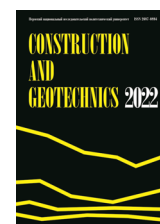




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.09

УДК 624.151.2: 626.814 (470.620)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗОВОГО КЛИНА НИЗКОНАПОРНОЙ ДАМБЫ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПАВОДКОВЫХ ВОД

М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, И.А. Приходько, А.Ю. Вербицкий

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01 декабря 2022

Одобрена: 30 января 2023

Принята к публикации:

6 февраля 2023

Ключевые слова:

низконапорная дамба, численное моделирование, механические свойства, система обвалования, низовой клин, климатические изменения, природные и техногенные катастрофы.

АННОТАЦИЯ

Представлены экспериментальные исследования механических свойств низового клина низконапорной дамбы в условиях быстрого повышения уровня паводковых вод, так как обеспечение устойчивости откоса насыпных гидротехнических сооружений при возрастающих природных и техногенных катастрофах с учётом изменения климатических и сейсмических условий является первостепенной задачей для специалистов проектных и эксплуатирующих организаций водохозяйственного комплекса. В настоящее время, несмотря на повышенный интерес к оползневым факторам, информации о том, как размеры дренажных устройств, расположенных в области низового клина низконапорной дамбы, могут повлиять на устойчивость ее откоса в случае быстрой сработки уровня паводковых вод, по-прежнему недостаточно. С целью анализа влияния размера дренажных устройств низконапорной дамбы на устойчивость ее откоса при возможной сработке уровня, проведены численные исследования в плоской постановке. Выполненное математическое моделирование позволило оценить нарушения устойчивости откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод и определить влияние размера дренажа низконапорной дамбы. Анализ результатов моделирования показал, что в сценарии быстрой сработкой уровня воды в реке после прохождения пика паводка, устойчивость откоса низконапорной дамбы, обращенного в сторону реки, уменьшается. Поровое давление в верхнем бьефе насыпи уменьшается с увеличением размера дренажа низового клина, в это же время в нижнем бьефе оно увеличивается. При увеличении размера дренажа значения коэффициента устойчивости откоса возрастают. Выявленные в процессе математического моделирования факторы, влияющие на устойчивость дамбы в зависимости от длины дренажа в области низового клина низконапорной дамбы, можно использовать в прогнозных целях для оценки их надежности.

© ПНИПУ

© Бандурин Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор, e-mail: chepura@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0986-8848

Волосухин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: director@ibgts.ru, ORCID: 0000-0001-9029-7802

Приходько Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: prihodkoigor2012@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4855-0434

Вербицкий Артем Юрьевич – магистрант, e-mail: trd.uncle@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6930-2662

Mikhail A. Bandurin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: chepura@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0986-8848

Viktor A. Volosukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: director@ibgts.ru, ORCID: 0000-0001-9029-7802

Igor A. Prikhodko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: prihodkoigor2012@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4855-0434

Artem Yu. Verbitsky – Master Student, e-mail: trd.uncle@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6930-2662

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE DOWNSTREAM WEDGE OF A LOW-PRESSURE DAM UNDER CONDITIONS OF RISING FLOOD WATER LEVELS

M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, I.A. Prikhodko, A.Yu. Verbitsky

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 December 2022
Approved: 30 January 2023
Accepted for publication:
06 February 2023

Keywords:

low-pressure dam, numerical modeling, mechanical properties, embankment system, downstream wedge, climate change, natural and man-made disasters.

ABSTRACT

The article presents experimental studies of the mechanical properties of the downstream wedge of a low-pressure dam under conditions of a rapid increase in the level of flood waters, since ensuring the stability of the slope of bulk hydraulic structures during increasing natural and man-made disasters, taking into account changes in climatic and seismic conditions, is a paramount task for specialists in design and operating organizations of the water management complex. Currently, despite the increased interest in landslide factors, there is still insufficient information on how the size of drainage devices located in the downstream wedge of a low-pressure dam can affect the stability of its slope in the event of a rapid drawdown of the flood water level. In order to analyze the influence of the size of the drainage devices of a low-pressure dam on the stability of its slope with a possible drawdown of the level, numerical studies were carried out in a flat setting. The performed mathematical modeling made it possible to assess the stability of the dam slope due to the rapid drawdown of the flood water level and to determine the effect of the drainage size of the low-pressure dam. An analysis of the simulation results showed that in the scenario of a rapid drawdown of the water level in the river after passing the flood peak, the stability of the slope of the low-pressure dam facing the river decreases. The pore pressure in the upstream of the embankment decreases with the increase in the size of the drainage of the downstream wedge, while it increases in the downstream. With an increase in the size of the drainage, the values of the slope stability coefficient increase. The factors identified in the process of mathematical modeling that affect the stability of the dam depending on the length of the drainage in the downstream wedge area of the low-pressure dam can be used for predictive purposes to assess their reliability.

© PNRPU

Введение

Нынешняя мировая цивилизация накопила богатейший опыт строительства грунтовых низконапорных дамб. Земляные дамбы в странах Индии, Китае, на Ближнем Востоке строились еще за 5000 лет до н.э. Вероятно, одна из первых низконапорных дамб построена в Египте за 4000 лет до н.э. Низконапорные дамбы для защиты территорий от затопления строились в Месопотамии [1, 2] за 3000 лет до н.э. Однако первые научно обоснованные подходы к расчету грунтовых низконапорных дамб были предложены только в середине XIX в. [3–5]. К сожалению, на протяжении тысячелетий история эксплуатации грунтовых низконапорных дамб изобиловала катастрофами различного характера и масштаба.

При проектировании грунтовых низконапорных дамб особое внимание уделяется вопросам обеспечения устойчивости откосов [6]. Причиной этого является тот факт, что при допущении ошибок в проектировании грунтовой низконапорной дамбы значительно возрастает риск ее разрушения, результатом которого может стать масштабная катастрофа. Дренаж низового клина в составе грунтовой низконапорной дамбы является тем элементом, который требует тщательного изучения на проектно-конструкторских этапах в зависимости от предполагаемых эксплуатационных условий. При проектировании грунтовых низконапорных дамб, в числе многочисленных факторов, фильтрация остается крайне важным параметром, который следует внимательно исследовать и строго контролировать [7, 8].

Внимание к контролю над данной характеристикой обусловлено тем, что чрезмерная фильтрация через тело грунтовой низконапорной дамбы представляет существенную угрозу ее устойчивости и в конечном итоге приводит к ее разрушению. Под действием как гидростатического, так и гидродинамического давления воды возможно расструктурирование грунта тела низконапорной дамбы, что часто приводит к образованию явлений суффозии. Движение грунта, т.е. внутренняя эрозия, вызванная просачиванием, является основной причиной прорыва насыпных гидротехнических сооружений [8].

В этой связи крайне важной является оценка скорости фильтрации воды в теле и основании грунтовой низконапорной дамбы.

Материалы и методы

Закон Дарси иллюстрирует поразительную по своей простоте зависимость между скоростью фильтрации (объем за единицу времени) через определенную область ($A = uz$, измеряется перпендикулярно направлению потока) и величинами, которые в настоящее время поддаются измерению, а именно коэффициент фильтрации (K) и гидравлический градиент грунтовой низконапорной дамбы (обозначается i и рассчитывается как разность напора между двумя точками, ΔH , деленная на расстояние между точками, $\Delta \ell$, $i = \Delta H / \Delta \ell$).

Величину K , являющуюся показателем способности материалов грунта тела низконапорной дамбы проводить водный поток, можно получить в результате любого из множества полевых или лабораторных испытаний [9–12]. Обычно считается, что полевые испытания, проводимые на месте, дают наиболее приближенные значения K . Для целей данной работы достаточно признать, что значения K , полученные в результате любых испытаний, могут пространственно различаться в зависимости от масштаба испытаний.

В условиях активных химических или микробиологических процессов в материале грунта тела низконапорной дамбы K может существенно изменяться с течением времени. В силу этого точно установить значение K представляется затруднительным, поэтому принято считать, что в расчетах по закону Дарси коэффициент фильтрации является источником наибольшей погрешности [12].

Уравнение скорости фильтрации имеет следующий вид [13]:

$$V = Ki, \quad (1)$$

где V – скорость фильтрации; K – коэффициент фильтрации пористой среды; i – гидравлический градиент (градиент напора).

В насыпных грунтовых низконапорных дамбах целесообразно предусматривать дренаж, поскольку он предупреждает размыв низового откоса, отводит фильтрационную воду, проходящую через тело грунтовой низконапорной дамбы в нижний бьеф, что уменьшает заложение низового откоса и повышает его устойчивость. Следует отметить, что в случае, если фильтрация через насыпь затруднена, вода изыщет новый путь или будет аккумулироваться, что приведет к опасным явлениям вымывания грунта из тела дамбы и неустойчивости откоса к оползанию [14]. При этом на эффективность дренажа низового клина в значительной степени влияют такие параметры, как форма, расположение и, что особенно важно, его размер. В настоящее время, как ни парадоксально, информации о потенциальном влиянии размеров дренажных устройств низового клина на показатели устойчивости откоса грунтовой низконапорной дамбы в условиях быстрой сработки уровня паводковых вод по-прежнему недостаточно [15].

В связи с этим была поставлена цель провести серию численных экспериментов, связанных с математическим моделированием и изучением потенциального влияния размеров дренажных устройств низового клина грунтовой низконапорной дамбы на показатели устойчивости откоса грунтовой однородной насыпной дамбы в условиях быстрой сработки уровня паводковых вод. Для оценки коэффициента устойчивости (FS) откосов, применялись комбинированные методы численного моделирования фильтрации и предельного (пластического) равновесия ($LEM - Limit Equilibrium Method$). Применяемые методы предельного равновесия (Бишопа; Янбу; Спенсера; Morgenштерна – Прайса) допускают, что массив грунта грунтовой низконапорной дамбы над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). Двумерное моделирование ($2D$) выполнялось с учетом ряда упрощений (идеализации геометрии и свойств материала, из которого состоит грунтовая низконапорная дамба). В процессе численного моделирования были исследованы три схемы (5, 10 и 15 м) дренажа низового клина грунтовой низконапорной дамбы [16]. Кроме того, в *GeoStudio* (распространенный специализированный пакет продуктов для геотехнического моделирования) выполнялось моделирование по двум сценариям оценки устойчивости откоса грунтовой низконапорной дамбы, обращенного к реке, при понижении уровня воды после паводка: скорость сработки в наилучшем варианте (моментальная) и 5-дневная (более реалистичный). Начальный момент сработки соответствует глубине 10 м.

Выполненные экспериментальные исследования механических свойств низового клина грунтовой низконапорной дамбы в условиях повышения уровня паводковых вод является первым этапом масштабного всестороннего исследования этой проблемы. Кроме того, обсуждаемая тематика представляется важной как в плане фундаментальных научных исследований, так и в прикладных аспектах, обусловленных прогнозом развития опасных гидрологических явлений, особенно в свете глобального изменения климата и их влияния на насыпные грунтовые низконапорные гидротехнические сооружения [17–19].

Были проведены численные анализы методом конечных элементов *Finite Element Modeling* (МКЭ, FEM) с целью изучения влияния размеров дренажа низового клина и скорости фильтрации на показатели устойчивости откоса грунтовой низконапорной дамбы [20]. В процессе были учтены три варианта, определяемые типоразмером дренажа низового клина грунтовой низконапорной дамбы. Численное моделирование [21] было проведено с использованием программного обеспечения *GeoStudio* (*GeoStudio 2018 R2 v9.1.1.16749*). Для анализа фильтрации и устойчивости откосов грунтовой низконапорной дамбы использовались пакеты *SEEP/W* и *SLOPE/W* программы *GeoStudio* модуля *GeoSlope* соответственно [22]. Метрическая система: длина в метрах, сила – в кН, давление и прочность – в кПа, влияние воды считается равным $9,807 \text{ кН/м}^3$. В целях упрощения визуального анализа X и Y масштабы различны. Геометрические параметры насыпной низконапорной дамбы следующие [23]: ширина дамбы понизу 59 м; ширина дамбы по гребню 7 м; высота дамбы 13 м; максимальный подпорный горизонт воды 10 м; заложение откосов $m 1 : 2$; длина дренажа низового клина 5, 10, 15 м соответственно. Грунтовая низконапорная дамба расположена на водонепроницаемом основании [24, 25].

Характеристики материала тела грунтовой низконапорной дамбы представлены в табл. 1, во избежание любой вариабельности и с целью отразить эффект от изменения размеров дренажной системы у низового клина насыпи, параметры материала грунтовой низконапорной дамбы были постоянными для всех анализируемых случаев.

Таблица 1

Характеристики материала тела низконапорной дамбы

Table 1

Characteristics of the material of the body of a low-pressure dam

Характеристики грунта	Условное обозначение	Единицы измерения	Значения
Объемная влажность	θ_1	%	43
Коэффициент сжимаемости	M_v	м ² /кН	$2 \cdot 10^{-4}$
Насыщенная гидравлическая проводимость	K_ϕ	м/с	$1 \cdot 10^{-6}$
Остаточная влажность	θ_2	%	5,5
Удельный вес грунта	γ	кН/м ³	20
Сила сцепления	c'	кН/м ²	5
Угол внутреннего трения	θ'	Градусы	25

В диалоговом окне *KeyIn Material Properties* выбраны два типа грунта [26] с функцией *Mohr – Coulomb* и добавлены описания. В диалоговом окне *Analysis Settings* выбран метод *Spencer* с соответствующей функцией *Half-sine function*. Последовательность точек и ход их построения указаны на рис. 1.

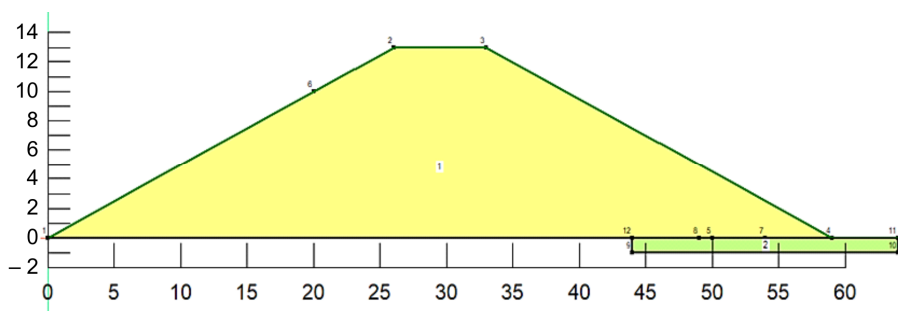


Рис. 1. Геометрия тела низконапорной дамбы
 Fig. 1. Geometry of the body of a low-pressure dam

Результаты и обсуждение

С использованием комбинации метода конечных элементов и численного моделирования успешно выполнен анализ фильтрации и устойчивости откоса низконапорной дамбы. По результатам анализа фильтрации установлено, что по мере увеличения размера дренажа поровое давление в области низового клина низконапорной дамбы возрастает [27]. На рис. 2 видно, что при длине дренажа 15 м поровое давление выше, чем при длине 10 и 5 м низконапорной дамбы. В противоположной области низового клина низконапорной дамбы нижнего бьефа, поровые давления в районе верхнего бьефа дамбы уменьшались с увеличением размера дренажа.

В качестве наихудшего сценария при снижении уровня воды был использован тип граничного условия, при котором реализована ее резкая сработка, впоследствии этот период был увеличен до 5 дней (рис. 3).

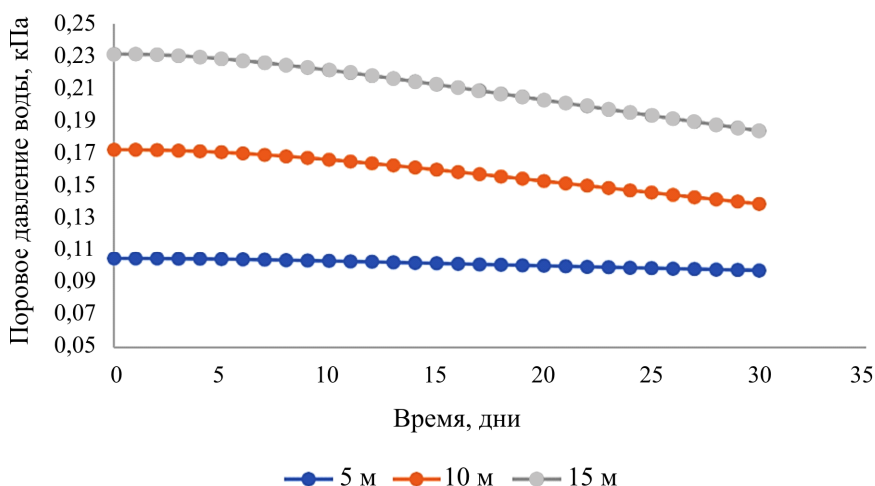


Рис. 2. Поровое давление воды в области низового клина низконапорной дамбы
 Fig. 2. Pore water pressure in the downstream wedge of a low-pressure dam

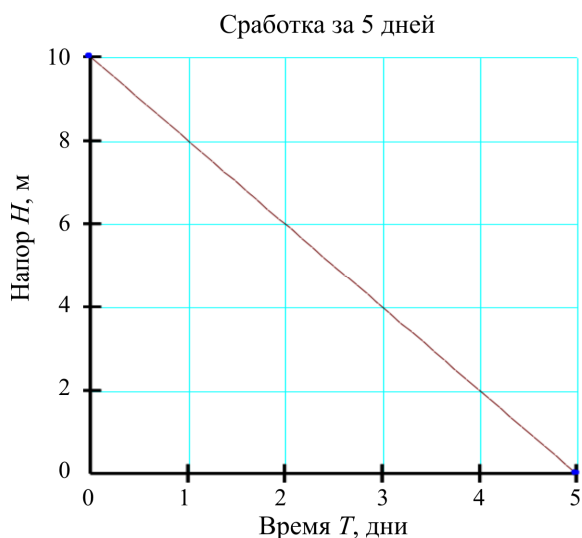


Рис. 3. Функция напора воды для 5-дневной сработки уровня воды
 Fig. 3. Water pressure function for 5 day drawdown of the water level

По результатам анализа устойчивости откоса установлено, что изменение размера дренажа в области низового клина низконапорной дамбы также влияет на коэффициент устойчивости [28]. Из рис. 4, а–в следует, что при длине дренажа 15 м коэффициент устойчивости несколько больше в сравнении с 10- и 5-метровыми дренажами. Размер дренажа 5 м обеспечил минимальный коэффициент устойчивости 0,961, 10 м – 0,970 и 15 м – 0,978 соответственно.

Из рис. 5 следует, что коэффициент устойчивости стремительно снижался в период сработки с постепенным увеличением после ее завершения. Наименьшие значения коэффициента устойчивости были достигнуты к четвертым суткам сработки.

В табл. 2 приведены максимальные и минимальные значения коэффициента устойчивости при мгновенной и 5-дневной сработке. Из обоих вариантов сработки следует, что значения коэффициента устойчивости возрастают с увеличением длины дренажа в области низового клина грунтовой низконапорной дамбы.

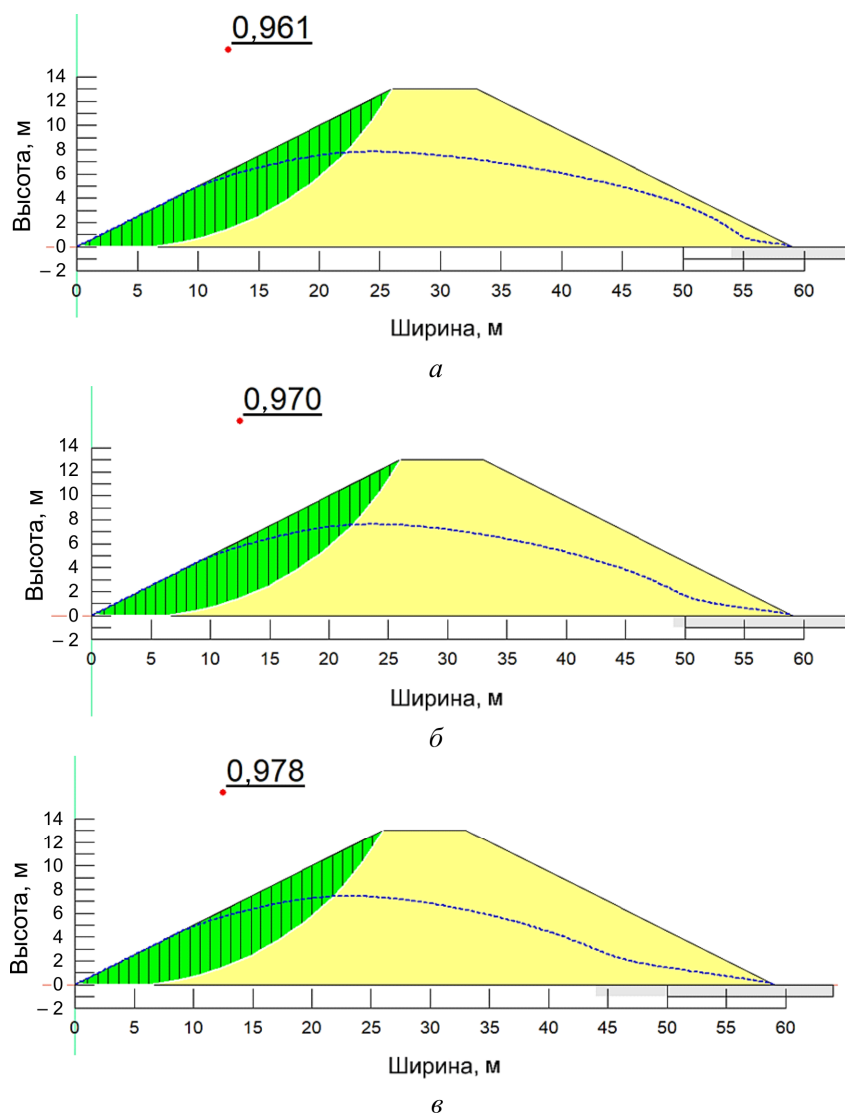


Рис. 4. Размер дренажа в области низового клина при длине дренажа, м: а – 5; б – 10; в – 15
 Fig. 4. The size of the drainage in the area of the bottom wedge with a drainage length, m: а – 5; б – 10; в – 15

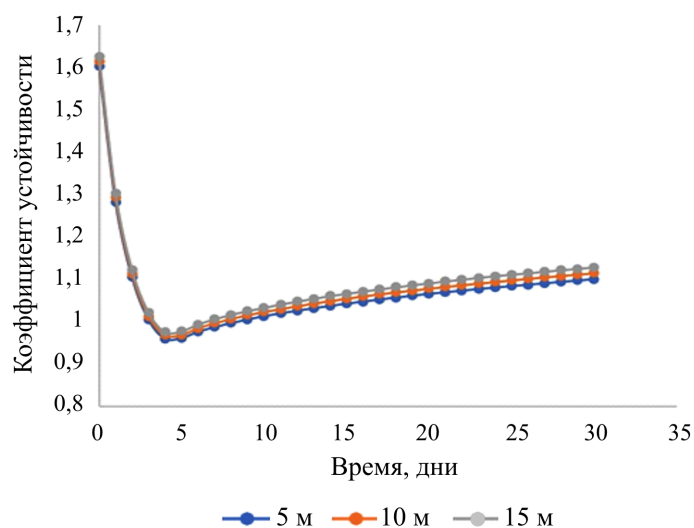


Рис. 5. Динамика изменения значений коэффициента устойчивости с течением времени
 Fig. 5. Pore water pressure in the downstream wedge of a low-pressure dam

Таблица 2

Максимальный и минимальный коэффициенты устойчивости при мгновенной
и 5-дневной сработке

Table 2

Maximum and minimum stability factors for instantaneous and 5-day drawdown

Скорость просадки	Длины дренажа в области низового клина, м	Коэффициенты устойчивости	
		max	min
Мгновенная	5	1,603	0,799
	10	1,614	0,805
	15	1,626	0,811
5 дней	5	1,603	0,959
	10	1,614	0,968
	15	1,626	0,976

Заключение

Проведено исследование потенциального влияния длины дренажа в области низового клина грунтовой низконапорной дамбы на устойчивость откоса дамбы при резком снижении уровня воды. На основании полученных результатов было установлено, что поровое давление в верхнем бьефе земляной насыпи уменьшается с увеличением размера дренажа грунтовой низконапорной дамбы, в это же время в нижнем бьефе оно увеличивается. При увеличении длины дренажа значения коэффициента устойчивости откоса грунтовой низконапорной дамбы возрастают. Полученные результаты показали, что между длиной дренажа в области низового клина низконапорной дамбы и коэффициентом устойчивости существует взаимосвязь в случае, если земляное гидротехническое сооружение подвергается воздействию полной сработки возрастания уровня паводковых вод.

Таким образом, в период экстремального спада воды в реке вероятно обрушение откосов грунтовой низконапорной дамбы, обращенных в сторону реки. Этот факт необходимо учитывать при разработке дренажа, а также при проектировании новой системы низконапорных гидротехнических сооружений.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда (грант № 22-17-20001).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Мониторинг безопасности гидротехнических сооружений низконапорных водохранилищ и обводнительно-оросительных систем / В.А. Волосухин, М.А. Бандурин, Я.В. Волосухин [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосухина. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2010. – 338 с.
2. Богомолова О.А. Расчет несущей способности основания двухщелевого ленточного фундамента // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 57–71. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.05

3. Кирейчева Л.В. Дренажные воды как альтернативные водные ресурсы для орошения // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 13–18.
4. Козлов Д.В., Симонович О.С., Снежко В.Л. Интенсивность отказов низконапорных грунтовых плотин опасного и неудовлетворительного уровня безопасности // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 4. – С. 18–24.
5. Управление водохозяйственными системами / И.Г. Галямина, Т.И. Матвеева, В.Н. Маркин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мегapolis, 2020. – 127 с.
6. Мониторинговая оценка низконапорной земляной плотины Варнавинского водохранилища в условиях повышающегося риска природных и техногенных катастроф / М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, И.А. Приходько, А.А. Руденко // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 17–29. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02
7. Коноваленко И.С., Шилько Е.В., Коноваленко И.С. Численное исследование влияния двухуровневой поровой структуры на величину динамической прочности водонасыщенных бетонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 2. – С. 37–51. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.04
8. Finite element simulation of cracks formation in parabolic flume above fixed service live / М.А. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.V. Mikheev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 4–6 of December, 2017. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 022010. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022010
9. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account / М.А. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.V. Mikheev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 17–20 of January, 2018. – Tomsk, 2018. – P. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032011
10. Finite-element simulation of permissible load on gate elements of water-conveying structures to assess risks of anthropogenic accidents / М.А. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.V. Mikheev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Saint-Petersburg, 17–19 of July, 2018. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012005
11. Ершов В.А. Опыт возведения низконапорных дамб при разработке россыпных месторождений // Горный журнал. – 2005. – № 1. – С. 91.
12. Богомолова О.А., Жиделев А.В. Расчет устойчивости системы «основание – насыпь» // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 19–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.02
13. Нуждин М.Л., Пономарев А.Б. Расчетное обоснование эффективных схем усиления фундаментов мелкого заложения контурным армированием жесткими армоэлементами // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.01
14. Анализ причин появления подземной и атмосферной воды в подвальных помещениях эксплуатируемого здания / А.И. Полищук, Д.А. Чернявский, В.В. Гуменюк, Г.Г. Солонов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 86–96. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.08
15. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Метод расчета осадок фундаментов на основании, улучшенном с использованием вертикальных грунтовых элементов в оболочке из геосинтетических материалов // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 64–76. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.06
16. Волков В.И., Снежко В.Л., Козлов Д.В. Прогноз уровня безопасности низконапорных и бесхозяйных гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 11. – С. 35–41.

17. Accounting for climate change uncertainty in long-term dam risk management / J. Fluixá-Sanmartín, I. Escuder-Bueno, A. Morales-Torres, J.T. Castillo-Rodríguez // *Journal of Water Resources Planning and Management – ASCE*. – 2021. – Vol. 147, no. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001355
18. Каганов Г.М., Волков В.И. К оценке состояния низконапорных гидротехнических сооружений при отсутствии проектной документации // *Природообустройство*. – 2008. – № 3. – С. 41–48.
19. Stefanyshyn D., Benatov D. Application of a logical-probabilistic method of failure and fault trees for predicting emergency situations at pressure hydraulic facilities (the case of Kakhovka hydroelectric complex) // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 4, No. 2–106. – P. 55–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208467
20. Yurchenko I.F. Automatization of water distribution control for irrigation // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 4, No 2. – P. 72–77.
21. Baranov E.V., Gur'yev A.P., Khanov N.V. Recommendations for hydraulic calculations of anti-erosion lining with the use of spatial geogrid with coarse fragmental soil // *Power Technology and Engineering*. – 2020. – Vol. 53, No 5. – P. 553–556. DOI: 10.1007/s10749-020-01115-z
22. Yurchenko I.F. Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2018. – Vol. 96, No 5. – P. 1253–1265.
23. Косиченко Ю.М. Исследования надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений и противофильтрационных облицовок каналов // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. – 2016. – № 2 (62). – С. 95–104.
24. Курбанов С.О., Созаев А.А., Жемгуразов С.М. Оценка влияния низконапорных водохранилищных гидроузлов на окружающую среду // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 4 (55). – С. 52.
25. Карпенко Н.П., Юрченко И.Ф. Теоретическое обоснование структуры классификатора критериев безопасности ГТС мелиоративного водохозяйственного комплекса // *Природообустройство*. – 2015. – № 1. – С. 12–15.
26. Meliorative institutional environment: The area of state interests / V.N. Shchedrin, S.M. Vasilyev, A.V. Kolganov [et al.] // *Espacios*. – 2018. – Vol. 39, No 12. – P. 28.
27. Юрченко И.Ф. Компьютерная технология поддержки решения как фактор реформирования системы эксплуатации в мелиорации России // *Природообустройство*. – 2008. – № 1. – С. 34–40.
28. Моторная Л.В., Хаджиди А.Е. Рациональное водопользование и экологическая безопасность оросительных систем // *Международный сельскохозяйственный журнал*. – 2022. – № 2 (386). – С. 161–164. DOI: 10.55186/25876740_2022_65_2_161

References

1. Volosukhin V.A. [et al.]. Safety monitoring of hydraulic structures of low-pressure reservoirs and irrigation watering systems. Ed. V.A. Volosukhin. Novocheerkassk, ООО "Лик", 2010, 338 p.
2. Bogomolova O.A. Calculation of the bearing capacity of a two-slot strip foundation. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 1, pp. 57-71. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.05
3. Kireicheva L.V. Drainage water as an alternative water resource for irrigation. *Melioratsiia i vodnoe khoziaistvo*, 2018, no. 4, pp. 13-18.

4. Kozlov D.V., Simonovich O.S., Snezhko V.L. Failure rate of low-pressure groundwater dams of hazardous and unsatisfactory safety level. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2020, no. 4, pp. 18-24.
5. Galiamina I.G. [et al.]. *Upravlenie vodokhoziaistvennymi sistemami [Management of water systems]*. 2nd ed. Moscow, Megapolis, 2020, 127 p.
6. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhod'ko I.A., Rudenko A.A. Monitoring assessment of the low-pressure earthen dam of the Varnavinsky reservoir under conditions of an increasing risk of natural and man-made disasters. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 17-29. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02
7. Konovalenko I.S., Shil'ko E.V., Konovalenko I.S. Numerical study of the effect of a two-level pore structure on the dynamic strength of water-saturated concrete. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2020, no. 2, pp. 37-51. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.04
8. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Mikheev A.V. [et al.]. Finite element simulation of cracks formation in parabolic flume above fixed service live. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tomsk, 04–06 December 2017. Tomsk, Institute of Physics Publishing, 2018, pp. 022010. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022010
9. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Mikheev A.V. [et al.]. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account. *Journal of Physics: Conference Series*, Tomsk, 17–20 January 2018, pp. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032011
10. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Mikheev A.V. [et al.]. Finite-element simulation of permissible load on gate elements of water-conveying structures to assess risks of anthropogenic accidents. *Journal of Physics: Conference Series*, Saint-Petersburg, 17–19 July 2018. Saint Petersburg, Institute of Physics Publishing, 2018, pp. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012005
11. Ershov V.A. Experience of erecting low-pressure dams in the development of alluvial deposits. *Gornyi Zhurnal*, 2005, no. 1, pp 91.
12. Bogomolova O.A., Zhidelev A.V. Calculation of the «base-embankment» system stability. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 4, pp. 19-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.02
13. Nuzhdin M.L., Ponomarev A.B. Calculation of effective schemes for strengthening shallow foundations by contour reinforcement with hard elements. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 5-16. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.01
14. Polishchuk A.I., Chernyavskii D.A., Gumenyuk V.V., Solonov G.G. Analysis of causes of underground and atmospheric water in basements of the building in operation. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 86-96. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.08
15. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Calculation of vertical deformations of the foundations on the soft soil improved by geotextile encased stone columns. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 64-76. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.06
16. Volkov V.I., Snezhko V.L., Kozlov D.V. Forecast of the safety level of low-pressure and ownerless hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 11, pp. 35-41.
17. Fluixá-Sanmartín J., Escuder-Bueno I., Morales-Torres A., Castillo-Rodríguez J.T. Accounting for climate change uncertainty in long-term dam risk management. *Journal of Water Resources Planning and Management – ASCE*, 2021, vol. 147, no. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001355

18. Kaganov G.M., Volkov V.I. Assessment of the condition of low-pressure hydraulic structures in the absence of design documentation. *Prirodoobustroistvo*, 2008, no. 3, pp. 41-48.
19. Stefanyshyn D., Benatov D. Application of a logical-probabilistic method of failure and fault trees for predicting emergency situations at pressure hydraulic facilities (the case of Kakhovka hydroelectric complex). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 4, no. 2-106, pp. 55-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208467
20. Yurchenko I.F. Automatization of water distribution control for irrigation. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 72-77.
21. Baranov E.V., Gur'yev A.P., Khanov N.V. Recommendations for hydraulic calculations of anti-erosion lining with the use of spatial geogrid with coarse fragmental soil. *Power Technology and Engineering*, 2020, vol. 53, no. 5, pp. 553-556. DOI: 10.1007/s10749-020-01115-z
22. Yurchenko I.F. Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2018, vol. 96, no. 5, pp. 1253-1265.
23. Kosichenko Iu.M. Studies of reliability and safety of low-pressure hydraulic structures and canal impervious liners. *Puti povysheniia effektivnosti oroshaemogo zemledeliia*, 2016, no. 2 (62), pp. 95-104.
24. Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Zhemgurazov S.M. Assessment of the environmental impact of low-pressure reservoir hydrosystems. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2019, no. 4 (55), pp. 52.
25. Karpenko N.P., Yurchenko I.F. Teoreticheskoe obosnovanie struktury klassifikatora kriteriev bezopasnosti GTS meliorativnogo vodokhoziaistvennogo kompleksa [Theoretical justification of the structure of GTS safety criteria classifier for reclamation water management complex]. *Prirodoobustroistvo*, 2015, no. 1, pp. 12-15.
26. Shchedrin V.N., Vasilyev S.M., Kolganov A.V. [et al.]. Meliorative institutional environment: The area of state interests. *Espacios*, 2018, vol. 39, no. 12, pp. 28.
27. Yurchenko I.F. Computer technology for decision support as a factor in reforming the system of operation in land reclamation in Russia. *Prirodoobustroistvo*, 2008, no. 1, pp. 34-40.
28. Motornaia L.V., Khadzhide A.E. Rational water use and environmental safety of irrigation systems. *Mezhdunarodnyi sel'skokhoziaistvennyi zhurnal*, 2022, no. 2 (386), pp. 161-164. DOI: 10.55186/25876740_2022_65_2_161