

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: 10.22227/2305-5502.2022.3.1

Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища

Николай Алексеевич Анискин, Станислав Алексеевич Сергеев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из возможных факторов, действующих на устойчивость откосов грунтовой плотины, является изменение уровней воды водохранилища или нижнего бьефа. Опасным случаем может быть быстрая сработка водохранилища, связанная, например, с аварийной ситуацией или технологической необходимостью. Приводятся примеры обрушения откосов грунтовых плотин, вызванных изменением уровня воды в водохранилище; а также результаты оценки влияния сработки водохранилища на устойчивость верхового откоса. Рассматривалась однородная ограждающая дамба из суглинка на нескальном основании высотой 29 м, заложением верхового и низового откосов 1:3,5. Исследования проводились для двух случаев сработки: медленной со скоростью снижения отметки воды по вертикали $v = 0,25$ м/сут, быстрой (аварийной) со скоростью $v = 4,4$ м/сут.

Материалы и методы. Расчеты фильтрации грунтовой плотины для установившегося и неуставившегося режимов и оценка устойчивости откоса плотины проведены численным методом конечных элементов с использованием программного комплекса PLAXIS. Дается постановка исследований и теоретические основы, заложенные в расчеты фильтрации и устойчивости откосов.

Результаты. Исследования показали, что при снижении уровня воды водохранилища с большой скоростью возрастает опасность нарушения устойчивости откоса.

Выводы. В соответствии с практикой проектирования выполнена оценка изменения коэффициента устойчивости верхового откоса однородной грунтовой ограждающей дамбы с учетом снижения уровня воды в водохранилище и фильтрационных сил неуставившейся фильтрации. Рассмотрены варианты с разными скоростями сработки. Установлено, что при большой скорости сработки коэффициент устойчивости откоса уменьшается. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета фильтрационных сил неуставившейся фильтрации в оценке устойчивости откосов при проектировании однородных плотин из малопроницаемых грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сработка водохранилища, фильтрационный поток, устойчивость откоса, численные методы, расчеты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Сергеев С.А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1

Автор, ответственный за переписку: Станислав Алексеевич Сергеев, SergeevSA@mgsu.ru.

Stability of the earth dam slope during reservoir drawdown

Nikolai A. Aniskin, Stanislav A. Sergeev

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

ABSTRACT

Introduction. One of the possible factors acting on the stability of the slopes of an earth dam is the change of water levels in the reservoir or the downstream reservoir. A hazardous event can be a rapid drawdown of the reservoir due to, for example, an emergency or a technological necessity. Examples of collapse of ground dam slopes caused by changes in water level in the reservoir are given, as well as the results of estimation of the effect of reservoir drawdown on the stability of the upstream slope. A homogeneous enclosing dam made of loam on a non-rock base with a height of 29 m and upper and lower slopes of 1:3.5 was considered. The research was conducted for two cases of drawdown: slow drawdown with the rate of vertical water level decrease $v = 0.25$ m/day and fast (emergency) drawdown with the rate of $v = 4.4$ m/day.

Materials and methods. Calculations of filtration of soil dam for steady and unsteady modes and assessment of stability of

the dam slope are carried out by numerical method of finite elements using PLAXIS software package. The research statement and theoretical foundations, laid in calculations of filtration and stability of slopes are given.

Results. Researches have shown that at decrease in a water level of a reservoir with the big speed the danger of infringement of stability of a slope increases.

Conclusions. According to the practice of designing, the evaluation of change in the upper slope stability coefficient of the uniform ground protecting dike taking into account decrease of the water level in the reservoir taking into account filtration forces of unsteady filtration has been carried out. Variants with different rates of drawdown are considered. It is established that at high rates of drawdown the coefficient of slope stability decreases. The obtained results testify to necessity of taking into account filtration forces of unsteady filtration in evaluation of slope stability when designing homogeneous dams made of low-permeable soils.

KEYWORDS: reservoir drawdown, filtration flow, slope stability, numerical calculation methods

FOR CITATION: Aniskin N.A., Sergeev S.A. Stability of the earth dam slope during reservoir drawdown. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(3):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1

Corresponding author: Stanislav A. Sergeev, SergeevSA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В практике гидротехнического строительства большое внимание уделено вопросу устойчивости откосов грунтовых плотин или дамб при изменении уровня воды, которое может произойти в процессе эксплуатации сооружения. Возможна так называемая сработка водохранилища — понижение уровня воды, вызванное ее потреблением или аварийным сбросом. Снижение уровня воды иногда происходит со значительной скоростью. Оно вызывает изменение фильтрационного режима грунтовой плотины. Это выражается в изменении положения депрессионной поверхности, направлений и величин скоростей и градиентов фильтрации. Данные процессы могут привести к негативным последствиям: возникновению фильтрационных деформаций, снижению устойчивости и обрушению откосов вследствие действия появляющихся гидродинамических фильтрационных нагрузок [1–4].

В практике гидротехнического строительства известны случаи аварий на сооружениях, вызванные быстрым снижением уровня воды в верхнем бьефе [5–7].

Примером нарушения устойчивости откоса плотины из-за снижения уровня водохранилища может служить аварийная ситуация на плотине Пиларцитос (Pilarcitos Dam, Калифорнийский п-ов, Сан-Франциско, высота 23,8 м). Авария, произошедшая в 1969 г., была изучена достаточно подробно [7]. Обрушение откоса на плотине, возведенной из супесчаных грунтов, последовало после снижения уровня водохранилища на 10,7 м в течение 43 дней.

Также в качестве примера можно привести массивное обрушение откоса на плотине Сан-Луис (San Luis) высотой 116 м в Калифорнии [5]. В 1981 г. в результате понижения уровня водохранилища на 55 м за 120 дней в засушливый период произошло обрушение верхового откоса. Оползень шириной по фронту 340 м переместил в водохранилище массив грунта объемом 310 000 м³. Ремонт плотины потребовал отсыпки 1 100 000 м³ грунта, после чего работоспособность плотины была восстановлена.

Прогноз поведения конструкции грунтовых плотин при изменениях уровня воды и обеспечение ее устойчивости и безопасности является актуальной задачей [8, 9]. Ее решение состоит из двух частей: решения фильтрационной задачи для неустановившегося режима и оценки устойчивости откоса плотины с учетом результатов решения фильтрационной задачи.

Решение нестационарной фильтрационной задачи для случая снижения уровня верхнего бьефа применительно к грунтовым плотинам и дамбам рассматривалось в работах представителей российской фильтрационной школы и зарубежных исследователей [10–18].

Многочисленные исследования устойчивости откосов при изменении уровней воды были вызваны рядом аварий на грунтовых плотинах [19–21].

В последние годы широкое применение для решения задач по оценке устойчивости откосов плотин при понижении уровня воды водохранилища (включая решение неустановившейся фильтрации) нашли численные методы, и прежде всего, метод конечных элементов (МКЭ) [22–24].

В работе приводятся результаты численного решения задач устойчивости откоса ограждающей дамбы при сработке уровня водохранилища с использованием программного комплекса (ПК) PLAXIS 2D на основе МКЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты методом конечных элементов в ПК PLAXIS 2D были разбиты на несколько последовательных стадий, для каждой из которых задан тот или иной режим нагружения. Характерные расчетные случаи и соответствующие им типы расчета представлены в табл. 1.

Для расчета НДС рассматриваемого сооружения в ПК PLAXIS 2D применялся пластический расчет упругопластических деформаций. При данном типе расчета нагружение задается с помощью изменения комбинации нагрузок, напряженного состояния, веса, прочности и жесткости кластеров грунтов или конструктивных элементов, которые могут быть активированы или деактивированы для моделирования строительного процесса.

Табл. 1. Комбинации выполняемых расчетов

Расчетный случай	Тип расчета	Тип расчета порового давления
Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) при установившемся уровне воды в верхнем бьефе	Пластический	Установившаяся фильтрация грунтовых вод
Расчет НДС при изменении уровня воды в верхнем бьефе (сработке водохранилища)	Совместный фильтрационно-деформационный расчет	Неустановившаяся фильтрация грунтовых вод (автоматически)
Расчет устойчивости верхового откоса	Безопасность	Использовать давления с предыдущей фазы

Несущая способность грунтов основания проверялась программным комплексом автоматически в соответствии с критериями прочности, заложенными в грунтовой модели (в случае, если нагрузка на основание превышает несущую способность основания, программа автоматически показывает неограниченные пластические деформации, которые приводят к возникновению ошибок, остановке расчета и невозможности выдачи результатов), и условие первого предельного состояния выполняется для всего основания комплекса.

С целью оценки изменения НДС при изменении уровня воды в верхнем бьефе использовался совместный фильтрационно-деформационный расчет. При этом типе расчета возможно оценить развитие/изменение деформаций и поровых давлений в водонасыщенных и частично водонасыщенных грунтах, как результат зависящих от времени изменения гидравлических граничных условий. Данный тип расчета учитывает взаимосвязь между фильтрацией и деформациями.

Для оценки устойчивости использовался расчет безопасность, при котором последовательно уменьшались прочностные характеристики грунтов (угол внутреннего трения, сцепление и сдвиговая прочность) до тех пор, пока не произойдет разрушение. Результатами расчета устойчивости является определение потенциальной плоскости сдвига, т.е. наиболее ослабленной поверхности, по которой происходит разрушение, и расчетного коэффициента устойчивости. Кривая возможного сдвига формируется по поверхности, где возникают максимальные касательные напряжения. Расчетный коэффициент устойчивости определяется как отношение фактической прочности к прочности при разрушении.

Нормативным критерием устойчивости откосов гидротехнических сооружений (ГТС) является соблюдение условия:

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R,$$

где γ_{lc} — коэффициент сочетания нагрузок; F — расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или дру-

гого параметра, по которому проводят оценку предельного состояния, определенное с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_p ; R — расчетное значение обобщенной несущей способности системы «сооружение–основание», определяемое с учетом коэффициентов надежности по материалу γ_m или грунту γ_g и условий работы γ_c , т.е. обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности.

С целью расчетов устойчивости и НДС использовались стандартные граничные условия: боковые границы имеют закрепление от перемещений в горизонтальном направлении ($u_x = 0$), а нижняя граница имеет закрепление от перемещений в обоих направлениях ($u_x = u_y = 0$).

Для оценки изменения порового давления также учитывалась неустановившаяся фильтрация, которая основывается на вводе зависимых от времени гидравлических граничных условий, уровней воды, ненулевого интервала времени и фильтрационных параметров грунтов: коэффициентов фильтрации в горизонтальном k_x , м/сут, и вертикальном k_y , м/сут, направлениях. Расчет фильтрации водонасыщенных грунтов производится на основании коэффициентов фильтрации, расчет фильтрации в неводонасыщенной зоне — на основе моделей, описывающих гидравлическое поведение ненасыщенных грунтов. При расчетах в ПК PLAXIS 2D применялась одна из самых распространенных и апробированных моделей — модель Ван Генухтена, основное уравнение которой связывает водонасыщение с напором следующим образом:

$$S(\varphi_p) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \left[1 + \left(g_a \left| \varphi_p \right| \right)^{g_n} \right]^{g_c},$$

где $\varphi_p = p_w / \gamma_w$ и p_w — поровое давление всасывания; γ_w — удельный вес поровой жидкости; S_{res} — остаточное водонасыщение, которое характеризует часть жидкости, остающейся в порах даже при высоком всасывании; S_{sat} — может быть меньше единицы, так как поры могут быть в том числе заняты газом; g_a — параметр, характеризующий величину газа, проникнувшего в грунт; g_n — параметр, характеризующий скорость водоотдачи из грунта;

$g_c = (1 - g_n)/g_n$ — параметр, используемый в общем уравнении Ван Генухтена.

Для расчета неустановившейся фильтрации были использованы следующие гидравлические граничные условия: боковые границы являются открытыми, и вода может свободно фильтровать через них, а нижняя граница — закрытая.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучалась однородная ограждающая дамба из суглинки на нескальном основании, профиль представлен на рис. 1. Высота плотины — 29 м, заложение верхового и низового откосов — 1:3,5. Начальная глубина верхнего бьефа $H_1 = 26$ м. Рассматривалось два случая сработки: медленная $v = 0,25$ м/сут, быстрая (аварийная) $v = 4,4$ м/сут. В обоих случаях анализировалось понижение уровня воды в верхнем бьефе до отметки

$H_2 = 4$ м. В табл. 2 приведены физико-механические характеристики, принятые в расчет.

На рис. 2 представлены полученные в результате расчетов положения депрессионной поверхности в случаях установившейся фильтрации при УВБмакс — 26 м (синим цветом на рис. 2) и УВБмин — 4 м (красным цветом), а также по результатам расчетов медленной (зеленым цветом) и быстрой (аварийной) сработки водохранилища (черная кривая на рис. 2).

Возникновение фильтрационного потока, направленного при сработке в сторону верхнего бьефа, негативно сказывается на устойчивости откоса. В связи с низким коэффициентом фильтрации грунтов тела дамбы можно отметить достаточно похожие положения депрессионных поверхностей в случае медленной и аварийной сработки. Тем не менее, учитывая большую гидродинамическую нагрузку,

Табл. 2. Физико-механические характеристики грунтов тела и основания ограждающей дамбы

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Тело дамбы	Основание	
				ИГЭ-1	ИГЭ-2
Модель материала	—	—	Кулона – Мора		
Тип материала	—	—	Дренированный		
Удельный вес грунта	γ_{unsat}	кН/м³	18,6	18	18,8
Удельный вес насыщенного грунта	γ_{sat}	кН/м³	19,6	19	19,4
Модуль деформации	E	МПа	30	32	40
Сцепление	c	кПа	18	10	18
Угол внутреннего трения	φ	град	24	22	26
Коэффициент фильтрации	k_x, k_y	м/сут	0,01	0,001	0,001

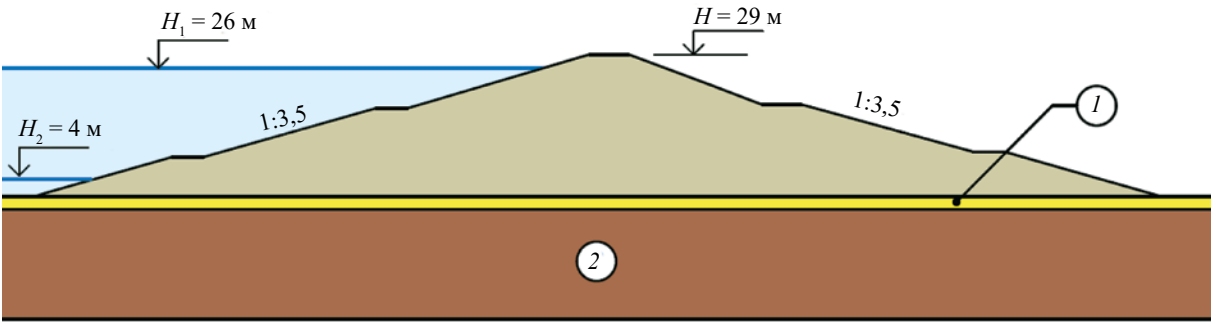


Рис. 1. Принципиальная схема ограждающей дамбы

прямо пропорциональную градиенту фильтрации в зоне верхового откоса ограждающей дамбы, в случае аварийной сработки наблюдается резкое падение коэффициента устойчивости (верховой откос находится в предельном состоянии). На рис. 3 показаны градиенты фильтрации в случае аварийной сработки.

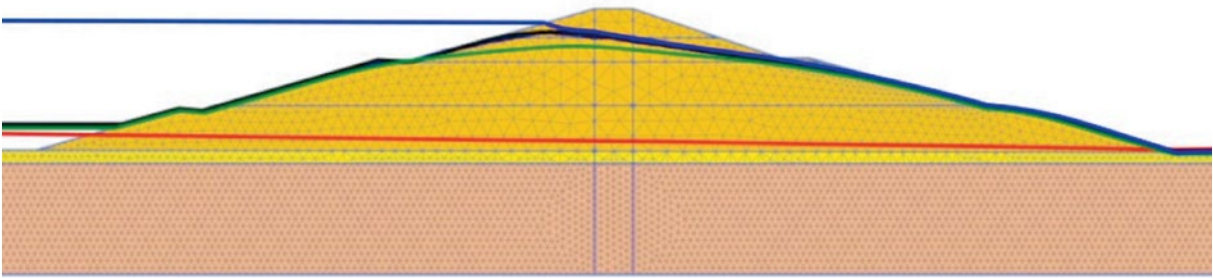


Рис. 2. Расчетные положения депрессионных поверхностей в случаях установившейся и неустановившейся фильтрации

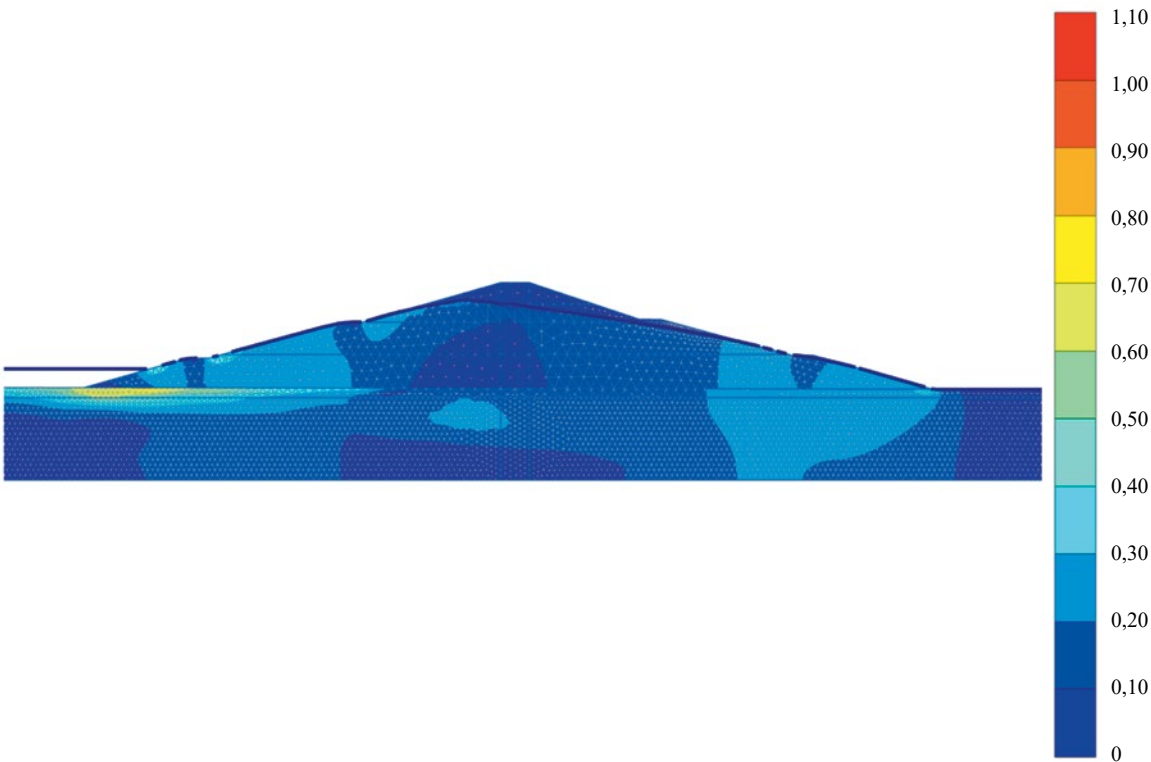


Рис. 3. Распределение градиента фильтрации при быстрой сработке водохранилища

Табл. 3. Значения коэффициентов устойчивости откосов для каждого расчетного случая

Расчетный случай	Коэффициент устойчивости		
	Расчетный $k_{st}^{расч}$		Нормативный $k_{st}^{норм}$
	Верховой откос	Низовой откос	
Период нормальной эксплуатации при УВБмакс (установившаяся фильтрация)	2,6	1,207	1,2
Период нормальной эксплуатации при УВБмин (установившаяся фильтрация)	2,0	1,993	1,2
Период нормальной эксплуатации при медленной сработке (неустановившаяся фильтрация)	1,269	1,251	1,2
Период аварийной эксплуатации при быстрой сработке (неустановившаяся фильтрация)	1,011	1,214	1,08

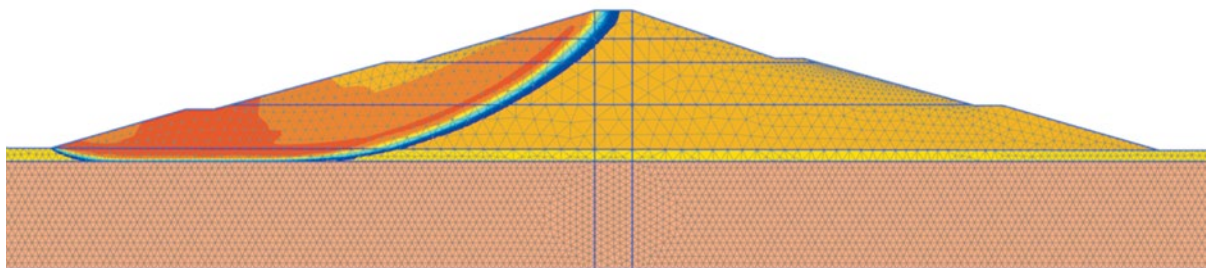


Рис. 4. Плоскость сдвига при быстрой сработке водохранилища

Значения коэффициентов устойчивости верхового и низового откосов для всех расчетных случаев представлены в табл. 3. На рис. 4 показана плоскость сдвига для случая быстрой сработки водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе в соответствии с практикой проектирования выполнена оценка изменения коэффициента устойчивости верхового откоса однородной грунтовой ограждающей дамбы с учетом снижения уровня воды в водохранилище с учетом фильтрационных сил неустановившейся фильтрации. Рассмотрены варианты с разными скоростями

сработки. Установлено, что при большой скорости сработки коэффициент устойчивости откоса уменьшается.

Полученные результаты показывают необходимость учета фильтрационных сил неустановившейся фильтрации в случаях проектирования однородных плотин из малопроницаемых грунтов.

В исследовании не учитывалось недренированное поведение грунтов тела и основания сооружения в случае быстрой сработки, более того, на данный момент отсутствует единый подход к проектированию однородных грунтовых плотин из связных грунтов, связывающий скорость сработки водохранилища и тип поведения (дренированное или недренированное) грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cedergren H.R.* Seepage, drainage, and flow nets. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York – London – Sidney – Toronto, 1977.
2. *Reddi L.N.* Seepage in Soils: Principles and Applications. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, 2003.
3. *Полубаринова-Кочина П.Я.* О неустановившихся движениях грунтовых вод // Доклады Академии наук СССР. 1950. Т. 75. № 3.
4. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.
5. *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
6. *Alonso E.E., Pinyol N.M.* Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases // Water Science and Engineering. 2016. Vol. 9. Issue 3. Pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.wse.2016.11.003
7. *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
8. *Berilgen M.M.* Investigation of stability of slopes under drawdown conditions // Computers and Geotechnics. 2007. Vol. 34. Issue 2. Pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.10.004
9. *Zomorodian A., Abodollahzadeh S.M.* Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability during Rapid Drawdown Condition // International Journal of Geology. 2010. Vol. 4. Issue 4. Pp. 85–90.
10. *Шестаков В.М.* Определение гидродинамических сил в земляных сооружениях и откосах при падении уровней в бьефах // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. 1956. № 2.
11. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР / отв. ред. П.Я. Полубаринова-Кочина. М. : Наука, 1969. 545 с.
12. *Muskat M.* The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284
13. *Шестаков В.М.* Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. 1956. № 2.
14. *Аравин В.И., Мошкова М.А.* Исследование на щелевом лотке влияния формы водоупора при неустановившейся фильтрации // Известия ВНИИГ. 1964. Т. 76.
15. *Биндеман Н.Н.* Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. М. : Углетехиздат, 1951. 72 с.

16. Веригин Н.Н. О течениях грунтовых вод при местной усиленной инфильтрации // Доклады Академии наук СССР. 1950. Т. 70. № 5.

17. Шестаков В.М. Фильтрационный расчет земляных плотин и перемычек при колебании бьефов // Гидротехническое строительство. 1953. № 7. С. 36–39.

18. Шестаков В.М. Расчет кривых депрессии в земляных плотинах и дамбах при понижении горизонта водохранилища // Гидротехническое строительство. 1954. № 4. С. 32–36.

19. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948.

20. Brahma S.P., Harr M.E. Transient development of the free surface in a homogeneous earth dam // Geotechnique. 1962. Vol. 12. Issue 4. Pp. 283–302. DOI: 10.1680/geot.1962.12.4.283

21. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000. Vol. 126. Issue 5. Pp. 443–450. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:5(443)

22. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1079-1080.198

23. 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.

24. Анишкин Н.А. Неустановившаяся фильтрация в грунтовых плотинах и основаниях // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 70–79.

Поступила в редакцию 20 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 27 сентября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анишкин** — 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;

Станислав Алексеевич Сергеев — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SergeevSA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

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

Сергеев С.А. — проведение расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In hydrotechnical construction practice much attention is paid to the issue of stability of ground dam or dam slopes under changes in water level, which may occur during operation of the structure. The so-called drawdown of a reservoir, or the lowering of the water level caused by its consumption or emergency discharge, is possible. Water level lowering sometimes takes place at a considerable rate. It causes a change in the filtration regime of the earth dam. This is expressed in changes in the position of the depression surface, directions and values of filtration velocities and gradients. These processes can lead to negative consequences: occurrence of filtration deformations, decrease in stability and slope collapse due to hydrodynamic filtration loads [1–4].

In hydrotechnical construction practice, there are known cases of accidents at structures caused by a rapid decrease in the water level in the upstream pool [5–7].

An example of dam slope stability failure due to reservoir level lowering is an emergency situation at Pilarcitos Dam (Pilarcitos Dam, California Peninsula, San Francisco, 23.8 m high). The accident that occurred in 1969 has been studied in sufficient detail [7]. The collapse of the slope at the dam, constructed of sandy loam soils, followed after the reservoir level dropped by 10.7 m for 43 days.

Another example is the massive slope failure at the 116-meter high San Luis Dam in California [5]. In 1981, as a result of the reservoir level lowering by 55 m in 120 days during the dry period, the upstream slope collapsed. The landslide, 340 m wide along the front, moved 310,000 m³ of soil into the reservoir. Repair of the dam required the dumping of 1,100,000 m³ of soil, after which the operability of the dam was restored.

Prediction of ground dam structure behavior under water level changes and provision of its stability and safety is a topical problem [8, 9]. Its solution consists of two parts: solution of non-steady-state filtration

problem and assessment of dam slope stability taking into account results of solution of filtration problem.

Solution of non-steady-state filtration problem for the case of upstream level lowering as applied to soil dams and levees was considered in works of representatives of Russian filtration school and foreign researchers [10–18].

Numerous investigations of slope stability under water level changes were caused by a number of accidents at groundwater dams [19–21].

In recent years, numerical methods, first of all, the finite element method (FEM) have been widely used for solving problems of dam slope stability under reservoir water level lowering (including solution of unsteady filtration) [22–24].

In work results of numerical decision of problems of stability of a slope of a protecting weir at drawdown of a level of a reservoir with use of program complex (PC) PLAXIS 2D on the basis of FEM are resulted.

MATERIALS AND METHODS

The finite element calculations in PLAXIS 2D PC were divided into several successive stages, for each of which one or another loading mode is specified. The characteristic design cases and their corresponding types of calculations are presented in Table 1.

To calculate the SSS of the structure under consideration, the plastic calculation of elastic-plastic deformations was used in the PLAXIS 2D software package. In this type of calculation, the loading is specified by changing the combination of loads, stress state, weight, strength and stiffness of soil clusters or structural elements that can be activated or deactivated to simulate the construction process.

The bearing capacity of foundation soils was checked automatically by the program complex in accordance with the strength criteria laid down in the soil model (if the base load exceeds the bearing capacity of the foundation, the program automatically shows unlimited plastic deformation, which causes errors, stops the calculation and makes it impossible to give results), and the first limit state condition is satisfied for the whole complex foundation.

To assess the change in the SSS with a change in the water level in the upstream, a joint filtration-deformation calculation was used. With this type of calculation, it is possible to assess development/change of deformations and pore pressures in water-saturated and partially water-saturated soils as a result of time-dependent changes in hydraulic boundary conditions. This type of calculation takes into account the relationship between filtration and deformation.

To assess stability, a safety calculation was used in which the strength characteristics of the soils (angle of internal friction, cohesion and shear strength) were successively reduced until failure occurred. The results of the stability calculation are the determination of the potential shear plane, i.e., the most weakened surface along which failure occurs, and the calculated stability coefficient. The potential shear curve is formed along the surface where the maximum tangential stresses occur. The calculated stability coefficient is defined as the ratio of the actual strength to the fracture strength.

The normative criterion for slope stability of hydraulic structures (HS) is compliance with the condition:

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R,$$

where γ_{lc} is load combination factor; F is design value of the generalized force (force, moment, stress), deformation or other parameter for which the limit state is evaluated, determined taking into account the load safety factor γ_f ; R is design value of the generalized bearing capacity of “building – foundation” system, determined taking into account the material reliability coefficient γ_m or soil γ_g and working conditions γ_c , i.e. generalized design value of forces of limiting resistance to shear along the surface in question.

For the purpose of stability and SSS calculations, standard boundary conditions were used: lateral boundaries have fixation from displacements in the horizontal direction ($u_x = 0$), and the lower boundary has fixation from displacements in both directions ($u_x = u_y = 0$).

Unsteady filtration, which is based on input of time-dependent hydraulic boundary conditions, water levels, nonzero time interval and filtration parameters of soils: filtration coefficients in

Table 1. Combinations of calculations performed

Calculation case	Type of calculation	Type of pore pressure calculation
Calculation of the stress-strain state (SSS) at a steady water level in the headrace	Plastic	Steady-state groundwater filtration
Calculation of SSS at a change of the upstream water level (reservoir drawdown)	Joint filtration and strain calculation	Non-steady groundwater filtration (automatic)
Calculation of upstream slope stability	Safety	Use pressures from the previous phase

horizontal k_x , m/day, and vertical k_y , m/day directions, was also taken into account for estimation of pore pressure changes. Filtration of water-saturated soils is calculated based on the filtration coefficients, while the calculation of filtration in the non-water-saturated zone is based on models describing the hydraulic behavior of unsaturated soils. In the calculations in PLAXIS 2D PC one of the most common and proven models was used — the Van Genuchten model, the basic equation of which relates water saturation to the head as follows:

$$S(\varphi_p) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \left[1 + (g_a |\varphi_p|)^{g_n} \right]^{g_c},$$

where $\varphi_p = -p_w/\gamma_w$ and p_w are pore suction pressure; γ_w is pore fluid specific gravity; S_{res} is residual water saturation, which characterizes the part of fluid remaining in pores even at high suction; S_{sat} may be less than unity, as pores may be occupied by gas; g_a is parameter characterizing the amount of gas penetrated into the ground; g_n is parameter characterizing the rate of water removal from the ground; $g_c = (1 - g_n)/g_n$ is parameter used in general Van Genuchten equation.

To calculate unsteady filtration, the following hydraulic boundary conditions were used: lateral bounda-

ries are open and water can freely filter through them, while the lower boundary is closed.

RESEARCH RESULTS

A homogeneous enclosing dam made of loam on a non-rock foundation was studied, the profile is shown in Fig. 1. Weir height — 29 m, upstream and downstream slopes — 1:3.5. Initial depth of the upstream bief $H_1 = 26$ m. Two cases of drawdown were considered: slow $v = 0.25$ m/day, fast (emergency) $v = 4.4$ m/day. In both cases, we analyzed the lowering of the water level in the upstream bief to the mark $H_2 = 4$ m. Table 2 shows physical and mechanical characteristics taken into calculation.

Fig. 2 shows the resulting positions of the depression surface in cases of steady filtration at UWBmax — 26 m (blue in Fig. 2) and UWBmin — 4 m (red), as well as the results of calculations of slow (green) and fast (emergency) drawdown of the reservoir (black curve in Fig. 2).

Occurrence of filtration flow directed to upstream side during drawdown has negative influence on slope stability. Due to low filtration coefficient of soils of the dam body we can note quite similar positions of depression surfaces in case of slow and accidental drawdown. Neverthe-

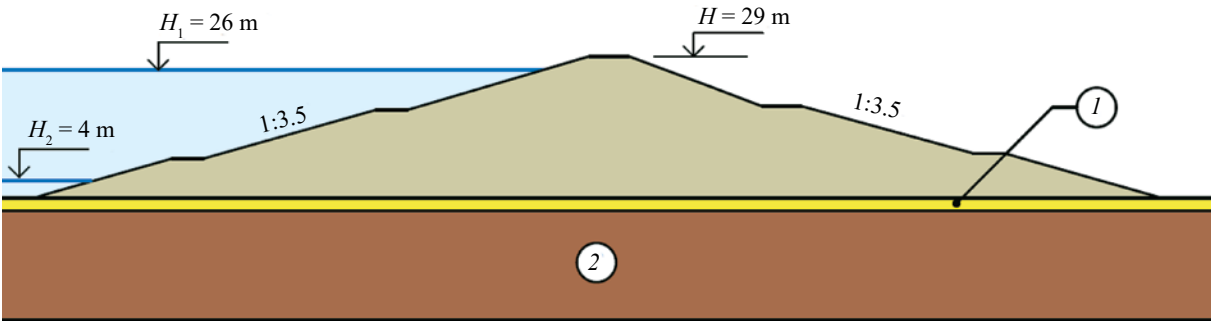


Fig. 1. Schematic diagram of the barrier dam

Table 2. Physical and mechanical characteristics of soils of the embankment body and foundation

Characteristic	Designation	Unit of measure	Dam body	Base	
				IGE-1	IGE-2
Material model	—	—	Mohr – Coulomb		
Type of material	—	—	Drained		
Specific weight of soil	γ_{unsat}	kN/m ³	18.6	18	18.8
Specific gravity of saturated soil	γ_{sat}	kN/m ³	19.6	19	19.4
Deformation modulus	E	MPa	30	32	40
Grip	c	kPa	18	10	18
The angle of internal friction	φ	deg	24	22	26
Filtration coefficient	k_x, k_y	m/day	0.01	0.001	0.001

less, taking into account big hydrodynamic load directly proportional to filtration gradient in the upstream slope of the embankment, in case of emergency drawdown we observe sharp fall of stability coefficient (upstream slope is

in extreme condition). Fig. 3 shows the filtration gradients in the area of the upstream slope.

Values of upper and lower slope stability coefficients for all calculated cases are presented in Table 3.

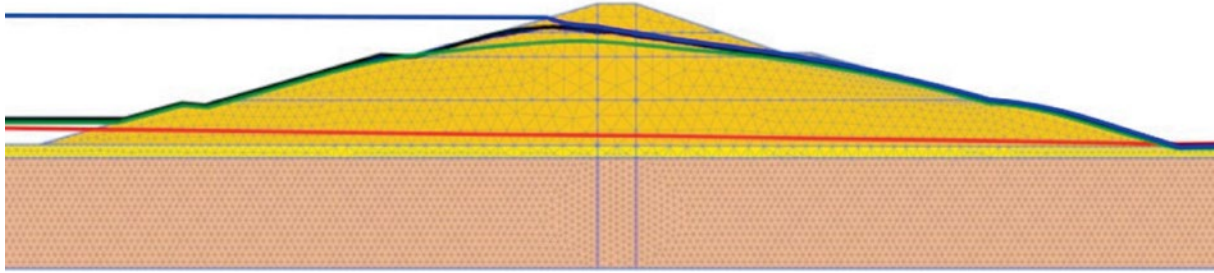


Fig. 2. Calculated positions of depression surfaces in cases of steady and unsteady filtration

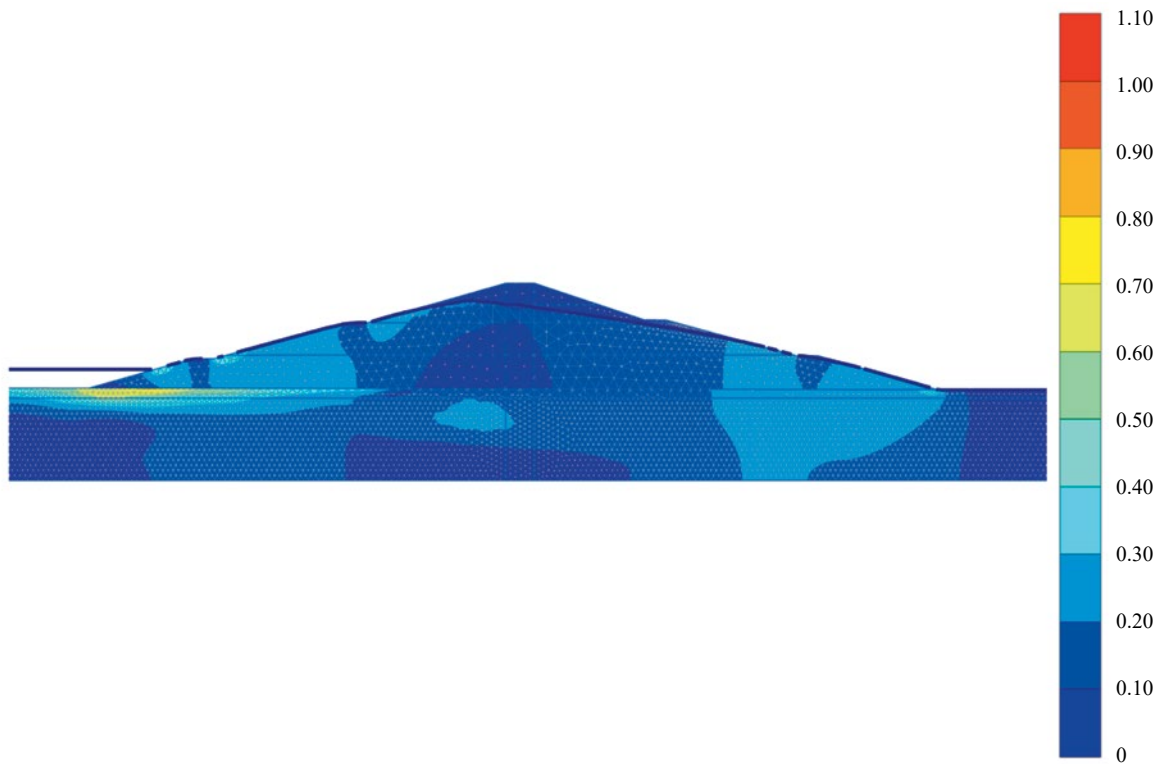


Fig. 3. Distribution of filtration gradient during rapid drawdown of the reservoir

Table 3. Values of slope stability coefficients for each design case

Calculation case	Stability coefficient		
	Calculated k_{st}^c		Prescribed, or regulatory k_{st}^{reg}
	Upstream slope	Downstream slope	
Period of normal operation at UWBmax (steady-state filtration)	2.6	1.207	1.2
Period of normal operation with UWBmin (steady-state filtration)	2.0	1.993	1.2
Period of normal operation with slow shutdown (unsteady filtration)	1.269	1.251	1.2
Period of emergency operation at fast operation (unsteady filtration)	1.011	1.214	1.08

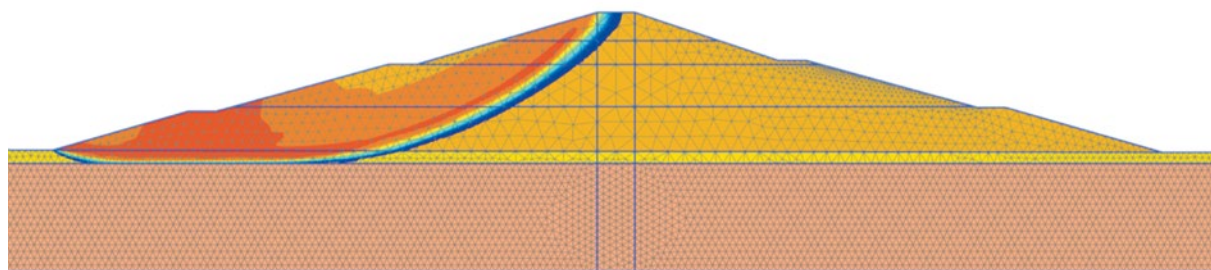


Fig. 4. Shear plane during rapid reservoir drawdown

Fig. 4 shows the shear plane for the case of rapid reservoir drawdown.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the present paper in accordance with the design practice the change of upper slope stability coefficient of the homogeneous earth protecting dam is estimated taking into account decrease of water level in the reservoir taking into account filtration forces of unsteady filtration. Variants with different rates of drawdown are considered. It is established that at

high velocity of drawdown the coefficient of slope stability decreases.

The obtained results show the necessity to take into account the filtration forces of unsteady filtration in cases of designing homogeneous dams made of low-permeable soils.

The study did not take into account undrained behavior of the body and foundation of the structure in case of rapid drawdown, moreover, at present there is no unified approach to the design of homogeneous cohesive earth dams linking the drawdown rate of the reservoir and type of behavior (drained or undrained) of soils.

REFERENCES

1. Cedergren H.R. *Seepage, drainage, and flow nets. 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc. New York – London – Sidney – Toronto, 1977.
2. Reddi L.N. *Seepage in Soils: Principles and Applications*. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, 2003.
3. Polubarinova-Kochina P.Ya. On unsteady movements of groundwater. *Report Academy of Sciences of the USSR*. 1950; 75(3). (rus.).
4. Polubarinova-Kochina P.Ya. *The theory of groundwater movement*. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1952. (rus.).
5. 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
6. Alonso E.E., Pinyol N.M. Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases. *Water Science and Engineering*. 2016; 9(3):175-182. DOI: 10.1016/j.wse.2016.11.003
7. 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; 8(2):115-123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
8. Berilgen M.M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*. 2007; 34(2):81-91. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.10.004
9. Zomorodian A., Abodollahzadeh S.M. Effect of horizontal drains on upstream slope stability during rapid drawdown condition. *International Journal of Geology*. 2010; 4(4):85-90.
10. Shestakov V.M. Determination of hydrodynamic forces in earthworks and slopes when levels fall in the streams. *Issues of filtration calculations of hydraulic structures*. 1956; 2. (rus.).
11. *Development of research on filtration theory in the USSR* / ed. P.Ya. Polubarinova-Kochina. Moscow, Nauka, 1969; 545. (rus.).
12. Muskat M. The seepage of water through dams with vertical faces. *Physics*. 1935; 6(12):402-415. DOI: 10.1063/1.1745284
13. Shestakov V.M. Some issues of modeling of transient seepage. *Issues of filtration calculations of hydraulic structures*. 1956; 2. (rus.).
14. Aravin V.I., Moshkova M.A. Investigation on a slit tray of the influence of the shape of the water seal with unsteady filtration. *Proceedings of the VNIIG*. 1964; 76. (rus.).
15. Bindeman N.N. *Hydrogeological calculations of groundwater retention and filtration from storage*. Moscow, Ugletekhizdat, 1951; 72. (rus.).
16. Verigin N.N. On groundwater flows with local enhanced infiltration. *Report Academy of Sciences of the USSR*. 1950; 70(5). (rus.).

17. Shestakov V.M. Filtration calculation of earthen dams and cofferdam in case of fluctuations of the ponds. *Hydraulic Engineering*. 1953; 7:36-39. (rus.).
18. Shestakov V.M. Calculation of depression curves in earthen dams and dams with a decrease in the water level. *Hydraulic Engineering*. 1954; 4:32-36. (rus.).
19. Reinius E. *The stability of the upstream slope of earth dams*. Stockholm, 1948.
20. Brahma S.P., Harr M.E. Transient development of the free surface in a homogeneous earth dam. *Geotechnique*. 1962; 12(4):283-302. DOI: 10.1680/geot.1962.12.4.283
21. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2000; 126(5):443-450. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:5(443)
22. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geoseepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL. *Advanced Materials Research*. 2014; 1079-1080:198-201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1079-1080.198
23. 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.
24. Aniskin N.A. Unsteady filtration in soil dams and foundations. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 2:70-79. (rus.).

Received September 20, 2022.

Adopted in revised form on September 27, 2022.

Approved for publication on September 27, 2022.

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

Stanislav A. Sergeev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SergeevSA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

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

Stanislav A. Sergeev — gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.