

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 626
DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.6-17

Фильтрация дамбы верхнего бассейна гидроаккумулирующей станции

Николай Алексеевич Анискин, Андрей Владимирович Ступивцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Грунтовые плотины и дамбы из мелкозернистых грунтов являются распространенными сооружениями. Их широкое использование в гидротехническом строительстве объясняется экономичностью вследствие применения местных материалов. Часто в таких конструкциях используются глинистые грунты как для укладки в призмы плотины, так и для устройства противофильтрационных элементов. Однако укладка глинистого грунта сопряжена с некоторыми ограничениями, связанными с климатическими условиями строительства. Это сказывается на времени строительства и в конечном итоге — на стоимости сооружения. Рассмотрена возможность замены части глинистого грунта дамбы на песчаный грунт, укладка которого не зависит в такой степени от погодных условий. Такая замена требует дополнительной проверки сооружения с точки зрения ее фильтрационной работоспособности. Проведено исследование фильтрационного режима дамбы бассейна гидроаккумулирующей станции (ГАЭС), возведенной с использованием всепогодной технологии укладки грунта. Рассматривались ограждающая дамба бассейна ГАЭС из смешанных грунтов на нескальном основании высотой 32,0 м, заложением верхового откоса 1:6,0, низового откоса — 1:3,5; 9 вариантов конструкции с различными конструктивными элементами.

Материалы и методы. Расчеты фильтрации грунтовой плотины для установившегося и неустановившегося режимов плотины проведены численным методом конечных элементов в локально-вариационной постановке с помощью программного комплекса FILTR.

Результаты. Для рассмотренных вариантов конструкции земляной дамы получены параметры фильтрационного потока: положение депрессионной кривой, величины фильтрационного расхода и градиента. Сделаны рекомендации по выбору конструкции.

Выводы. Исследования показали, что возможно использовать смешанный грунт, укладываемый по всепогодной технологии, в призмах грунтовой дамбы вместо части глинистого грунта при их послойной укладке. Фильтрационный режим сооружения совместно с основанием при этом не вызывает опасения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: земляная дамба, фильтрационный поток, депрессионная кривая, фильтрационный расход, градиент фильтрации, численные методы расчета, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Ступивцев А.В. Фильтрация дамбы верхнего бассейна гидроаккумулирующей станции // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 2. С. 6–17. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.6-17

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, anisikin@mgsu.ru.

Filtration of the dam of the PSPP upper basin

Nikolai A. Aniskin, Andrey V. Stupivtsev

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

ABSTRACT

Introduction. Ground dams and levees made of fine-grained soils are very common structures. Their widespread use in hydraulic engineering is explained by their cost-effectiveness due to the use of local materials. Clay soils are often used in such structures both for laying in the prisms of the dam and for the installation of anti-filtration elements. However, the laying of clay soil is associated with some restrictions related to the climatic conditions of construction. During the rainy period or

during the period of snowfall and exposure to negative temperatures, the laying of such soil slows down due to the need to apply special measures, or stops altogether. This affects the time of construction and, ultimately, the cost of construction. The possibility of replacing part of the clay soil of the dam with sandy soil, the laying of which does not depend to such an extent on weather conditions, is considered. However, such a replacement requires additional verification of the structure in terms of its filtration capacity. A study of the filtration regime of the dam of the basin of the PSPP, built using all-weather technology of soil laying, was carried out. The parameters of the filtration flow for various design variants are obtained. Recommendations are given on the choice of an option for an underground dam. The enclosing dam of the PSPP basin made of mixed soils on a non-slip foundation with a height of 32.0 m, laying an upper slope of 1:6.0, and a lower slope of 1:3.5 was considered. 9 design options with various structural elements were considered.

Materials and methods. Calculations of soil dam filtration for steady state and unsteady dam regimes were carried out using the numerical finite element method in the local variational formulation using the FILTR software package.

Results. As a result of the research, the parameters of the filtration flow were obtained for the considered variants of the earthwork design: the position of the depression curve, the values of the filtration flow rate and the gradient. Recommendations on the choice of design are made.

Conclusions. Studies have shown that it is possible to use mixed soil laid using all-weather technology in the prisms of a soil dam instead of part of the clay soil when they are layered. At the same time, the filtration regime of the structure together with the foundation does not cause concern.

KEYWORDS: earthen dam, filtration flow, depression curve, filtration flow rate, filtration gradient, numerical calculation methods, finite element method

FOR CITATION: Aniskin N.A., Stupitvsev A.V. Filtration of the dam of the PSPP upper basin. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(2):6-17. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.6-17

Corresponding author: Nikolai A. Aniskin, aniskin@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Грунтовые водоподпорные сооружения и дамбы являются самым распространенным типом гидротехнических сооружений вследствие доступности и относительной дешевизны используемых материалов. Вместе с тем при возведении таких сооружений с использованием глинистых грунтов необходимо соблюдать определенные требования по влажности укладки и уплотнению. Укладка глинистых грунтов затрудняется в период дождей и зимнее время при выпадении снега и воздействии отрицательных температур.

Рассматривается возможность замены части насыпи глинистого грунта на более удобоукладываемый песчаный грунт. Однако такая замена должна быть обоснована с точки зрения обеспечения необходимого фильтрационного режима сооружения. Замена на более проницаемый грунт может привести к нежелательному изменению параметров фильтрационного режима: изменению положения депрессионной кривой, увеличению фильтрационного расхода и градиента фильтрации [1].

Применительно к рассматриваемой дамбе верхнего аккумулирующего бассейна задача осложняется условиями работы сооружения. Дамба подвержена воздействию многократно повторяющегося цикла сработки — наполнения верхнего бассейна. В соответствии с правилами эксплуатации уровень верхнего бассейна изменяется в соответствии с режимом работы гидроаккумулирующей станции (ГАЭС). В ночное время ГАЭС работает в насосном режиме. При этом уровень верхнего бассейна поднимается на 9,5 м с отметки 257,0 до отметки нормального подпорного уровня (НПУ) 266,5 м. При работе в турбинном режиме происходит снижение

уровня воды в пределах тех же отметок. Время наполнения верхнего бассейна составляет 8 ч, время сработки — 6,5. Таким образом, скорость сработки по высоте составляет почти 1,5 м/ч, что является достаточно высоким параметром [2, 3].

В практике гидротехники известно много случаев возникновения аварийных ситуаций и аварий при снижении уровня верхнего бьефа [3–6]. В верховой призме грунтовой плотины возникает движение фильтрационного потока, направленного к поверхности верхнего откоса. Это может вызвать появление недопустимых фильтрационных деформаций и обрушение откоса [4, 5].

Постоянное изменение уровня воды в бассейне вследствие технологии процесса работы гидроаккумулирующей станции (ГАЭС) вызывает в дамбе и ее основании неустановившийся фильтрационный поток. Решение такой задачи даже при современном развитии вычислительных методов и средств представляется достаточно сложным. Для численного решения рассматриваемой задачи использован метод конечных элементов (МКЭ) в локально-вариационной постановке [7–9].

В данной работе рассматривается несколько вариантов конструкции грунтовой дамбы, для которых выполнено численное решение задачи неустановившейся фильтрации. На основе полученных результатов проведен анализ влияния изменяемых параметров конструкции дамбы на фильтрационный режим сооружения. Сделаны выводы и сформулированы рекомендации по оптимизации конструкции с точки зрения фильтрационной надежности сооружения.

Оценка фильтрационной прочности грунта и устойчивости грунтовой плотины при изменении уровня воды в бьефах основана на решении зада-

чи неустановившейся фильтрации. Теоретические основы движения жидкости в пористой полностью насыщенной среде были сформулированы Н.Е. Жуковским [10]. Предложенные им дифференциальные уравнения в частных производных легли в основу решения задач неустановившейся фильтрации. Однако сложность решения дифференциальных уравнений в полной постановке вызвала развитие приближенных инженерных методов. Одно из направлений исследований базировалось на гидравлической теории, основным допущением которой являлось постоянство по вертикальному сечению фильтрационного потока его скорости в горизонтальном направлении. Эти допущения были сформулированы и описаны в виде дифференциального уравнения Буссинеском [10, 11].

Впоследствии ряд исследований показал, что принятые упрощения могут привести к искажению результатов [11, 12]. Это способствовало дальнейшему развитию методов решения, в частности аналитических [13] и гидравлических [14, 15]. В силу сложности решаемой задачи и несовершенства этих методов рассматривались задачи, как правило, в упрощенной постановке, что не позволило сделать обобщающие выводы о необходимых мерах по исключению аварийных ситуаций.

На современном этапе задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах и основаниях в наиболее полной постановке решаются с использованием численных методов [16–22], позволяющих учесть множество действующих факторов (проницаемость грунтов плотины, ее геометрические характеристики, скорости и величины сработки и т.д.), и получить подробную картину изменения фильтрационного процесса и его основных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При решении задач неустановившейся фильтрации с помощью МКЭ пористая среда, в которой происходит движение фильтрационного потока, может рассматриваться как ненасыщенная, так и полностью насыщенная.

Применительно к рассматриваемой задаче, когда изменяется уровень воды в водохранилище, поры грунта, не полностью заполненные водой, насыщаются (когда уровень воды растет) или из них оттекает вода (когда уровень воды понижается). Для описания зависимости проницаемости грунта от его водонасыщения чаще всего применяются геотриационные модели, чтобы описывать фильтрационные свойства широкого спектра грунтов [23–25]. Широкое распространение получила модель Ван-Генухтена [24], применяемая для решения задач неустановившейся фильтрации, в том числе численными методами.

Если фильтрация проходит в полностью насыщенных водой грунтах, неизвестная функция напора $H = f(x, y, z, t)$, зависящая от координат и времени, определяется из решения дифференциального уравнения теории фильтрации с известными граничными условиями [7–9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \mu \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где K_x, K_y, K_z — коэффициенты фильтрации в направлениях осей X, Y, Z ; μ — коэффициент водоотдачи (водопоглощения) грунта.

С использованием вариационного исчисления решение уравнения (1) сводится к минимизации функционала Φ применительно к расчетной области [7–9]:

$$\Phi = \iiint_V \left\{ \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \frac{\partial H}{\partial t} H \right\} dx dy dz. \quad (2)$$

Определение минимума функционала и соответствующее ему распределение искомой напорной функции $H(x, y, z, t)$ выполнялось с помощью МКЭ в локально-вариационной постановке.

В данной работе для решения задачи неустановившейся фильтрации используется программный комплекс FILTR, хорошо зарекомендовавший себя ранее для решения подобных задач [7–9].

Цель исследования — оценка возможности возведения дамбы верхнего бассейна с использованием грунта, укладываемого по всепогодной технологии. Также анализируется влияние выбранных параметров на фильтрационный режим сооружения.

Исследовался фильтрационный режим дамбы верхнего бассейна ГАЭС со следующими параметрами (схема конструкции дамбы представлена на рис. 1): высота 32,0 м, заложение верхового откоса 1:6,0, низового 1:3,5, ширина по гребню 10,0 м. Верховая и низовая призмы выполнены путем послойной укладки с укаткой чередующихся слоев одинаковой толщины различного состава и проницаемости: смешанных грунтов с коэффициентом фильтрации $K_\phi = 0,01$ м/сут и смешанных грунтов, укладываемых по всепогодной технологии с $K_\phi = 0,5$ м/сут. По верховому откосу дамбы устроен противотриационный экран из суглинка с коэффициентом фильтрации $K_\phi = 0,005$ м/сут. По низовому откосу выполнена отсыпка из смешанных грунтов с коэффициентом фильтрации $K_\phi = 0,01$ м/сут. Для перехвата потока, профильтровавшего через

верховую призму, по оси дамбы устроен вертикальный дренаж толщиной 2,0 м из песчаного грунта с $K_{\phi} = 1,0$ м/сут, соединенный на нижних отметках с горизонтальным дренажем, выполненным вдоль подошвы низовой призмы. Горизонтальный дренаж входит в водосборный коллектор. Грунт основания дамбы характеризуется проницаемостью с $K_{\phi} = 0,02$ м/сут. В качестве переменных параметров, влияющих на фильтрационный режим сооружения, рассматривались толщины слоев грунтов призм дамбы, толщина отсыпки вдоль низового откоса, длина горизонтального дренажа и высотное положение водосборного коллектора.

Рассмотренные варианты конструкции дамбы с соответствующими им значениями изменяемых параметров представлены в табл. 1. На рис. 1 приведены расчетные схемы вариантов 1 и 7.

Фильтрационный режим сооружения совместно с основанием исследовался при снижении уровня верхнего бьефа с отметки НПУ 266,5 до отметки сработки 257,0 за время 6,5 ч с равномерной по высоте скоростью снижения воды.

В качестве параметров для сравнения результатов выбраны следующие величины: минимальное расстояние от поверхности откоса до депрессионной кривой, м; максимальные градиенты напора в экране и на входе фильтрационного потока в трубчатый дренаж; удельный фильтрационный расход через дамбу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение задачи неустановившейся фильтрации в дамбе верхнего бассейна ГАЭС позволило ответить на вопрос о возможности комбинированной укладки грунтов в тело дамбы с чередованием слоев из смешанных глинистых грунтов и смешанных грунтов, укладываемых по всепогодной технологии. Результаты расчетов для всех вариантов сведены в табл. 2.

Результаты расчетов для 1-го и 7-го вариантов (табл. 1) с полученными положениями депрессионной поверхности и распределением линий равных напоров в расчетной области представлены

Табл. 1. Варианты конструкции грунтовой дамбы

Изменяемые параметры	Варианты конструкции грунтовой плотины							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Толщина слоев, укладываемых в центральную часть дамбы, м	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Толщина отсыпки вдоль низового откоса насыпи из смешанных грунтов с $K_{\phi} = 0,01$ м/сут, м	5,0	5,0	10,0	10,0	5,0	5,0	10,0	10,0
Отметка устройства водосборного коллектора	239,0	240,0	240,0	239,0	239,0	240,0	240,0	239,0
Расстояние от оси дамбы до водосборного коллектора	103,0	79,0	79,0	103,0	103,0	79,0	79,0	103,0

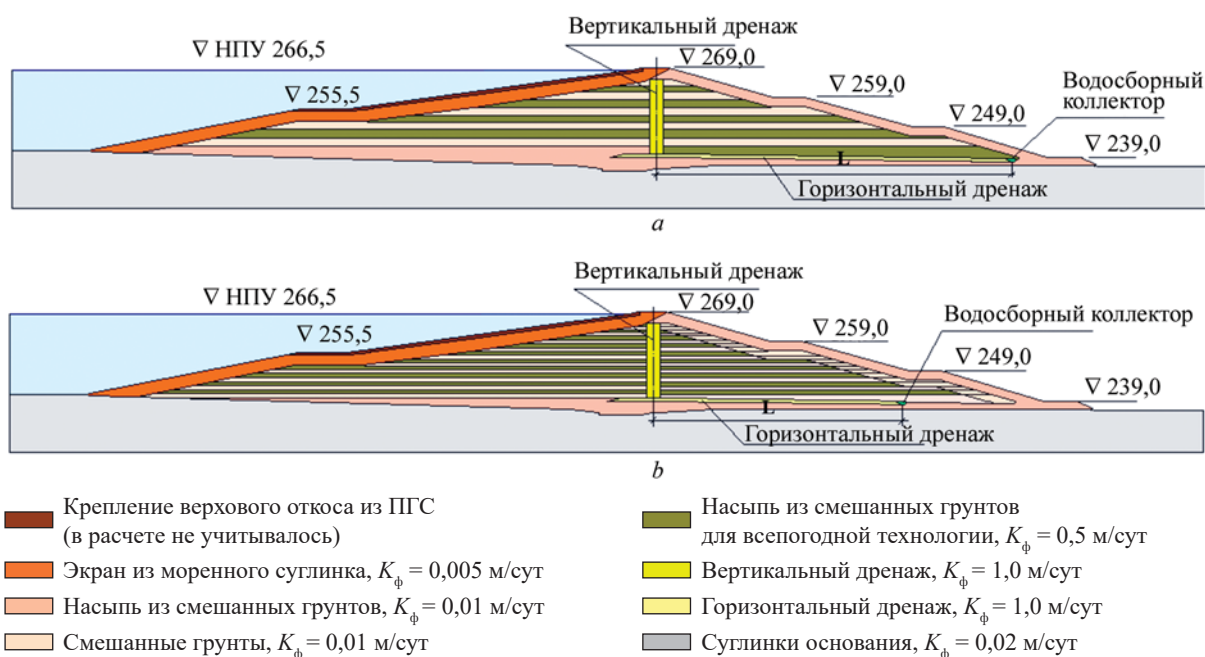


Рис. 1. Расчетная схема фильтрационного расчета дамбы: а — вариант 1; б — вариант 7

Табл. 2. Результаты фильтрационных расчетов

Номер варианта	Минимальное расстояние от поверхности откоса до депрессионной кривой, м	Максимальный фильтрационный градиент		Удельный фильтрационный расход через дамбу	
		в экране	на входе фильтрационного потока в трубчатый дренаж	м ³ /сут	м ³ /с
1	4,0	1,70	1,03	1,44	1,66 · 10 ⁻⁵
2	7,0	1,97	1,08	0,98	1,13 · 10 ⁻⁵
3	7,0	1,99	1,09	0,98	1,13 · 10 ⁻⁵
4	3,9	1,62	1,04	1,42	1,64 · 10 ⁻⁵
5	3,7	1,64	1,06	1,36	1,57 · 10 ⁻⁵
6	9,4	2,21	0,51	0,96	1,11 · 10 ⁻⁵
7	9,2	2,13	0,52	0,96	1,11 · 10 ⁻⁵
8	3,6	1,68	1,05	1,35	1,56 · 10 ⁻⁵
9	6,0	1,36	0,75	0,53	0,61 · 10 ⁻⁵

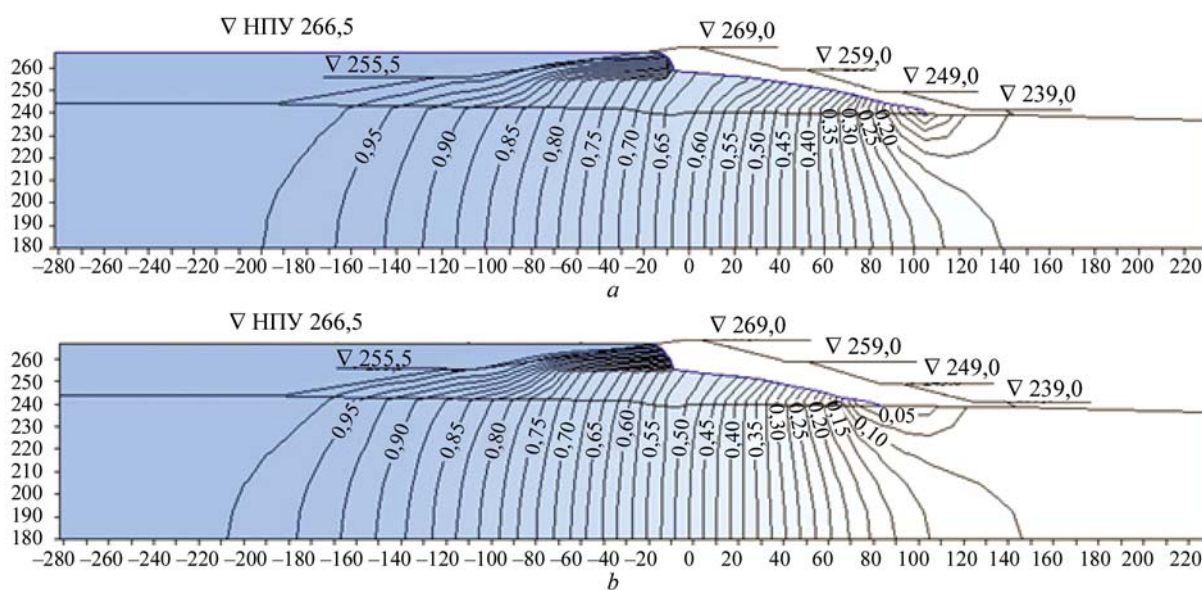


Рис. 2. Результаты фильтрационного расчета дамбы: а — вариант 1; б — вариант 7

на рис. 2. Шаг между соседними линиями принят равным $0,025H$, где H — значение полного фильтрационного напора, действующего в рассматриваемый момент времени.

Показаны результаты на момент полностью наполненного верхнего бьефа, для которого получены максимальные параметры фильтрационного потока.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. В наибольшей степени на параметры фильтрационного потока влияет расположение водосборного коллектора (рассмотрены варианты его расположения на расстоянии 103,0 и 79,0 м от оси дамбы).

Остальные рассмотренные факторы практически не влияют на параметры фильтрационного потока.

Для всех исследованных вариантов величины фильтрационных градиентов в экране и на входе в водосборный коллектор не выходят за пределы до-

пустимого. Максимальные фильтрационные градиенты в экране изменяются в пределах от 1,62 до 2,21, максимальные градиенты на входе фильтрационного потока в коллектор — от 0,51 до 1,09. Удельный фильтрационный расход через дамбу и часть прилегающего основания незначителен и изменяется в зависимости от варианта от 0,96 до 1,44 м³/сут на погонный метр дамбы.

На положение депрессионной поверхности достаточно сильно влияет расположение водосборного коллектора. При расположении коллектора на расстоянии 103,0 м от оси дамбы (первоначальный вариант) минимальное расстояние от депрессионной поверхности до поверхности низового откоса составляет для рассмотренных вариантов от 3,6 до 4,0 м, что удовлетворяет требованию по глубине промерзания грунта в зимний период. Более благоприятным с этой точки зрения является вариант расположения коллектора на расстоянии 79,0 м от оси

дамбы. В этом случае заглубление депрессионной поверхности от поверхности откоса составляет от 7,0 до 9,4 м.

Учет нестационарности фильтрационного потока, вызванной сработкой и наполнением верхнего бассейна, улучшает фильтрационный режим дамбы по сравнению со стационарными решениями. Прежде всего, это сказывается на понижении депрессионной поверхности по сравнению со случаем постоянно наполненного бассейна.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о возможности послойной укладки грунта различной проницаемости при заданных характеристиках грунтов и нормальной работе противофильтрационных элементов в теле дамбы ГАЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Замена части моренного суглинка, укладываемого в призмы грунтовой дамбы, на песчаный грунт,

укладываемый по всепогодной технологии, не приводит к критическим изменениям фильтрационного потока в сооружении: величины фильтрационного расхода и максимальных градиентов фильтрации не превышают допустимых пределов. Удельный фильтрационный расход для всех рассмотренных вариантов находится в интервале от 1,0 до 1,5 м³/сут на погонный метр дамбы. Максимальные градиенты напора в экране и на входе в коллектор не превышают критических величин.

Решение задач неустановившейся фильтрации для исследованных вариантов конструкции позволило сформулировать рекомендации по выбору рассмотренных параметров. Из всех факторов наибольшее влияние на формирование фильтрационного режима (в основном на положение депрессионной кривой) оказывает расположение водосборного коллектора. С точки зрения фильтрации более предпочтительное расстояние от оси плотины до оси коллектора — 79,0 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety problems related to seepage // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 10. Issue 6. Pp. 191–239.
2. Fattah M.Y., Omran H.A., Hassan M.A. Behavior of an earth dam during rapid drawdown of water in reservoir — case study // International Journal of Advanced Research. 2015. Vol. 3. Issue 10. Pp. 110–122.
3. López-Acosta N.P., Sánchez M.A., Pereira J. Soil solution, G. Auvinet J.-M. Pereira. Assessment of exit hydraulic gradients at the toe of levees in water drawdown conditions // Scour and Erosion. 2014. Pp. 171–181. DOI: 10.1201/b17703-21
4. Stark T.D., Jafari N.H., Zhindon J.S.L., Baghdady A. Unsaturated and transient seepage analysis of San Luis dam // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2017. Vol. 143. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001602
5. Vandenberg D.R. Total stress rapid drawdown analysis of the pilarcitos dam failure using the finite element method // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2014. Vol. 8. Issue 2. Pp. 115–123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
6. Беллендир Е.Н., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Т. 1. СПб. : ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003.
7. Aniskin N.A., Sergeev S.A. The effect of draw-off on filtration regime of earth-fill dam // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 40–50. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-40-50
8. Banichuk N.V., Makeev E.V. Variational method for non-classical problems of mechanics with constraints based on finite elements approximations and local variations // PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.03
9. Черноусько Ф.Л. Метод локальных вариаций для численного решения вариационных задач // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 4. С. 749–754. EDN VRTIIV.
10. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М. : Наука, 1969. 545 с.
11. Шестаков В.М. Определение гидродинамических сил в земляных сооружениях и откосах при падении уровней в бьефах // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений : сб. ВОДГЕО. 1956. № 2.
12. Muskat M. The flow of homogeneous fluids through porous media. New York : McGraw-Hill Book Company, 1937. 763 p.
13. Анахаев К.Н. О фильтрационном расчете перемычки // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 2. С. 148–158. EDN RXPMLV.
14. Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Котов Е.В., Мусорина Т.А. Слабые решения предельных задач Крокко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 3. С. 27–38. DOI: 10.18721/JPM.11303. EDN VBMEZB.
15. Chapman T.G., Dressler R.F. Unsteady shallow groundwater flow over a curved impermeable boundary // Water Resources Research. 1984.

Vol. 20. Issue 10. Pp. 1427–1434. DOI: 10.1029/WR020i010p01427

16. *Okeke A.C.U., Wang F.* Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams // *Geoenvironmental Disasters*. 2016. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1186/s40677-016-0043-z

17. *Vandenberge D.R.* Total stress rapid drawdown analysis of the pilarcitos dam failure using the finite element method // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014. Vol. 8. Issue 2. Pp. 115–123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7

18. *Billstein M.* Development of a numerical model of flow through embankment dams. Department of Environmental Engineering. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1998. P. 59.

19. *Yuan S., Zhong H.* Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 533. Pp. 403–411. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.034

20. *Yang J., Yin Z.Y., Laouafa F., Hicher P.Y.* Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media // *Acta Geotechnica*. 2019. Vol. 14. Issue 6. Pp. 1615–1627. DOI: 10.1007/s11440-019-00808-8

21. *Al-Labban S.* Seepage and stability analysis of the earth dams under drawdown conditions by using the finite element method // *Electronic Theses and Dissertations*. 2018. P. 6157. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/6157>

22. *Hu S., Zhou X., Luo Y., Zhang G.* Numerical simulation three-dimensional nonlinear seepage in a pumped-storage power station: case study // *Energies*. 2019. Vol. 12. Issue 1. P. 180. DOI: 10.3390/en12010180

23. *Mualet Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // *Water Resources Research*. 1976. Vol. 12. Issue 3. Pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513

24. *Van Genuchten M.T.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. Vol. 44. Issue 5. Pp. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

25. *Kosugi K.* General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution // *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Issue 2. Pp. 270–277. DOI: 10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x

Поступила в редакцию 2 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; aniskin@mgsu.ru;

Андрей Владимирович Ступивцев — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; StupivtsevAV@gmail.com.

Вклад авторов:

Анискин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, доработка текста, итоговые выводы.

Ступивцев А.В. — проведение численного эксперимента и расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Groundwater retaining structures and dams are the most common type of hydraulic structures due to the availability and relative cheapness of the materials used. However, when constructing such structures using clay soils, it is necessary to comply with certain requirements for moisture content of paving and compaction. Paving of clay soils is difficult during the rainy season and wintertime when snowfall and negative temperatures occur.

The possibility of replacing part of the clay soil embankment with more manageable sandy soil is con-

sidered. However, such replacement should be justified from the point of view of ensuring the required filtration regime of the structure. Replacement with more permeable soil may lead to undesirable changes in the filtration regime parameters: change of the depression curve position, increase of filtration flow rate and filtration gradient [1].

In the case of the upstream storage basin dam under consideration, the problem is complicated by the operating conditions of the structure. The dam is exposed to the repeatedly repeated cycle of upper basin drawdown and filling. In accordance with the operating

rules, the level of the upper basin changes in accordance with the operation mode of the pumped storage power plant (PSPP). At night, the PSPP operates in pumping mode. In this case the level of the upper basin rises by 9.5 metres from the level of 257.0 to the normal retaining level (NRL) of 266.5 metres. During operation in turbine mode the water level decreases within the same marks. The filling time of the upper basin is 8 hours and the drawdown time is 6.5 hours. Thus, the discharge rate by height is almost 1.5 m/h, which is a rather high parameter [2, 3].

In the practice of hydraulic engineering, many cases of emergencies and accidents are known to occur when the level of the upstream slope decreases [3–6]. In the upstream prism of an earth dam, there is a movement of filtration flow directed towards the surface of the upstream slope. This can cause unacceptable filtration deformations and slope collapse [4, 5].

Constant change of water level in the basin due to the process technology of the hydro-storage power plant (HSPP) causes unsteady filtration flow in the dam and its foundation. The solution of such a problem, even with the modern development of computational methods and tools, is quite complicated. For the numerical solution of the problem under consideration, the finite element method (FEM) in the local variational formulation was used [7–9].

This paper considers several variants of the earth dam design, for which the numerical solution of the problem of unsteady filtration is performed. On the basis of the obtained results, the influence of variable parameters of the dam design on the filtration regime of the structure is analyzed. Conclusions are drawn and recommendations on optimization of the design from the point of view of filtration reliability of the structure are formulated.

The assessment of soil filtration strength and stability of the earth dam under changing water levels in the embankments is based on the solution of the problem of unsteady filtration. The theoretical basis of fluid motion in a porous fully saturated medium was formulated by N.E. Zhukovsky [10]. The partial differential equations proposed by him formed the basis for solving the problems of unsteady filtration. However, the complexity of solving differential equations in full formulation caused the development of approximate engineering methods. One of the research directions was based on the hydraulic theory, the main assumption of which was the constancy of the velocity in the horizontal direction along the vertical cross-section of the filtration flow. These assumptions were formulated and described in the form of the Boussinesq differential equation [10, 11].

Subsequently, a number of studies have shown that the simplifications adopted can distort the results [11, 12]. This contributed to the further development of solution methods, in particular, analytical [13] and hydraulic [14, 15]. Due to the complexity of the prob-

lem to be solved and the imperfection of these methods, the problems were considered, as a rule, in a simplified formulation, which did not allow drawing generalized conclusions about the necessary measures to exclude emergencies.

At the present stage, the problems of unsteady filtration in earth dams and foundations are solved in the most complete formulation using numerical methods [16–22], which make it possible to take into account many factors (permeability of dam soils, its geometrical characteristics, velocities and values of discharges, etc.) and to obtain a detailed picture of the changes in the filtration process and its main parameters.

MATERIALS AND METHODS

When solving problems of unsteady filtration using FEM, the porous medium in which the filtration flow occurs can be considered as unsaturated or fully saturated.

For the problem under consideration, when the water level in the reservoir changes, soil pores not completely filled with water become saturated (when the water level rises) or water flows out of them (when the water level falls). Geofiltration models are most often used to describe the dependence of soil permeability on its water saturation in order to describe the filtration properties of a wide range of soils [23–25]. The Van-Genuchten model [24] is widely used for solving problems of unsteady filtration, including numerical methods.

If filtration takes place in soils completely saturated with water, the unknown head function $H = f(x, y, z, t)$, depending on coordinates and time, is determined from the solution of the differential equation of filtration theory with known boundary conditions [7–9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \mu \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

where K_x, K_y, K_z — filtration coefficients in directions of axes X, Y, Z , μ — water yield (water absorption) coefficient of soil.

Using the calculus of variations, the solution of equation (1) is reduced to minimizing the functional Φ with respect to the computational domain [7–9]:

$$\Phi = \iiint_V \left\{ \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \frac{\partial H}{\partial t} H \right\} dx dy dz. \quad (2)$$

The determination of the minimum of the functional and the corresponding distribution of the desired pressure function $H(x, y, z, t)$ was performed using FEM in the local variational formulation.

In this paper, the FILTR software package, which has proven itself earlier for solving similar problems [7–9], is used to solve the problem of unsteady filtration.

The purpose of the study is to assess the feasibility of constructing an upper basin dam using soil placed using all-weather technology. The influence of the selected parameters on the filtration regime of the structure is also analyzed.

The filtration regime of the dam of the upper basin of the hydroelectric power plant with the following parameters was studied (the scheme of the dam construction is presented in Fig. 1): height 32.0 m, top slope embedment 1:6.0, bottom slope embedment 1:3.5, crest width 10.0 m. The upper and lower prisms are made by laying alternating layers of equal thickness of different composition and permeability: mixed soils with filtration coefficient $K_f = 0.01$ m/day and mixed soils laid by all-weather technology with $K_f = 0.5$ m/day. On the upstream slope of the dam an impervious blanket

of loam with a filtration coefficient $K_f = 0.005$ m/day was constructed. On the downstream slope there is a mixed soil fill with filtration coefficient $K_f = 0.01$ m/day. To intercept the flow, filtered through the upper prism, a vertical drainage 2.0 m thick of sandy soil with $K_f = 1.0$ m/day is constructed along the dam axis, connected at the lower levels with the horizontal drainage made along the bottom of the lower prism. The horizontal drainage enters the catchment collector. The dam base soil is characterized by permeability with $K_f = 0.02$ m/day. The thickness of the soil layers of the dam prisms, the thickness of the fill along the bottom slope, the length of the horizontal drainage and the elevation of the catchment collector were considered as variables affecting the filtration regime of the structure.

The considered variants of dam design with their corresponding values of variable parameters are presented in Table 1. Fig. 1 shows the design schemes of variants 1 and 7.

The filtration regime of the structure together with the foundation was studied when the level of the upper reservoir decreased from the elevation 266.5 to the discharge elevation 257.0 during 6.5 h with a uniform rate of water decrease along the height.

Table 1. Variants of earth dam design

Variable parameters	Design options for earth dams							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Thickness of layers placed in the centre part of the dam, m	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Thickness of fill along the lower slope of an embankment made of mixed soils with $K_f = 0.01$ m/day, m	5.0	5.0	10.0	10.0	5.0	5.0	10.0	10.0
Water collector device marking	239.0	240.0	240.0	239.0	239.0	240.0	240.0	239.0
Distance from the dam axis to the catchment collector	103.0	79.0	79.0	103.0	103.0	79.0	79.0	103.0

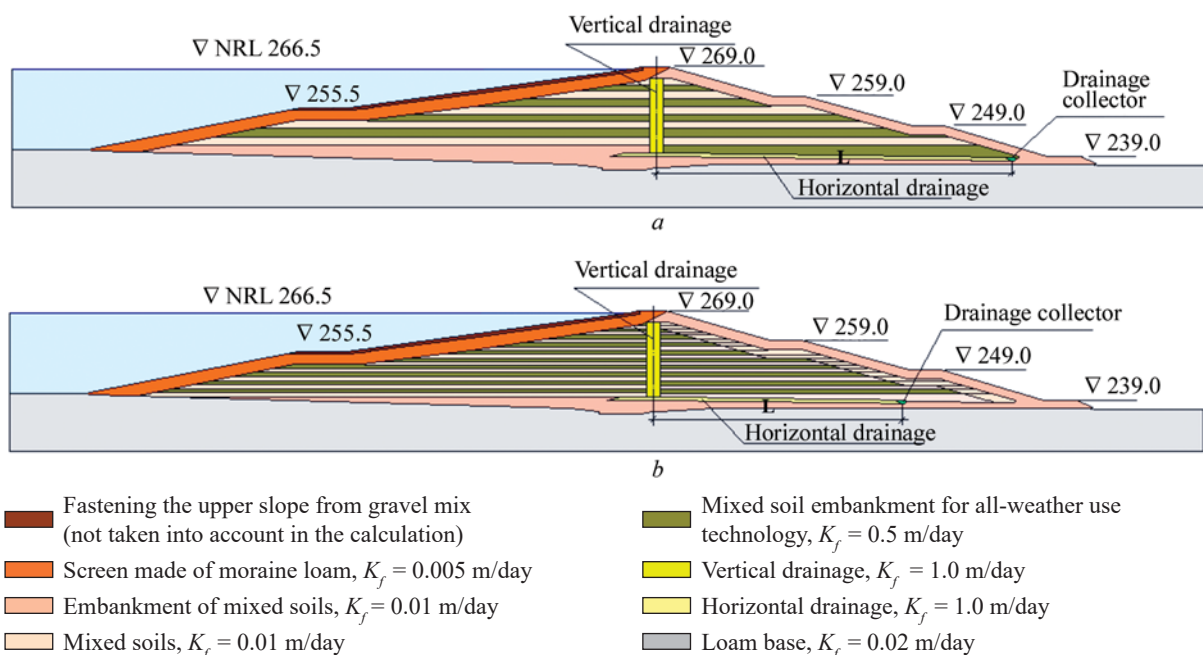


Fig. 1. Design scheme of the dam filtration calculation: a — variant 1; b — variant 7

The following values were chosen as parameters for comparison of the results: minimum distance from the slope surface to the depression curve, m; maximum head gradients in the screen and at the inlet of filtration flow into the pipe drainage; specific filtration flow rate through the dam.

RESEARCH RESULTS

The solution of the problem of unsteady filtration in the dam of the upper basin of the hydroelectric power plant allowed to answer the question about the possibility of combined soil placement in the dam body with alternating layers of mixed clayey soils and mixed soils placed using all-weather technology. The results of calculations for all variants are summarized in Table 2.

The results of calculations for the 1st and 7th variants (Table 1) with the obtained positions of the depression surface and distribution of equal head lines in

the calculation area are presented in Fig. 2. The step between neighbouring lines is taken as 0.025H, where H is the value of total filtration head acting at the considered moment of time.

The results are shown for the moment of fully filled upstream, for which the maximum filtration flow parameters are obtained.

The following conclusions can be drawn on the basis of the obtained results. The location of the catchment collector has the greatest influence on the filtration flow parameters (variants of its location at a distance of 103.0 and 79.0 m from the dam axis were considered).

The other considered factors practically do not influence the filtration flow parameters.

For all investigated variants, the values of filtration gradients in the screen and at the inlet to the catchment collector do not exceed the permissible limits. Maximum filtration gradients in the screen vary from 1.62 to 2.21, maximum gradients at the inlet of filtration flow

Table 2. Results of filtration calculations

Variant number	Minimum distance from the slope surface to the depression curve, m	Maximum filtration gradient		Specific filtration flow rate through the dam	
		Into the screen	At the inlet of the filtration flow into the pipe drainage	m ³ /day	m ³ /sec
1	4.0	1.70	1.03	1.44	1.66 · 10 ⁻⁵
2	7.0	1.97	1.08	0.98	1.13 · 10 ⁻⁵
3	7.0	1.99	1.09	0.98	1.13 · 10 ⁻⁵
4	3.9	1.62	1.04	1.42	1.64 · 10 ⁻⁵
5	3.7	1.64	1.06	1.36	1.57 · 10 ⁻⁵
6	9.4	2.21	0.51	0.96	1.11 · 10 ⁻⁵
7	9.2	2.13	0.52	0.96	1.11 · 10 ⁻⁵
8	3.6	1.68	1.05	1.35	1.56 · 10 ⁻⁵
9	6.0	1.36	0.75	0.53	0.61 · 10 ⁻⁵

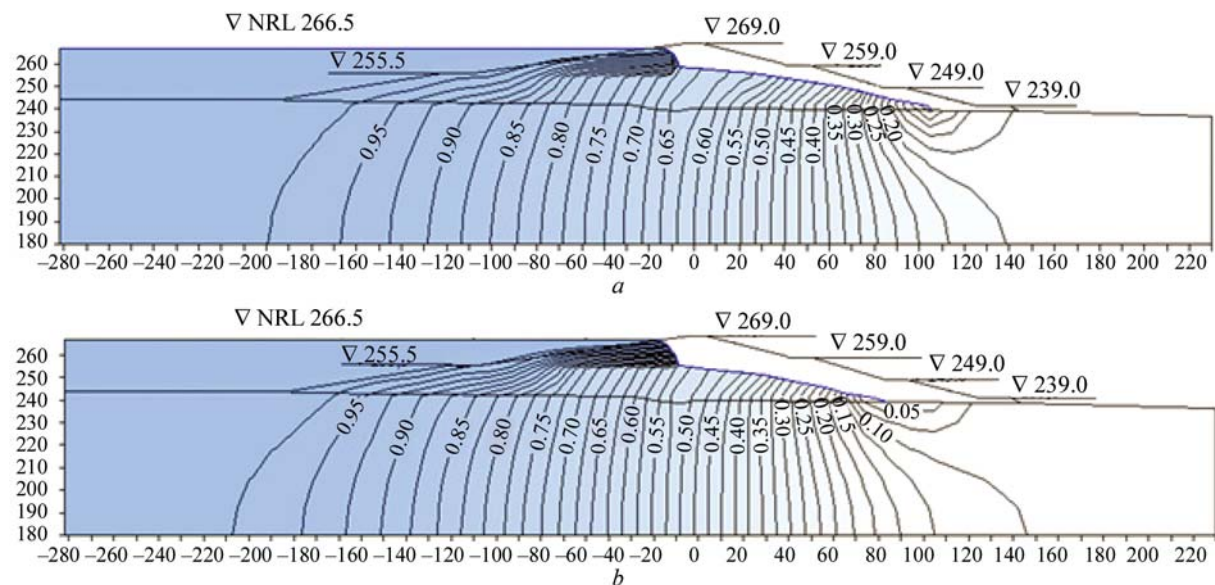


Fig. 2. Results of seepage calculation of the dam: a — variant 1; b — variant 7

into the collector — from 0.51 to 1.09. The specific filtration flow rate through the dam and part of the adjacent foundation is insignificant and varies depending on the variant from 0.96 to 1.44 m³/day per linear metre of the dam.

The position of the depression surface is strongly influenced by the location of the catchment collector. When the collector is located 103.0 m from the dam axis (the original option), the minimum distance from the depression surface to the downstream slope surface is 3.6 to 4.0 m for the options considered, which satisfies the winter freezing depth requirement. More favourable from this point of view is the option of the collector location at a distance of 79.0 m from the dam axis. In this case, the depth of the depression surface from the slope surface is from 7.0 to 9.4 m.

Taking into account the non-stationarity of the filtration flow caused by the drawdown and filling of the upper basin improves the filtration regime of the dam compared to stationary solutions. First of all, it affects the lowering of the depression surface compared to the case of a permanently filled basin.

All the above-mentioned allows to draw a conclusion about the possibility of layer-by-layer laying of

soil of different permeability at given characteristics of soils and normal operation of impervious elements in the body of the PSPP dam.

CONCLUSION

Replacement of a part of moraine loam, laid in the prisms of the earth dam, with sandy soil, laid using all-weather technology, does not lead to critical changes in the filtration flow in the structure: the values of filtration flow and maximum filtration gradients do not exceed the permissible limits. The specific filtration flow rate for all considered variants is in the range from 1.0 to 1.5 m³/day per linear metre of dam. Maximum head gradients in the screen and at the collector inlet do not exceed critical values.

The solution of unsteady filtration problems for the investigated design variants allowed us to formulate recommendations on the selection of the considered parameters. Of all the factors, the location of the catchment collector has the greatest influence on the formation of the filtration regime (mainly on the position of the depression curve). From the point of view of filtration the more preferable distance from the dam axis to the collector axis is 79.0 m.

REFERENCES

1. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety problems related to seepage. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2020; 10(6):191-239.
2. Fattah M.Y., Omran H.A., Hassan M.A. Behavior of an earth dam during rapid drawdown of water in reservoir — case study. *International Journal of Advanced Research*. 2015; 3(10):110-122.
3. López-Acosta N.P., Sánchez M.A., Pereira J. Soil Solution, G. Auvinet J.-M. Pereira. Assessment of exit hydraulic gradients at the toe of levees in water drawdown conditions. *Scour and Erosion*. 2014; 171-181. DOI: 10.1201/b17703-21
4. Stark T.D., Jafari N.H., Zhindon J.S.L., Baghdady A. Unsaturated and transient seepage analysis of San Luis dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017; 143(2). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001602
5. Vandenberge D.R. Total Stress rapid drawdown analysis of the Pilarcitos dam failure using the finite element method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014; 8(2):115-123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
6. Bellendir E.N., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V. et al. *Probabilistic methods for assessing the reliability of soil hydraulic structures. Vol. 1*. St. Petersburg, JSC VNIIG named after B.E. Vedeneva. 2003. (rus.).
7. Aniskin N.A., Sergeev S.A. The effect of draw-off on filtration regime of earth-fill dam. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):40-50. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-40-50
8. Banichuk N.V., Makeev E.V. Variational method for non-classical problems of mechanics with constraints based on finite elements approximations and local variations. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.03
9. Chernous'ko F.L. A local variation method for the numerical solution of variational problems. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1965; 5(4):749-754. EDN VRTIIV. (rus.).
10. *Development of research on filtration theory in the USSR*. Moscow, Nauka, 1969; 545. (rus.).
11. Shestakov V.M. Determination of hydrodynamic forces in earthen structures and slopes when water levels fall. *Questions of filtration calculations of hydraulic structures : collection. VODGEO*. 1956; 2. (rus.).
12. Muskat M. *The flow of homogeneous fluids through porous media*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1937; 763. (rus.).
13. Anakhaev K.N. About filtration account the crosspiece. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2011; 23(2):148-158. EDN RXPMLV. (rus.).

14. Petrichenko M.R., Zaborova D.D., Kotov E.V., Musorina T.A. Weak solutions of the crocco boundary problems. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2018; 11(3):27-38. DOI: 10.18721/JPM.11303. EDN VBMEZB. (rus.).
15. Chapman T.G., Dressler R.F. Unsteady shallow groundwater flow over a curved impermeable boundary. *Water Resources Research*. 1984; 20(10):1427-1434. DOI: 10.1029/WR020i010p01427
16. Okeke A.C.U., Wang F. Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams. *Geoenvironmental Disasters*. 2016; 3(1). DOI: 10.1186/s40677-016-0043-z
17. Vandenberghe D.R. Total stress rapid draw-down analysis of the Pilarcitos dam failure using the finite element method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014; 8(2):115-123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
18. Billstein M. *Development of a numerical model of flow through embankment dams*. Department of Environmental Engineering. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1998; 59.
19. Yuan S., Zhong H. Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method. *Journal of Hydrology*. 2016; 533:403-411. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.034
20. Yang J., Yin Z.Y., Laouafa F., Hicher P.Y. Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media. *Acta Geotechnica*. 2019; 14(6):1615-1627. DOI: 10.1007/s11440-019-00808-8
21. Al-Labban S. Seepage and stability analysis of the earth dams under drawdown conditions by using the finite element method. *Electronic Theses and Dissertations*. 2018; 6157. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/6157>
22. Hu S., Zhou X., Luo Y., Zhang G. Numerical simulation three-dimensional nonlinear seepage in a pumped-storage power station: case study. *Energies*. 2019; 12(1):180. DOI: 10.3390/en12010180
23. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976; 12(3):513-522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513
24. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980; 44(5):892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
25. Kosugi K. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 1999; 63(2):270-277. DOI: 10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x

Received May 2, 2024.

Adopted in revised form on May 12, 2024.

Approved for publication on May 28, 2024.

B I O N O T E S: **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydraulic Engineering and Energy Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; aniskin@mgsu.ru;

Andrey V. Stupivtsev — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; StupivtsevAV@gmail.com.

Contribution of the authors:

Nikolai A. Aniskin — conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, supervision.

Andrey V. Stupivtsev — gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.