УДК (UDC) УДК 627.8

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ОПАСНЫХ
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙASSESSING THE STABILITY OF HYDRAULIC STRUCTURES TO THE IMPACT
OF HAZARDOUS FACTORS OF HAZARDOUS NATURAL PHENOMENAРыбаков А.В.¹, Иванов Е.В.¹, Сибгатулина Д.Ш.², Алёшкин Г.С.¹
Rybakov A.V.¹, Ivanov E.V.¹, Sibgatulina D.S.², Alyoshkin G.S.¹¹ – Академии гражданской защиты МЧС России (Химки, Россия)² – Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ¹ – Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia (Khimki, Russian Federation)² – Kazan National Research Technical University A. N. Tupolev – KAI (Kazan, Russian Federation)

Аннотация. В статье показан порядок определения значений показателя устойчивости гидротехнических сооружений (грунтовых плотин). Представлен подход к созданию инженерной методики для проведения оперативных расчетов прогнозирования состояния грунтовой плотины при воздействии известных характеристик поражающих факторов быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов. Показано одно из направлений применения предлагаемого подхода - определение рациональных параметров защиты гидротехнических сооружений и выработка плана мероприятий по их достижению.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, грунтовая дамба, поражающие факторы, GeoStudio, численный эксперимент, степень разрушения, показатель устойчивости.

Дата принятия к публикации: 08.12.2020
Дата публикации: 25.12.2020

Сведения об авторах:

Рыбаков Анатолий Валерьевич – доктор технических наук, профессор, начальник НИЦ Академии гражданской защиты МЧС России,
e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Иванов Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, начальник НИО (по проблемам ГО и ЧС) НИЦ Академии гражданской защиты МЧС России, e-mail: linia-zhizni@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9093-1559

Сибгатулина Дина Шамилевна – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», e-mail: dinart@list.ru

Abstract. The article shows the procedure for determining the values of the stability index of hydraulic structures (earth dams). An approach to the creation of an engineering methodology for carrying out operational calculations for predicting the state of an earth dam under the influence of known characteristics of damaging factors of rapidly developing dangerous natural phenomena and man-made processes is presented. One of the directions of application of the proposed approach is shown - the definition of rational parameters for the protection of hydraulic structures and the development of a plan of measures to achieve them.

Keywords: hydraulic engineering structure, earth dam, damaging factors, GeoStudio, numerical experiment, degree of destruction, stability index.

Date of acceptance for publication: 08.12.2020
Date of publication: 25.12.2020

Authors' information:

Anatoly V. Rybakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Research Center at Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia,
e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Evgeny V. Ivanov – Candidate of Technical Sciences, Head of Research and Development Organization (for Civil Defense and Emergencies) of the Research Center at Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, e-mail: linia-zhizni@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9093-1559

Dina Sh. Sibgatulina – Senior Lecturer of the Department, Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev - KAI, e-mail: dinart@list.ru

Алёшкин Георгий Сергеевич – оператор НИО
(по проблемам ГО и ЧС) НИЦ Академия граждан-
ской защиты МЧС России,
e-mail: georgealeshkin@outlook.com
ORCID: 0000-0002-9465-1191

† Georgy S. Alyoshkin – operator of the Research
† and Development Organization (for Civil Defense and
† Emergencies) of the Research Center at Academy of
† Civil Protection EMERCOM of Russia,
† e-mail: georgealeshkin@outlook.com
† ORCID: 0000-0002-9465-1191

1. Введение

При реализации быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов успех проведения мероприятий защиты населения и территорий от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций во многом зависит от правильности выбора мероприятий защиты и своевременности их выполнения.

В свою очередь, выбор мероприятий защиты зависит от оперативности и точности представляемых прогнозов развития обстановки поскольку, с одной стороны, оперативный прогноз позволит создать запас времени для реализации мероприятий защиты, с другой стороны, если прогноз достаточно оперативен, но недостаточно точен, проводимые мероприятия могут и не привести к достижению необходимого уровня защиты.

В полной мере данное утверждение касается и гидротехнических сооружений как источников потенциальной опасности. С наибольшими сложностями приходится сталкиваться в случае малых гидротехнических сооружений, в число которых относятся шламонакопителей. Из-за отсутствия тотального контроля и сравнительной многочисленности они представляют собой наибольшую опасность для населения. В частности, можно привести пример аварии на гидротехническом сооружении технологического водоема золотодобывающей артели в Красноярском крае в 2019 г. [1]. Одной из наиболее частых причин разрушения гидротехнических сооружений является воздействие поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (в частности, при возникновении опасных метеорологических явлений и процессов).

Большинство малых гидротехнических сооружений в настоящее время относится к грунтовым плотинам. Основное и существенное преимущество грунтовых плотин состоит в том, что для их возведения используется

местный строительный материал - грунт. В связи с тем, что непосредственно материал для их возведения относительно легкодоступен, фактически стоимость работ определяется только разработкой карьеров, транспортными издержками и непосредственно работами по возведению плотины. Грунтовые плотины, как правил, возводятся в виде насыпи, имеющей поперечное сечение в виде трапеции. Однако желание сэкономить зачастую может привести и приводит к аварийным ситуациям. При этом ошибки проектирования или эксплуатации могли бы быть устранены в случае правильной оценки текущего состояния гидротехнического сооружения и его устойчивости к действию поражающих факторов чрезвычайных ситуаций.

В существующих методиках [2-5] при оценке последствий воздействия толщи воды на стенки гидротехнического сооружения (грунтовой плотины) учитывается только фактор воздействия давления на тело плотины. Существующие численные методы решения задач прогноза состояния гидротехнических сооружений [6, 7] сложны, так как требуют применения специализированных программных комплексов и не могут быть применены при проведении оперативных расчетов.

Сами по себе проведенные расчеты, как правило, позволяют осуществить только оценку состояния гидротехнического сооружения при отсутствии практических рекомендаций по перечню инженерно-технических мероприятий повышения устойчивости сооружений.

Целью настоящей статьи является построение математической модели и проведение с ее помощью численного эксперимента, позволяющего получить статистические данные, необходимые для формирования подхода к обоснованию рациональных параметров системы защиты гидротехнического сооружения в условиях воздействия пора-

жающих факторов опасных метеорологических явлений.

2. Модель

Проведение численного эксперимента будет заключаться в моделировании воздействия разных по величине значений поражающего фактора при множестве различных сочетаний конструктивных параметров гидротехнического сооружения и свойств материалов его составляющих.

Конечным итогом моделирования станет определение значений показателя устойчивости для каждого конкретного случая моделируемого воздействия, который определяется, как соотношение сумм удерживающих сил к сдвигающим силам [8]:

$$K_{уст} = \frac{S_{уд}}{S_{сдв}} \quad (1)$$

где: $S_{уд}$ – сумма удерживающих сил (зависит от составляющих сил тяжести, стремящихся удержать породы в равновесии, расчетного сцепления пород, длины поверхности скольжения); $S_{сдв}$ – сумма сдвигающих сил (зависит от силы тяжести, веса пород).

Идея дальнейшего применения полученных с помощью численного эксперимента статистических данных состоит в выявлении аналитического вида зависимости значений коэффициента устойчивости от конструктивных параметров гидротехнического сооружения, свойств материалов его составляющих и величин воздействующего на объект поражающего фактора.

Для нахождения значений коэффициента устойчивости зачастую применяются программные комплексы (в частности, Geostudio), реализующие численные методы решения.

В качестве граничной точки, определяющей состояние гидротехнического сооружения «разрушен»–«не разрушен» принимается значение коэффициента устойчивости 2,5 [9]. Устойчивость плотины определяется устойчивостью низовой упорной призмы, разрушение откоса которой происходит по классической кругло-цилиндрической поверхности.

В качестве параметров, на которые можно непосредственно оказывать влияние в построенной модели выступают:

e – пористость материала;

γ – плотность материала (кН/м^3);

v – максимальная скорость фильтрации (м/с);

K_x – коэффициент водопроницаемости (м/сут);

E_i – стандартная сила между блоками, составляющими тело плотины (Н);

K_i – сдвиговая сила между блоками, составляющими тело плотины (Н);

W_i – вес отдельных блоков, составляющих тело плотины (Н);

R_w – влажность грунта (кг/м^3);

E – прочность грунта на сжатие (МПа);

P – величина воздействующей массы воды (определяется как отметка уровня воды в верхнем бьефе) (Н).

Проведение численного эксперимента предполагает, что при заблаговременных расчетах удастся определить множество таких состояний гидротехнического сооружения, которые соответствуют его не разрушению.

При изменении параметров материалов, составляющих грунтовую плотину, и ее геометрических параметров планируется построить простейшую аналитическую зависимость вида (2):

$$K_{уст} = f(e, \gamma, v, K_x, E_i, K_i, W_i, R_w, E, P). \quad (2)$$

Построенная зависимость позволит повысить оперативность прогноза состояния плотин и определить (за счет решения оптимизационной задачи) оптимальные значения параметров, на которые можно повлиять путем реализации инженерно-технических мероприятий защиты.

3. Результаты

При проведении численных экспериментов (для построения регрессионной зависимости) применялся программный комплекс GeoStudio с использованием программного модуля SLOPE/W, который позволяет вычислять коэффициент запаса устойчивости и строит критическую поверхность скольжения (призму обрушения) по следующим методикам: методу Бишопа, методу Джанбу,

методу Спенсера и методу Моргенстен-Прайса. Все методы предельного равновесия допускают, что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). Поверхность скольжения рассматривается круглоцилиндрической формы. На отдельные блоки действуют силы, представленные на рис. 1.

Рис.1. Система сил, действующих на произвольный отсек призмы обрушения

В ходе проведения эксперимента считается, что устойчивость откоса обеспечена, если $K_i \geq 1,1 \dots 1,5$. При данных параметрах откос является устойчивым и не требует усиления [10].

Модуль SEEP/W в программном комплексе GeoStudio имитирует движение жидкой воды или водяного пара через насыщенную или ненасыщенную пористую среду. Это позволяет моделировать постоянный или кратковременный поток грунтовых вод в естественных условиях с учетом климатических граничных условий [11].

Закон сохранения массы:

$$\dot{M}_{st} = \frac{dM_{st}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{M}_s \quad (3)$$

где M_{st} – запасенная масса; m_{in} – масса притока воды; m_{out} – масса оттока воды; M_s – источник массы или сток в рассматриваемом элементарном объеме.

Формулировка общего предельного равновесия (значение устойчивости гидротехнического сооружения) основана на уравнении с двумя факторами безопасности. В программном комплексе GeoStudio это реализуется модулем SLOPE/W. Одно уравнение да-

ет запас прочности по моменту равновесия k_m , другое уравнение определяет коэффициент безопасности по отношению к равновесию горизонтальных сил k_f [12].

Коэффициент запаса прочности относительно моментного равновесия составляет

$$k_m = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) \cdot R \cdot \tan(\varphi'))}{\sum W \cdot x - \sum N \cdot f \mp \sum D \cdot d} \quad (4)$$

Коэффициент запаса прочности по отношению к равновесию горизонтальных сил составляет

$$k_f = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) \cdot R \cdot \tan(\varphi'))}{\sum N \cdot \sin(\alpha) - \sum D \cdot \cos(\omega)} \quad (5)$$

где c' – сцепление материала; φ' – угол трения материала; u – поровое давление воды; N – нормальная сила основания среза; D – сосредоточенная точечная нагрузка; $\beta, R, x, f, d, \omega$ – геометрические параметры; α – угол наклона основания; W – вес среза.

Для проведения численного эксперимента рассмотрим грунтовую плотину со следующими характеристиками:

- ширина по гребню – 8 м;
- длина дамбы – 700 м;
- заложения откосов: верхового – 1:3, низового – 1:2,5;
- материал плотины – земляная;
- геология – суглинки и глины.

Результаты статического расчета откоса плотины частично приведены на рис. 2.

Результаты одного из экспериментов, реализуемых в программном комплексе GeoStudio визуально представлены на рис. 3.

Следует отметить, что формирование оползневых процессов может спровоцировать воздействие внешних факторов: землетрясение, антропогенное воздействие на склоны (его подрезка, увеличение нагрузки за счёт построек и пр.) и гидротехнические мероприятия, приводящие к изменению уровня подземных вод. Часто активизация оползневых процессов происходит после паводков и половодий: при подъёме уровня вод в водоеме, происходит и подъём уровня подземных вод, а после окончания половодий и паводков некоторое время сохраняется повы-

Рис. 2. Расчётная схема к статическому расчёту низового откоса плотины

Рис.3. Определение показателя устойчивости плотины при высоте подъема воды 5 м (50% от максимальных значений)

Рис. 4. Скорость фильтрации при высоте подъема воды 5 м (50% от максимальных значений)

шенное гидродинамическое давление подземных вод при их выходе на поверхность склона. Вследствие этого происходит выдавливание присклоновой части водоносного

слоя, провоцирующее оползание расположенной выше части склона [13].

Процессы фильтрации также могут быть смоделированы в программном комплексе GeoStudio (рис. 4).

Данное обстоятельство также стоит учитывать при проведении расчетов. Так, по результатам проведенных численных экспериментов, для максимального подъема уровня воды (до момента перетекания) Под действием оползневых процессов уклон изменился с $m_1 = 2,5$ до приведенного значения уклона $m_2 = 1,5$. Соответственно изменился ко-

эффициент устойчивости с 2,975 до 2,219 (т.е. на 26%). Данное обстоятельство необходимо учитывать при построении регрессионной модели.

В рассматриваемом примере (для упрощения часть параметров принята за постоянные) результаты численных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты численного эксперимента

Отметки уровня жидкости		Максимальная скорость фильтрации (среднее значение), $\frac{м}{с}$	Материал (характеристики)			Метод оценки	Коэффициент устойчивости
Отметка верхнего бьефа, м	Отметка нижнего бьефа, м		Название	Коэффициент водопроницаемости, $\frac{м}{с}$ (Saturated Kx)	Влажность, $\frac{м^3}{м^3}$ (residual water content)		
1	0,2	$3,2 \cdot 10^{-7}$ ($1,6 \cdot 10^{-7}$)	Глина ($e = 0,8$; $\gamma_{гр} = 18 \frac{кН}{м^3}$)	0,000001	0,5	Моргенштерн-Прайс	107,3
2	0,3	$4,5 \cdot 10^{-7}$ ($2,5 \cdot 10^{-7}$)					26,6
3	0,4	$3,5 \cdot 10^{-7}$ ($2 \cdot 10^{-7}$)					12,3
4	0,4	$4 \cdot 10^{-7}$ ($2 \cdot 10^{-7}$)					8,4
5	0,8	$5 \cdot 10^{-7}$ ($2,5 \cdot 10^{-7}$)					6,6
6	1,2	$4 \cdot 10^{-7}$ ($2 \cdot 10^{-7}$)					5,4
7	1,9	$5,5 \cdot 10^{-7}$ ($3 \cdot 10^{-7}$)					4,6
8	2,6	$7,5 \cdot 10^{-7}$ ($3,5 \cdot 10^{-7}$)					3,5
9	3,5	$8 \cdot 10^{-7}$ ($4 \cdot 10^{-7}$)					3,0
10	5	$8,5 \cdot 10^{-7}$ ($4,5 \cdot 10^{-7}$)					2,9
>10	Перелив	$8 \cdot 10^{-7}$ ($4 \cdot 10^{-7}$)					-

4. Заключение

Формирование на основе полученных в ходе проведения численного эксперимента аналитической зависимости вида (2) позволит решить три задачи:

1) повысить оперативность (при удовлетворительной точности) прогноза состояния гидротехнических сооружений в случае угрозы влияния поражающих факторов быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов;

2) сформулировать оптимизационную задачу по приведению к максимальным значениям показателя устойчивости $K_{уст}$ при ограниченных значениях факторов, на которые можно оказывать непосредственное влияние;

3) на основе решенной оптимизационной задачи определить рациональные параметры системы защиты (изменяемых параметров) и сформировать перечень мероприятий по их достижению.

Список литературы

1. Отчет Енисейского управления Ростехнадзора об аварии насыпи в Курагинском районе Красноярского края [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://enis.gosnadzor.ru/news/65/1044/> (дата обращения: 10.10.2020).

2. Низаметдинов Ф.К., Бесимбаева О.Г., Ожигин С.Г., Родина Е.М. Инструментальные наблюдения за состоянием насыпных ограждающих дамб // Труды Карагандинского государственного технического университета. 2002. №1. С.35-38.

3. Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. №1. С.62-65.

4. П-842-86 (Гидропроект). Рекомендации по оценке надежности гидротехнических сооружений <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/60936> (дата обращения 10.10.2020)

5. Panulinova E., Kharabinova S. Methods for Analyzing the Stability of an Earthen Dam Slope // Advanced Materials Research. 2014, Vol. 969. P. 245-248.

6. Karimi H., Hasani H., Mamizadeh J. Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam DAM-Iran) // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol.21(9). P. 1398-1402.

7. Tatevar S.P., Laxman N., Pawade. Stability Analysis of Earth Dam by Geostudio // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2012. Vol. 3. Issue 2. P. 437-446.

8. Шакарна С. Оценка надежности гидротехнических сооружений на основе системного подхода с учетом сейсмических условий: диссертация кандидата технических наук:

References

1. Report of the Yenisei Department of Rostekhnadzor About the accident of the embankment in the Kuraginsky district of the Krasnoyarsk Territory [Electronic resource]. Access mode: <http://enis.gosnadzor.ru/news/65/1044/> (date of access: 10.10.2020). (In Russian)

2. Nizametdinov F.K., Besimbaeva O.G., Ozhigin S.G., Rodina E.M. Instrumental observations of the state of bulk enclosing dams. *Proceedings of the Karaganda State Technical University*, 2002, No. 1, pp. 35-38. (In Russian)

3. Yuzbekov N.S. Problems of assessing the state of soil dams. *Civil security technologies*, 2004, No. 1, pp. 62-65. (In Russian)

4. P-842-86 (Hydroproject) Recommendation for assessing the reliability of hydraulic structures. <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/60936> (date of access: 10.10.2020). (In Russian)

5. Panulinova E., Kharabinova S. Methods for analyzing the stability of the slope of an earthen dam. *Perspective studies of materials*, 2014, Vol. 969, pp. 245-248.

6. Karimi H., Hasani H., Mamizadeh J. Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam DAM-Iran). *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol.21(9), pp. 1398-1402.

7. Tatevar S.P., Laxman N., Pavade. Analysis of the stability of an earth dam using Geostudio // *International Journal of Civil Engineering and Technologies*, 2012, Vol. 3, No. 2, pp. 437-446.

8. Shakarna S. Assessment of the reliability of hydraulic engineering structures on the basis of the system approach taking into account seismic conditions: dissertation of a candidate

- 05.23.07 / Шакарна Салех. М., 2012. 158 с. † of technical sciences: 05.23.07 / Shakarna
9. Орехов В.В. Устойчивость грунтовой † Saleh. - Moscow, 2012 . 158 p. (In Russian)
плотины с вертикальной диафрагмой // Вест- † 9. Orekhov V.V. Stability of a soil dam with
ник МГСУ. 2016. №1. С.143-149. † a vertical diaphragm. *Vestnik MGSU*, 2016, No.
10. Оника С.Г. Устойчивость бортов † 1, pp. 143-149. (In Russian)
карьеров. Минск: БНТУ, 2016. 43 с. † 10. Onika S.G. Stability of the sides of open
11. GeoSlope International Ltd, 2018. 80 p. † pits. Minsk, BNTU, 2016 . 43 p. (In Russian)
12. GeoSlope International Ltd, 2017. 250 p. † 11. GeoSlope International Ltd, 2018.80 p.
13. Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Курс † 12. GeoSlope International Ltd, 2017.250 p.
«Общая геология». Учебное пособие к раз- † 13. Popov Yu.V., Pustovit O.E. Course
делу «Континентальные склоновые процес- † "General Geology". Textbook for the section
сы и отложения». Москва-Берлин: Директ- † "Continental slope processes and sediments".
Медиа, 2016. 48 с. † Moscow-Berlin, Direct-Media, 2016. 48 p. (In
Russian)