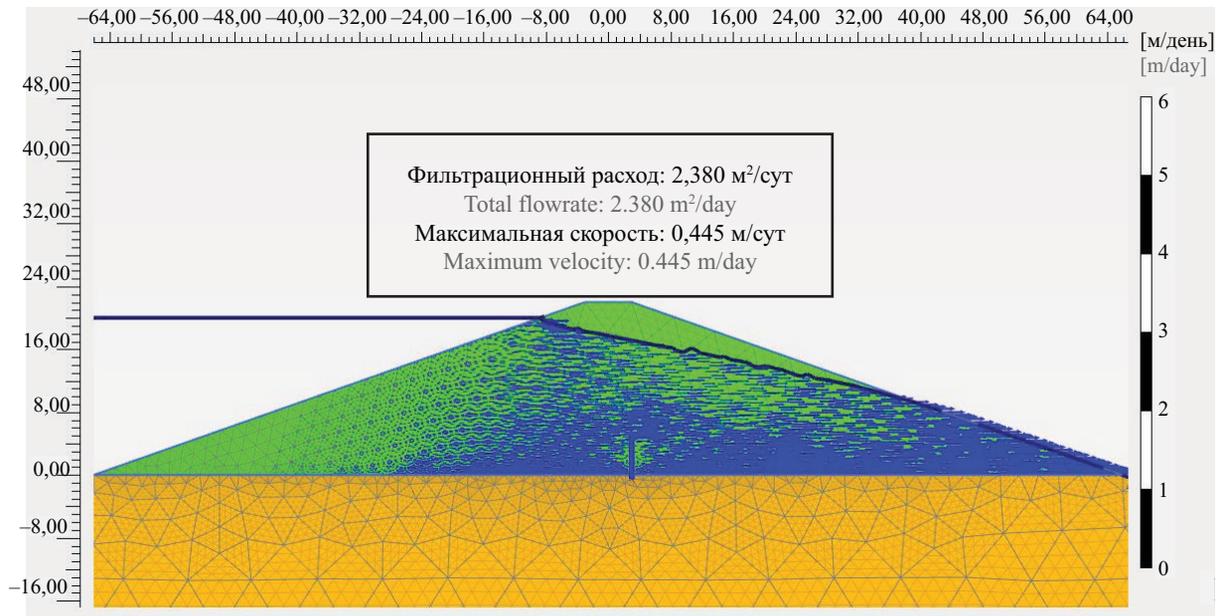
e



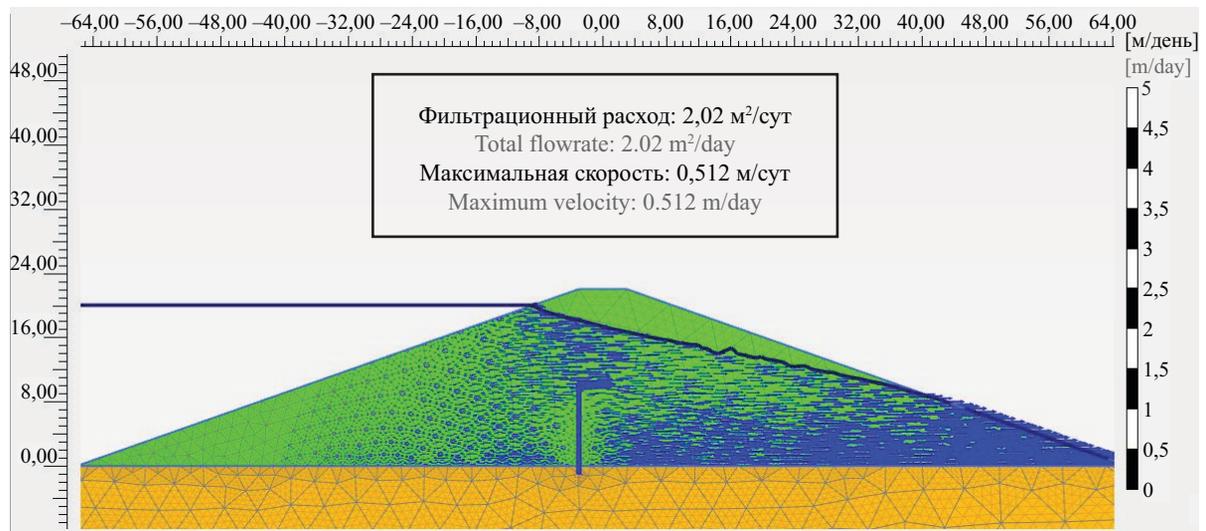
f



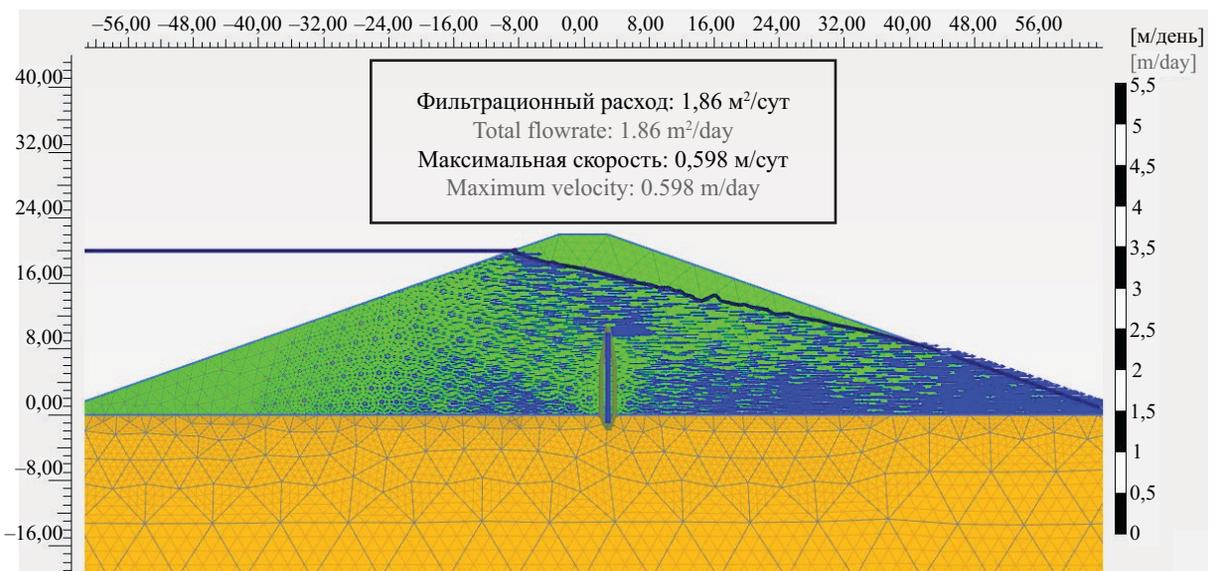
g



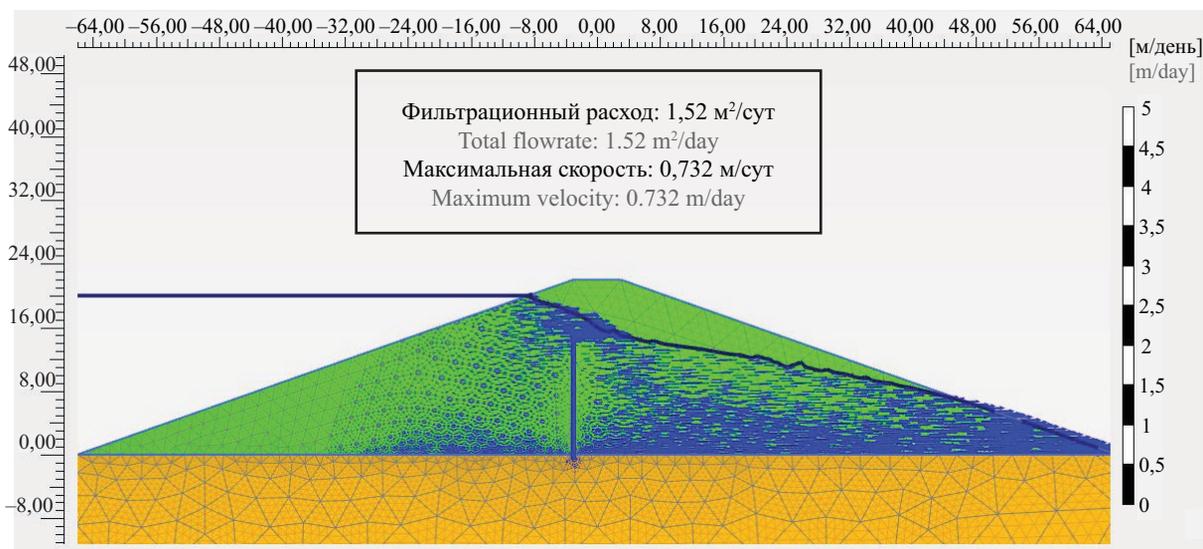
h



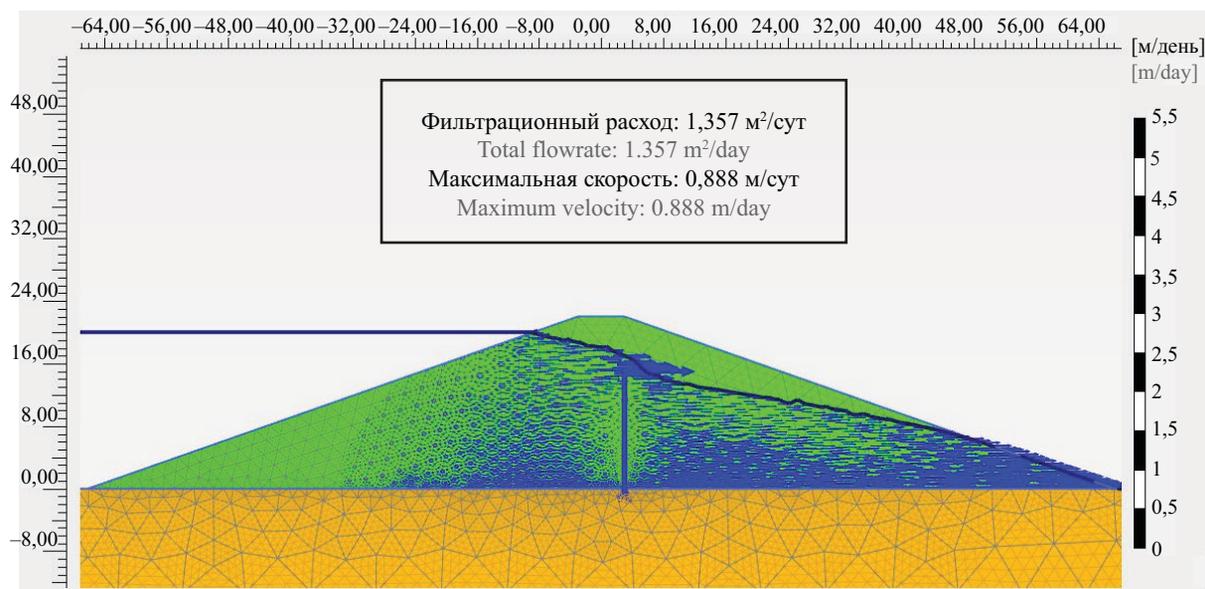
i



j



k



l

**Рис. 3.** Кривая депрессии и векторы скорости для случая: *a* — без диафрагм; *b* — диафрагм посередине,  $H_d/H_1 = 0,25$ ; *c* — диафрагм посередине,  $H_d/H_1 = 0,4$ ; *d* — диафрагм посередине,  $H_d/H_1 = 0,5$ ; *e* — диафрагм посередине,  $H_d/H_1 = 0,6$ ; *f* — диафрагм посередине,  $H_d/H_1 = 0,75$ ; *g* — диафрагм в верхнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,25$ ; *h* — диафрагм в нижнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,25$ ; *i* — диафрагм в верхнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,5$ ; *j* — диафрагм в нижнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,5$ ; *k* — диафрагм в верхнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,75$ ; *l* — диафрагм в нижнем бьефе,  $H_d/H_1 = 0,75$

**Fig. 3.** Depression curve and velocity vectors for the case: *a* — without diaphragms; *b* — diaphragm in the middle,  $H_d/H_1 = 0.25$ ; *c* — diaphragm in the middle,  $H_d/H_1 = 0.4$ ; *d* — diaphragm in the middle,  $H_d/H_1 = 0.5$ ; *e* — diaphragm in the middle,  $H_d/H_1 = 0.6$ ; *f* — diaphragm in the middle,  $H_d/H_1 = 0.75$ ; *g* — upstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.25$ ; *h* — downstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.25$ ; *i* — upstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.5$ ; *j* — downstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.5$ ; *k* — upstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.75$ ; *l* — downstream diaphragm,  $H_d/H_1 = 0.75$

Как видно, общий фильтрационный расход через плотину уменьшается по мере увеличения высоты диафрагмы. Это можно объяснить в соответствии с законом Дарси: по мере увеличения высоты диафрагмы длина фильтрационного потока будет увеличиваться, что уменьшит гидравлический градиент, уменьшив фильтрационный поток [18, 19]. Кроме того, когда расстояние между диафрагмой

и кривой депрессии уменьшается, потоки в этой области будут сходиться, что создает большее сопротивление потоку и снижает расход фильтрации [20].

Общий фильтрационный расход через поперечное сечение плотины снижается на 31,93 % по сравнению с плотиной без диафрагмы при  $H/H_1 = 0,25$  и до 59,33 % при  $H/H_1 = 0,75$  (рис. 5).

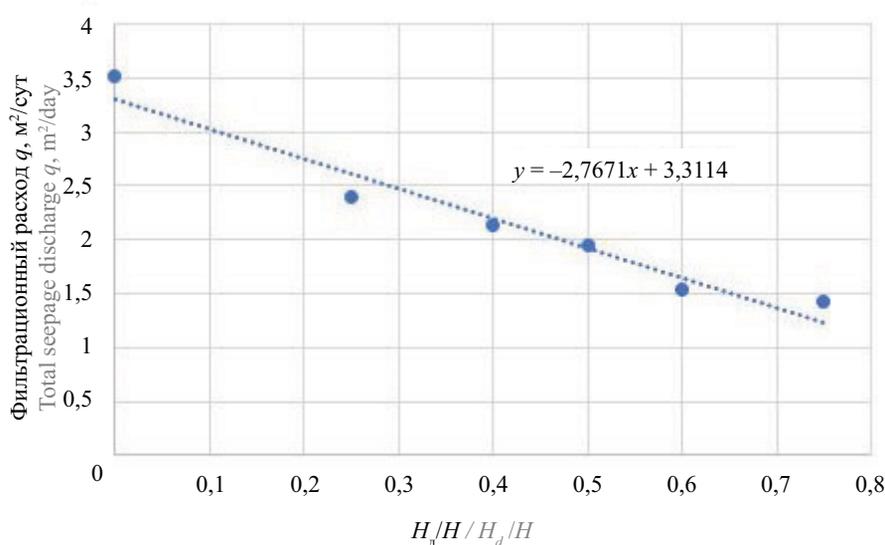


Рис. 4. Влияние изменения высоты диафрагмы на общий фильтрационный расход (расположение диафрагмы — в середине поперечного сечения плотины)

Fig. 4. The effect of changing the height of the diaphragm on the total seepage discharge (diaphragm location — in the middle of the dam cross-section)

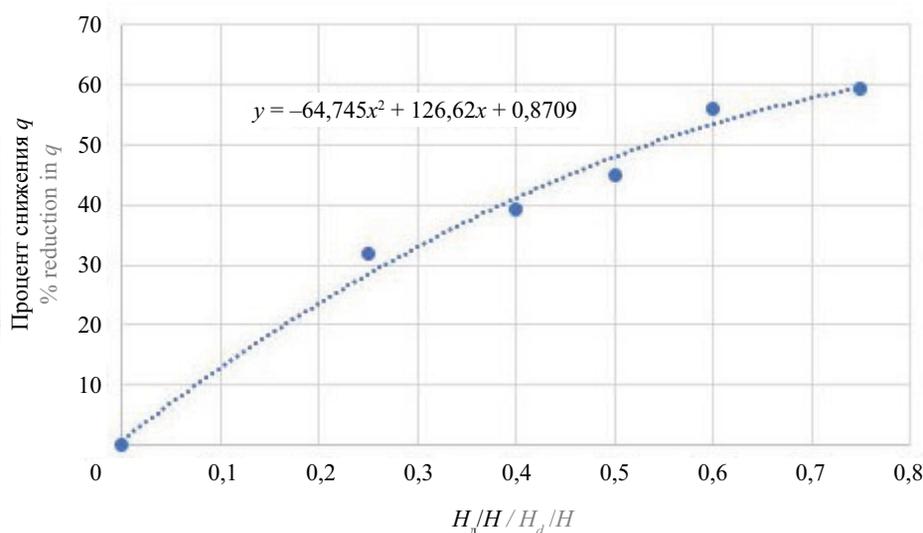


Рис. 5. Процент снижения фильтрационного расхода при различной высоте диафрагмы по отношению к фильтрационному расходу в случае отсутствия диафрагмы

Fig. 5. Percentage of reduction of seepage discharge at different diaphragm heights in relation to the seepage discharge in the absence of the diaphragm

На рис. 6 представлено влияние изменения высоты диафрагмы на величину максимальной скорости в поперечном сечении плотины при расположении диафрагмы в середине поперечного сечения плотины. Для плотин без диафрагмы максимальная скорость возникает на поверхности низового бьефа. Когда присутствует диафрагма, максимальная скорость в поперечном сечении плотины появляется в самой высокой точке диафрагмы и увеличивается по мере увеличения высоты диафрагмы, потому что она действует как препятствие для потока и уменьшает

площадь фильтрации, вызывая увеличение скорости в соответствии с уравнением неразрывности.

На рис. 7 приведено влияние изменения положения диафрагмы на общий фильтрационный расход через земляную плотину. Установлено, что величина общего фильтрационного расхода несколько снижается при смещении шпунта вниз по течению. Это может быть связано с уменьшением расстояния между верхним концом диафрагмы и депрессионной линией по мере того, как диафрагма смещается вниз по течению. Уменьшенное расстояние создает

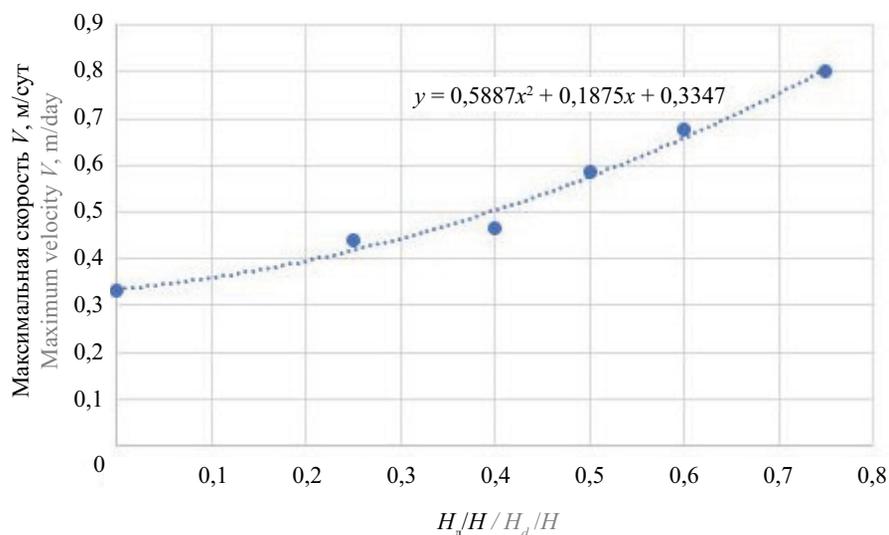


Рис. 6. Влияние изменения высоты диафрагмы на максимальную скорость в поперечном сечении плотины (расположение диафрагмы в середине поперечного сечения плотины)

Fig. 6. Effect of changing the height of the diaphragm on the maximum velocity in the cross section of the dam (location of the diaphragm in the middle of the cross section of the dam)

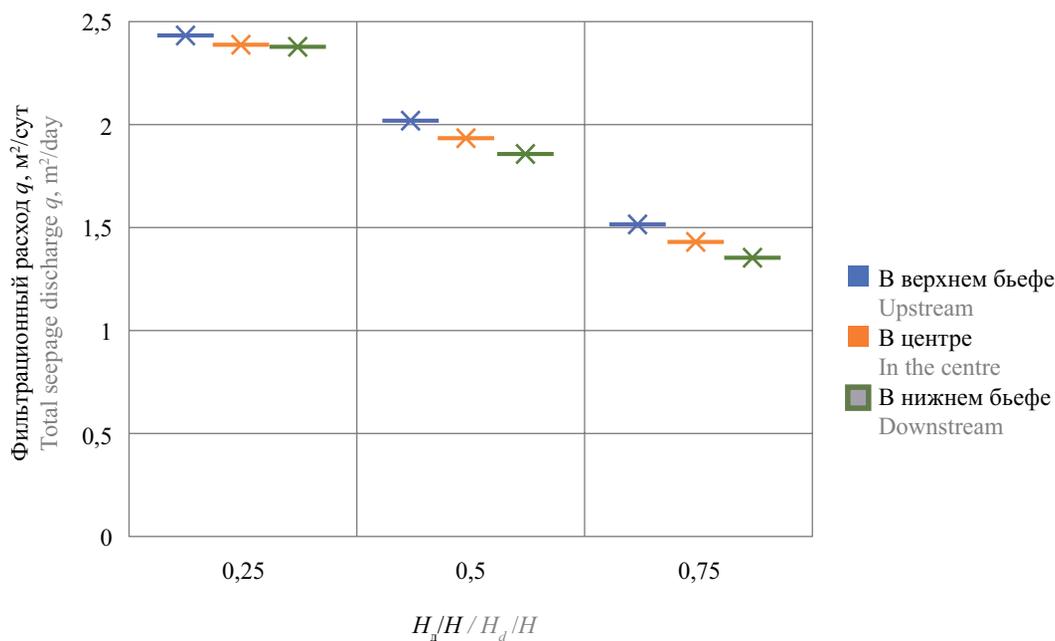


Рис. 7. Влияние изменения расположения диафрагмы от верхнего до нижнего бьефа на общий фильтрационный расход

большее сопротивление потоку и, следовательно, уменьшает общий фильтрационный расход.

Влияние изменения положения диафрагмы на максимальную скорость в поперечном сечении плотины представлено на рис. 8. Значение максимальной скорости несколько увеличивается по мере смещения диафрагмы в низовую сторону. Это можно объяснить уменьшением расстояния между верхним концом диа-

фрагмы и депрессионной линией по мере ее смещения вниз по течению, что приводит к увеличению скорости.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение диафрагмы уменьшает общий фильтрационный расход, но увеличивает значение скорости на верхнем конце диафрагмы. При расположении диафрагмы в середине поперечного сече-

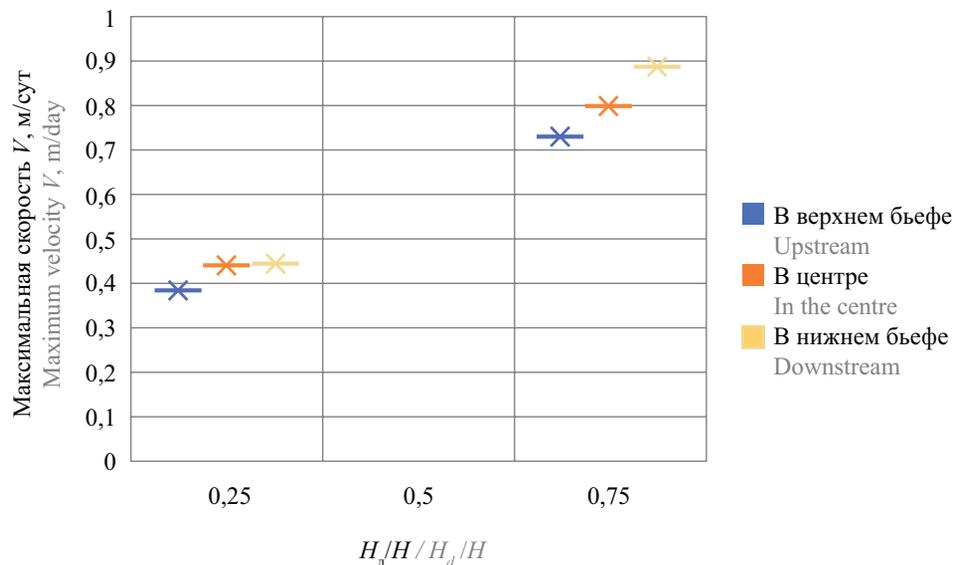


Рис. 8. Влияние изменения расположения диафрагмы от верхнего до нижнего бьефа на максимальную скорость

Fig. 8. The effect of changing the location of the diaphragm from the upstream to the downstream on maximum velocity

ния плотины увеличение высоты диафрагмы снижает общий фильтрационный расход через плотину на 31,93 % от его значения без диафрагмы для  $H_d/H = 0,25$  и до 59,33 % от его значения без диафрагмы для  $H_d/H = 0,75$ . Расчеты показали, что максимальная скорость фильтрационного потока была зафиксирована в верхней части диафрагмы, причем величина максимальной скорости прямо пропорциональна высоте диафрагмы. Поэтому для уменьшения фильтрации рекомендуется увеличить высоту диафрагмы

и проверить, чтобы максимальная скорость не превышала критическую. Превышение критической скорости может привести к повреждению диафрагмы.

Расположение диафрагмы незначительно влияет на величину фильтрационного расхода и максимальной скорости через поперечное сечение плотины. При смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа фильтрация несколько уменьшается. Значение максимальной скорости фильтрационного потока несколько увеличивается при смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарелина С.А., Давлатишоев С.К., Латышевко К.П., Обиджони Ш.К., Курбанов Н.Б. Повышение безопасности гидротехнических сооружений. Часть 2. На примере водохранилища Нурекской ГЭС на реке Вахш. Химки : АГЗ МЧС России, 2021. 192 с.

2. Hogeboom R.J., Knook L., Hoekstra A.Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation // *Advances in Water Resources*. 2018. Vol. 113. Pp. 285–294. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.028

3. Ахметов Е.М., Асемов К.М., Жуматаева М.О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 4. С. 70–83. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595. EDN ZOWQSP.

4. Zhang W., Shen Z., Ren J., Bian J., Xu L., Chen G. Multifield coupling numerical simulation of the seepage and stability of embankment dams on deep overburden layers // *Arabian Journal for Science and*

*Engineering*. 2022. Vol. 47. Issue 6. Pp. 7293–7308. DOI: 10.1007/s13369-021-06112-6

5. Sjødahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010. Vol. 69. Issue 4. Pp. 643–658. DOI: 10.1007/s10064-010-0314-y

6. Liu Z.H., Shen Z.Z., Qing W.W., Xiong S.F., Gan L. Anti-seepage evaluation of reinforcement effect for Fengchan earth dam // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 753. Pp. 290–294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.753.290

7. Wang F., Tulamaiti Y., Fang H., Yu X., Zhou C. Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method // *Structures*. 2023. Vol. 47. Pp. 358–373. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.060

8. Li J., Zhang J., Wang Y., Wang B. Seismic Response of Earth Dam with Innovative Polymer Anti-seepage Wall // *International Journal of Geomechanics*.

2020. Vol. 20. Issue 7. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001664

9. Саинов М.П., Кудрявцев Г.М. Расчетное исследование фильтрационной прочности скального основания плотины Кандаджи // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 24–29. EDN OWEBLR.

10. Fell R., Wan C.F., Cuganiewicz J., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 4. Pp. 307–314. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307)

11. Смуров А.В., Балакин А.П. Современные технологии обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 390–392. EDN BBNRVU.

12. Vincent K.K., Muthama M.N., Muoki S.N. Darcy's law equation with application to underground seepage in earth dams in calculation of the amount of seepage // American Journal of Applied Mathematics and Statistics. 2014. Vol. 2. Issue 3. Pp. 143–149. DOI: 10.12691/ajams-2-3-8

13. Sazzad M.M., Roy M., Rahman M.S. Comparison between numerical and analytical solution of seepage flow through earth dam // 2nd International Conference on Advances in Civil Engineering. 2014.

14. Abdelgawad H.A.A., Shamaa M. Seepage through earth dams with horizontal filters and found-

ed on impervious foundation (numerical analysis with boundary element method). 2004.

15. Irzooki R.H. Computation of Seepage through Homogenous Earth Dams with Horizontal Toe Drain // Engineering and Technology Journal. 2016. Vol. 34. Issue 3. Pp. 430–440. DOI: 10.30684/etj.34.3a.1

16. Abhilasha M., Balan T.G.A. Numerical analysis of seepage in Embankment dams // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). 2014. Vol. 4. Pp. 13–23.

17. Al-Janabi A.M.S., Ghazali A.H., Ghazaw Y.M., Afan H.A., Al-Ansari N., Yaseen Z.M. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 6. P. 2490. DOI: 10.3390/su12062490

18. Arshad I., Babar M.M. Comparison of SEEP/W simulations with field observations for seepage analysis through an earthen dam (Case study: Hub Dam — Pakistan) // International Journal of Research. 2014. Vol. 1. Issue 7.

19. Shayan H.K., Tokaldany E.A. Effects of blanket, drains, and cut-off wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structure // International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 13. Issue 4. Pp. 486–500. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.486

20. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П. и др. Гидротехнические сооружения. Часть 1 : учебник. М., 2008. 576 с.

Поступила в редакцию 25 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 2 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Генрих Васильевич Орехов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrehovGVgsu.ru;

**Чан Мань Кыонг** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; cuonghtcs@gmail.com.

Вклад авторов:

Орехов Г.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Чан Мань Кыонг — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Garelina S.A., Davlatshoev S.K., Latyshenko K.P., Obidzhoni Sh.K., Kurbonov N.B. *Improving the safety of hydraulic structures. Part 2. Using the example of the Nurek hydroelectric power station reservoir on the Vakhsh River*. Khimki, AGZ EMERCOM of Russia, 2021; 192. (rus.).

2. Hogeboom R.J., Knook L., Hoekstra A.Y. The blue water footprint of the world's artificial reser-

voirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources*. 2018; 113:285-294. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.028

3. Akhmetov Ye.M., Assemov K.M., Zhumataeva M.O. Research of accidents of hydraulic structures and safety control methods. *Bulletin of the Tomsk*

Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2020; 331(4):70-83. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595. EDN ZOWQSP. (rus.).

4. Zhang W., Shen Z., Ren J., Bian J., Xu L., Chen G. Multifield Coupling Numerical Simulation of the Seepage and Stability of Embankment Dams on Deep Overburden Layers. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022; 47(6):7293-7308. DOI: 10.1007/s13369-021-06112-6

5. Sjødahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010; 69(4):643-658. DOI: 10.1007/s10064-010-0314-y

6. Liu Z.H., Shen Z.Z., Qing W.W., Xiong S.F., Gan L. Anti-seepage evaluation of reinforcement effect for Fengchan earth dam. *Key Engineering Materials*. 2017; 753:290-294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.753.290

7. Wang F., Tulamaiti Y., Fang H., Yu X., Zhou C. Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method. *Structures*. 2023; 47:358-373. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.060

8. Li J., Zhang J., Wang Y., Wang B. Seismic response of earth dam with innovative polymer antiseepage wall. *International Journal of Geomechanics*. 2020; 20(7). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001664

9. Sainov M.P., Kudryavtsev G.M. Estimated research of filtering strength bedrock of the dam Kandadji. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 5:24-29. EDN OWEBLR. (rus.).

10. Fell R., Wan C.F., Cyganiewicz J., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003; 129(4):307-314. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307)

11. Smurov V., Balakin A.P. Modern technologies to ensure the safety of hydraulic structures. *Mod-*

*ern Technologies for Civil Defense and Emergency Response*. 2019; 1(10):390-392. EDN BBNRVU. (rus.).

12. Vincent K.K., Muthama M.N., Muoki S.N. Darcy's Law Equation with Application to Underground Seepage in Earth Dams in Calculation of the Amount of Seepage. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*. 2014; 2(3):143-149. DOI: 10.12691/ajams-2-3-8

13. Sazzad M.M., Roy M., Rahman M.S. Comparison between numerical and analytical solution of seepage flow through earth dam. *2nd International Conference on Advances in Civil Engineering*. 2014.

14. Abdelgawad H.A.A., Shamaa M. *Seepage through earth dams with horizontal filters and founded on impervious foundation (numerical analysis with boundary element method)*. 2004.

15. Irzooki R.H. Computation of seepage through homogenous earth dams with horizontal toe drain. *Engineering and Technology Journal*. 2016; 34(3):430-440. DOI: 10.30684/etj.34.3a.1

16. Abhilasha M., Balan T.G.A. Numerical analysis of seepage in Embankment dams. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2014; 4:13-23.

17. Al-Janabi A.M. S., Ghazali A.H., Ghazaw Y.M., Afan H.A., Al-Ansari N., Yaseen Z.M. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage. *Sustainability*. 2020; 12(6):2490. DOI: 10.3390/su12062490

18. Arshad I., Babar M.M. Comparison of SEEP/W Simulations with field observations for seepage analysis through an earthen dam (Case Study: Hub Dam — Pakistan). *International Journal of Research*. 2014; 1(7).

19. Shayan H.K., Tokaldany E.A. Effects of blanket, drains, and cut-off wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structure. *International Journal of Civil Engineering*. 2015; 13(4):486-500. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.486

20. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P. et al. *Hydraulic structures. Part 1 : textbook*. Moscow, 2008; 576. (rus.).

Received October 25, 2023.

Adopted in revised form on November 11, 2023.

Approved for publication on December 2, 2023.

**B I O N O T E S :** **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrekhovGV@mgsu.ru;

**Tran Manh Cuong** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; cuonghtcs@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Genrikh V. Orekhov — the idea of the article, scientific guidance, formulation of the research concept.*

*Tran Manh Cuong — analysis of sources and literature, construction of an experimental model, analysis of the results obtained, formulation of conclusions on the article.*

*The authors declare no conflict of interest.*