

9. Caddo M.B. And investigation of modified concrete on the basis of polydispersent base with complex polymern urgerm modifier // Silicate technique and technology. 2022. T. 29, № 1. S. 37–44.

10. Tkach E.V. Modified heavy concrete based on polydisperse binder for hydro-reclamation construction // Silicate technique and technology. 2022. T. 29, № 4. S. 326–334.

11. Filtration in canals with an earth bed and new methods of slope fastening / F.K. Abdrazakov, A.A. Rukavishnikov, O.V. Mikheeva, E.N. Mirkina // Agrarian Scientific Journal. 2023. № 6. P. 107–114. DOI 10.28983/asj.y2023i6pp107-114.

12. Baev O.A. Study of the features of constructions of antilfiltrate screens of canals and ponds-accumulations. 2014. № 3(15). P. 104–119.

Абдулмажидов Хамзат Арсланбекович, доктор техн. наук, доцент, abdulmajidov@rgau-msha.ru; **Балабанов Виктор Иванович**, доктор техн. наук, профессор, vbalabanov@rgau-msha.ru; **Белов Игорь Викторович**, аспирант, ст. преподаватель, iv.belov@rgau-msha.ru; **Гавриловская Надежда Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, gavrilovskayanv@rgau-msha.ru (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия).

УДК 626-315.3

DOI: 10.32962/0235-2524-2026-1-7-11

ВЕРИФИКАЦИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

В.В. СОРОКА, С.С. ТУРАПИН, А.Е. КАЧАЕВ

Ключевые слова: верификация, откос, коэффициент устойчивости, плотина, метод снижения прочности, метод конечных элементов

Keywords: verification, slope, stability factor, dam, strength reduction method, finite element method

Аннотация. В исследовании рассматриваются ключевые аспекты оценки устойчивости откосов, что является важной задачей в области геотехнической безопасности при проектировании инженерных сооружений. В работе акцентируется внимание на необходимости учета неопределенности и возможности переноса параметров на другие случаи, что требует строгого подхода к верификации моделей. Обзор включает анализ данных, полученных D.V. Griffiths и P.A. Lane, и подчеркивает различия между двумя стадиями верификации: корректностью расчетов и соответствием реальному режиму, что часто приводит к путанице в интерпретации результатов. Исследование выделяет преимущества применения метода конечных элементов, который позволяет гибко интегрировать численные методы и не требует предварительного знания механизма разрушения. В условиях растущей урбанизации и изменения климатических условий возрастает потребность в надежных методах прогнозирования устойчивости откосов. Выводы подчеркивают важность системного подхода к верификации и необходимости унифицированных наборов данных для калибровки и проверки моделей, что может значительно повысить надежность и точность в оценке устойчивости склонов. Расхождение между результатами численного моделирования откосов по параметру коэффициента устойчивости и перемещений и аналогичными параметрами, определяемыми по методу Morgenstern-Price не превышает 4 %.

Abstract. This study examines key aspects of slope stability assessment, a critical issue in geotechnical safety design for engineering structures. It emphasizes the need to account for uncertainty and the transferability of parameters to other cases, which requires a rigorous approach to model verification. The review includes an analysis of data obtained by D.V. Griffiths and P.A. Lane and highlights the differences between two stages of verification: calculation accuracy and compliance with real-world conditions, which often leads to confusion in the interpretation of results. The study highlights the advantages of using the finite element method, which allows for the flexible integration of numerical methods and does not require prior knowledge of the failure mechanism. In the context of increasing urbanization and climate change, the need for reliable methods for predicting slope stability is increasing. The findings emphasize the importance of a systematic approach to verification and the need for unified datasets for model calibration and validation, which can significantly improve the reliability and accuracy of slope stability assessment. The discrepancy between the results of numerical modeling of slopes based on the stability and displacement coefficient parameter and similar parameters determined using the Morgenstern-Price method does not exceed 4 %.

Введение. Устойчивость откосов является одной из ключевых задач геотехнической безопасности при проектировании инженерных сооружений и при оценке рисков, связанных с эксплуатацией природных склонов. Применение численных методов дает возможность учитывать нелинейную связность грунтов,

геомеханические свойства, запаздывания и различного рода внешние воздействия (нагрузки от грунтового давления, водонапор, сейсмические воздействия). Однако надежность таких оценок во многом определяется корректной верификацией численных моделей: совпадение решения с известными аналитическими результатами, с данными лабораторных и полевых испытаний и стабильная сходимость при изменении дискретизации и параметров моделирования [1, 2].

Для оценки прочности и устойчивости откосов применяют как аналитические методы (методы Феллениуса [3], Бишопа [4], которые предполагают форму скольжения в виде дуги круга; методы Спенсера [5], Джанбу [6], Morgenstern-Price [7], Шахунянца [8], которые моделируют поверхность скольжения как ломаную линию), так и численные методы (например, метод конечных элементов – МКЭ [9, 10]), которые позволяют учитывать геомеханику материалов, геометрию откоса, неоднородности и нелинейность поведения грунтов. Однако надежная верификация численных моделей требует сопоставления результатов численного моделирования с известными аналитическими решениями или с эталонными тестами, особенно в случаях однородных откосов, где можно аппроксимировать поведение конечного элемента аналитическими формулами (например, для бесконечного откоса).

В статье рассматривается методологический подход к верификации устойчивости однородных откосов посредством численных моделей на основе конечных элементов и сопоставления с аналитическими решениями для бесконечного откоса, а также исследуются влияния параметров сетки, материала и граничных условий на получаемые значения фактора устойчивости объекта исследования.

Целью исследования является разработка методологии оперативной верификации и демонстрация ее применения на примере устойчивости различного устройства однородных откосов, оцениваемых численными методами с использованием современных моделей грунтов и методов аналитического расчета.

В последние годы на фоне роста темпов урбанизации, расширения инфраструктурных проектов и измене-

ний климатических условий возрастает потребность в надежных методах прогнозирования устойчивости откосов.

В литературе четко различают два уровня верификации: техническую проверку численного алгоритма и эмпирическую валидацию моделей на основе данных по реальным откосам. Значительная часть работ сфокусирована на сравнении результатов разных методик расчета устойчивости (limiting equilibrium против численного моделирования FE/FD), анализе чувствительности к параметрам грунтов (коэффициент k' и угол трения ϕ' , плотность γ , влажность, поровое давление) [11]. Однако систематический подход к агрегированному анализу данных по верификации остается недостаточно развитым: отсутствуют унифицированные наборы данных для калибровки и проверки моделей, как правило, отсутствуют открытые базы полевых наблюдений, а существующие кейсы часто ограничиваются конкретными регионами и типами грунтов.

Проблемы усложняются высокой пространственной и временной вариабельностью свойств грунтов, неустойчивостью грунтовых массивов, динамическими воздействиями (осадки, дожди, паводки) и сложной гидрогеологической конфигурацией, что требует строгого учета неопределенности и допущения к верификации. Кроме того, различия между двумя стадиями верификации (корректность расчета и соответствие реальному режиму) нередко приводят к путанице в интерпретации результатов и к разной трактовке критериев соответствия.

Методы и объект исследования. В исследовании проверяются данные, полученные D.V. Griffiths и P.A. Lane для оценки стабильности откосов в условиях понижения уровня воды [12]. В настоящем исследовании рассматривается верификация устойчивости откосов — объектов исследования, которые показаны на рис. 1. В концепции информационного моделирования [13, 14] объектов капитального строительства и гидротехнического назначения. На рис. 1а показана грунтовая

плотина с верховым и низовым откосом. В практике рассчитывается на устойчивость низовой откос [2, 14], который находится в менее увлажненном состоянии и обеспечивает стабильное состояние всей плотины. При этом используются аналитические методы расчета устойчивости откосов, изложенные в работах [3–8]. На рис. 1б показан однородный откос со слабым подстилающим слоем в относительных размерах, зависящих от величины параметра H .

На рис. 1а показана модель плотины с фреатической поверхностью, которая изменяется от уровня водохранилища до уровня основания. Анализ устойчивости склонов проводится методом снижения прочности (Strength Reduction Method — SRM) для двух случаев: А) с уровнем воды и Б) без уровня воды.

На рис. 1б показан исследуемый объект с уклоном слоя основания и с заделанным слоем более слабого материала для имитации скользкой облицовки в системе свалок. Смещения ограничены в горизонтальном направлении вдоль вертикальных кромок и во всех направлениях вдоль нижней кромки. Наклонная система подвергается воздействию собственного веса. В таблице показаны данные, необходимые для численного моделирования исследуемых объектов (рис. 1) в программном комплексе GTS NX.

Верификация численных моделей откосов в гидротехнике необходима для подтверждения того, что аналитические методы расчета и программный код, полученный с помощью расчетного программного комплекса, корректно решают поставленные физические задачи в процессе информационного моделирования гидротехнического объекта, а, следовательно, обеспечивают надежность при принятии проектных решений на различных стадиях жизненного цикла объекта.

Результаты и их обсуждение. После проведения численного расчета объектов исследования, показанных на рис. 1, и расчета параметров устойчивости откосов

в качестве верификационного метода выбран метод Morgenштерна-Прайса [6], который учитывает все три условия равновесия (силы в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также моменты) и силы взаимодействия между блоками, что делает его более точным, чем упрощенные методы [2–5]. При этом остается практичным и применимым для различных форм поверхностей скольжения, включая некруглые, в отличие от многих других, благодаря своей гибкости и возможности интеграции с численными методами, например, как в нашем случае с конечными элементами.

На рис. 2 показаны деформированные формы численной модели, представленной на рис. 1а, вблизи точки неустойчивого равновесия, как с уровнем воды — случай А, так и без нее — случай Б.

В обоих случаях неустойчивость возникает в области, где откос более крутой — в данном случае на низовом

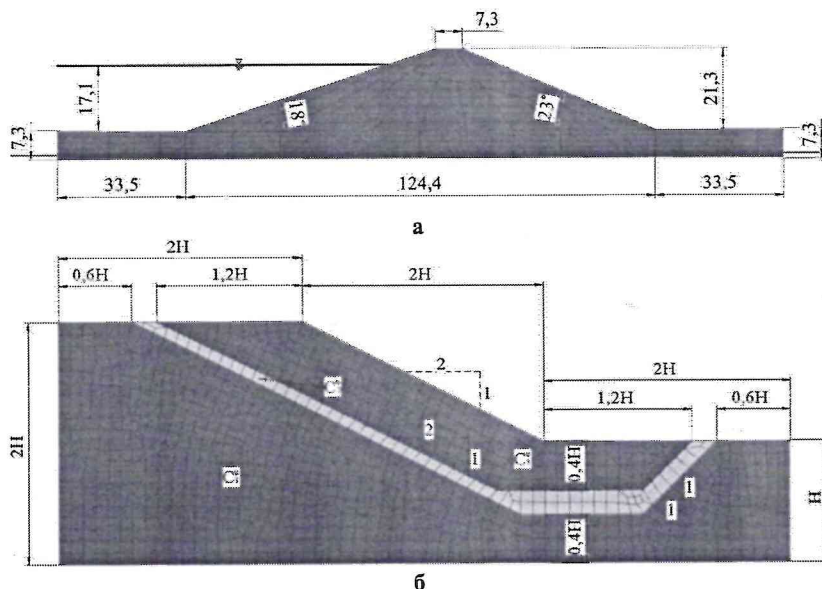


Рис. 1. Объекты исследования в конечных элементах:

а — однородный откос грунтовой плотины (размеры в метрах); б — однородный откос со слабым подстилающим слоем (размеры — функция $f(H)$)

Данные для численного моделирования объектов исследования

Материал откоса (однородный, глины или суглинки уплотненные, рис. 1а)	Модуль упругости Юнга	$E=0,2 \text{ ГПа}$
	Коэффициент Пуассона	$\nu=0,3$
	Название модели (тип)	Мора-Кулона
	Когезия (сцепление грунта)	$13,8 \text{ кПа}$
	Угол внутреннего трения	37°
	Угол дилатансии	37°
Нагрузка при моделировании	Собственный вес	$\gamma_T = 18,2 \text{ кН/м}^3$
Материал откоса (однородный, глинистый грунт с добавками, рис. 1б)	Модуль упругости Юнга	$E=0,8 \text{ ГПа}$
	Коэффициент Пуассона	$\nu=0,3$
	Название модели (тип)	Мора-Кулона
	Когезия (сцепление грунта)	$C^u_1 = 50 \text{ кПа}$
	Когезия (сцепление грунта)	$C^u_2 = 10...50 \text{ кПа}$
	Угол внутреннего трения	0°
	Угол дилатансии	0°
Нагрузка при моделировании	Собственный вес	$\gamma_T = 20 \text{ кН/м}^3$

откосе. Также следует отметить, что если учитывать наличие воды в объеме грунта (случай А), механизм разрушения распространяется глубже в основание плотины, в то время в случае Б, приводит к разрушению основания откоса с меньшими перемещениями, чем в случае А. Например, максимальные перемещения в низовом откосе плотины в случае А составляют 0,423 м, в случае Б – 0,299 м. Эти результаты согласуются с решениями для предельного равновесия, включенными в справочник [15].

В обоих случаях перемещения ограничены в горизонтальном направлении вдоль вертикальных краев и во всех направлениях вдоль нижнего края. В программном комплексе GTS NX модель грунтовой плотины подвергается воздействию собственного веса и внешнего давления из-за наличия воды в водохранилище (только случай А). Для случаев А и Б установлены аналитическим расчетом по методу [6] коэффициенты устойчивости откоса 2,42 и 1,9 соответственно (рис. 3) в зависимости от параметра полных перемещений в грунтовой плотине.

Полученные коэффициенты устойчивости (безопасности) (Factor of Safety – FoS) при рассмотрении обоих случаев сравниваются с эталонными значениями, полученными при аналитическом расчете этих параметров по методу Моргенштерна-Прайса [6].

По результатам численного моделирования, показанным на рис. 2, графические зависимости на рис. 3 устанавливают изменение коэффициента устойчивости откоса исследуемого объекта (рис. 1а) в зависимости от максимальных перемещений в теле плотины при сохранении ее устойчивости и численно определенном коэффициенте устойчивости для рассматриваемых случаев А и Б. Так, для случая А численным расчетом в программном комплексе GTS NX коэффициент устойчивости равен 2,5094, для случая Б – 1,9656. Суммарная погрешность между результатами численного и аналитического расчетов грунтовой плотины для случая А составляет +3,69 %, для случая Б – +3,45 %.

На основании полученных данных по верификации коэффициента устойчивости для объекта, показанного на рис. 1а, можем заключить, что статистическая погреш-

ность в 3 % близка к значениям расхождения, полученным аналитическими и численными методами. Полученные данные верификации коэффициентов устойчивости по объекту на рис. 1а считаем удовлетворительными и достоверными для принятия конструктивных и технологических решений по обеспечению должного уровня безопасности на объектах подобного при выполнении работ по капитальному ремонту или реконструкции.

Результаты численного расчета объекта исследования, показанного на рис. 1б, представлены на рис. 4. Представлена динамика перемещений одно-

родного откоса со слабым подстилающим слоем. Графическое изображение на рис. 4а показывает начальные перемещения в теле откоса при соотношении сцепления грунтов равно $C^u_2/C^u_1=0,2$, когда сцепление основного грунта откоса равно 50 кПа, а сцепление подстилающего слоя – 10 кПа. Графическое изображение на рис. 4б показывает начальные перемещения в теле откоса при соотношении сцепления грун-

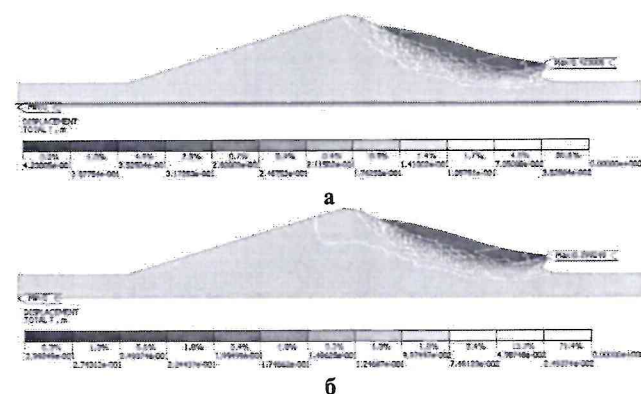


Рис. 2. Деформированная форма низового откоса грунтовой плотины при потере устойчивости:
а – случай А; б – случай Б

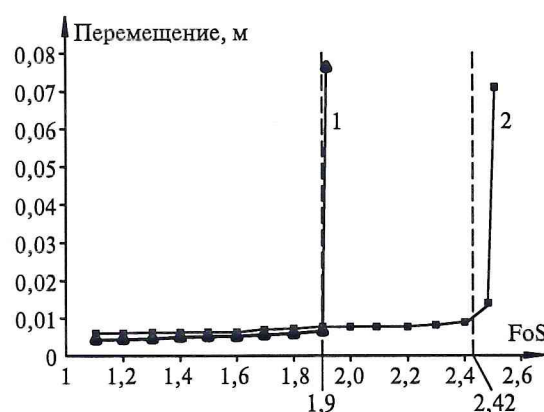


Рис. 3. Коэффициент устойчивости откоса:
1 – случай А; 2 – случай Б

тов равном $C_2^u/C_1^u=0,6$, когда сцепление основного грунта откоса равно 50 кПа, а сцепление подстилающего слоя — 30 кПа.

На рис. 4 в показаны начальные перемещения в теле откоса при соотношении сцепления грунтов равном $C_2^u/C_1^u=1$, когда сцепление основного и подстилающего грунтов откоса равно 50 кПа. При сохранении прочности грунта проведена оценка устойчивости склона для нескольких значений прочности слабого слоя: $C_2^u/C_1^u=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ и 1 (рис. 5).

На рис. 4 приведены деформированные формы исследуемой модели, показанной на рис. 1б, вблизи точки неустойчивого равновесия для различных значений прочности слабого слоя. Рассмотрим три точки графика (рис. 5), при которых соотношение C_2^u/C_1^u равно 0,2, 0,6 и 1. Деформированная форма соответствует форме сла-

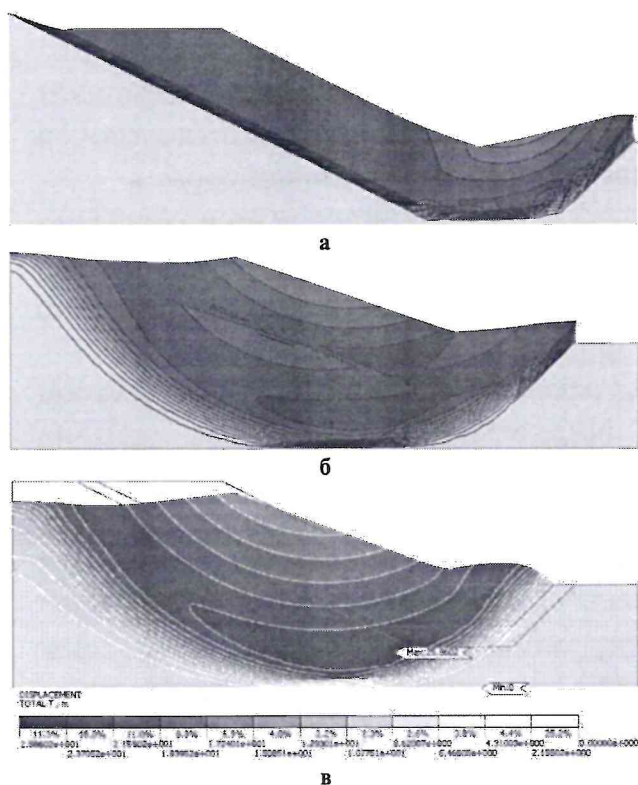


Рис. 4. Деформированная форма откоса со слабым подстилающим слоем:

а — $C_2^u/C_1^u=0,2$; б — $C_2^u/C_1^u=0,6$; в — $C_2^u/C_1^u=1$

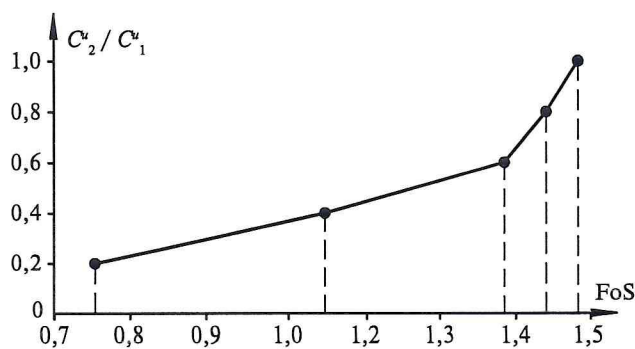


Рис. 5. Зависимость коэффициента устойчивости откоса от соотношения сцеплений грунтов C_2^u/C_1^u

бого слоя для $C_2^u/C_1^u=0,2$ и приобретает круглую форму по мере приближения модели к однородной. Оба механизма отказа становятся активными при $C_2^u/C_1^u=0,6$.

Именно для соотношения $C_2^u/C_1^u=1$ будет верифицироваться максимальное значение коэффициента устойчивости откоса: аналитический расчет по методу Morgenштерна-Прайса [6] дает величину, равную 1,47, а численное моделирование — 1,4617. Расхождение между результатами составляет 0,56 %. Следовательно, можно сказать, что результат численного моделирования откоса, показанного на рис. 1б, с высокой степенью достоверности верифицируется с аналитическим расчетом исследуемого параметра. Эти результаты иллюстрируют преимущества анализа устойчивости откосов различного устройства на основе конечных элементов, который не требует априорного знания механизма разрушения.

Выводы. Исследование подчеркивает важность корректной верификации численных моделей для достижения достоверных результатов, что включает сравнение с аналитическими данными и лабораторными испытаниями. С учетом полученных результатов и оценки их точности предложен метод верификации численных результатов моделирования устойчивости различных устройств откосов с результатами аналитического метода Morgenштерна-Прайса для определения одноименного параметра.

Применение метода конечных элементов для анализа устойчивости откосов демонстрирует преимущества, такие как отсутствие необходимости в априорном знании механизма разрушения и оперативность нахождения значения коэффициента устойчивости откоса при различном его нагружении.

Учет неопределенности и влияние различных параметров на устойчивость откосов являются ключевыми аспектами для повышения точности и надежности численных расчетов.

Научная значимость заключается в разработке методологии верификации численных моделей, что способствует улучшению теоретических основ анализа устойчивости откосов.

Практическая значимость исследования проявляется в возможности применения полученных результатов для оценки и мониторинга устойчивости откосов в реальных условиях, что может предотвратить потенциальные разрушения и повысить безопасность объектов гидротехнического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анискин Н.А., Сергеев С.А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12, № 3. С. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.
2. Качаев А.Е., Турапин С.С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. 2024. № 4. С. 4–13. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-04-001.
3. Fellenius W. Calculation of the Stability of Earth Dams, Trans. 2nd Cong. on Large Dams. Vol. 4. 1936. 445 p.
4. Bishop A.W., Morgenstern N. Stability Coefficients for Earth Slopes. Géotechnique. Vol. 10(4).1960. Pp. 129–153. DOI: 10.1680/geot.1960.10.4.129.
5. Spencer E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. Geotechnique. Vol.17. Pp. 11–26. 1967. DOI: 10.1680/geot.1967.17.1.11.

6. Janbu N. Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. In: Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden, 1954. Pp. 43–49.
7. Morgenstern N.R., Price V.E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*. Vol. 15. 1965. Pp. 79–93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79.
8. Шахунянц Г.М. Земляное полотно железных дорог. М.: Трансжелдориздат, 1953. 828 с.
9. Моделирование устойчивости откоса по различным кривым скольжения / К.Н. Анахаев, А.С. Бестужев, В.В. Беликов, А.Б. Балкизов, М.О. Мамчурев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 4. С. 55–69. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-55-69.
10. Применение метода конечных элементов в геотехнических расчетах по первому предельному состоянию / В.Г. Федоровский, Г.А. Бобырь, И.А. Бокон, С.В. Ильин // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 1(20). С. 102–112.
11. Качаев А.Е., Турапин С.С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6–10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
12. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Jnl. Geotech. and Geoenv. Engng*. Vol. 126(5). 2000. Pp. 443–450.
13. Механизация транспортных процессов в дорожном строительстве: учебное пособие / А.А. Романович, В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, А.Е. Качаев, Е.В. Харламов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 134 с.
14. Качаев А.Е., Турапин С.С. Анализ этапов BIM-моделирования при проектировании и реконструкции гидротехнических сооружений // Наука и мир. 2025. № 1. С. 16–20. DOI: 10.26526/2307-9401-2025-1-16-20.
15. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии). 2-е изд. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.
5. Spencer E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Geotechnique*. Vol.17. Pp. 11–26. 1967. DOI: 10.1680/geot.1967.17.1.11.
6. Janbu N. Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. In: Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden, 1954. Pp. 43–49.
7. Morgenstern N.R., Price V.E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*. Vol. 15. 1965. Pp. 79–93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79.
8. Shakhunyants G.M. Railway Roadbed. Moscow, Transzheldorizdat, 1953. 828 p.
9. Anakhaev K.N., Bestuzheva A.S., Belikov V.V., Balkizov A.B., Mamchuev M.O. Modeling Slope Stability Using Various Slip Curves // Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2025. Vol. 27. No. 4. Pp. 55–69. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-55-69.
10. Fedorovsky V.G., Bobyr G.A., Bokov I.A., Ilyin S.V. Application of the finite element method in geotechnical calculations for the first limit state // Bulletin of the Scientific Research Center Construction. 2019. No. 1(20). Pp. 102–112.
11. Kachaev A.E., Turapin S.S. Features of the reconstruction of earth dams of melioration systems // Science and Peace. 2024. No. 3. Pp. 6–10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
12. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Jnl. Geotech. and Geoenv. Engng*. Vol. 126(5). 2000. Pp. 443–450.
13. Romanovich A.A., Uvarov V.A., Orekhova T.N., Kachaev A.E., Kharlamov E.V. Mechanization of transport processes in road construction: A tutorial. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. 134 p.
14. Kachaev A.E., Turapin S.S. Analysis of BIM modeling stages in the design and reconstruction of hydraulic structures // Science and Peace. 2025. No. 1. Pp. 16–20. DOI: 10.26526/2307-9401-2025-1-16-20.
15. Dalmatov B.I. Soil mechanics, foundations and foundations (including a special course in engineering geology). 2nd edition, Leningrad: Stroyizdat, 1988. 415 p.

REFERENCES

1. Aniskin N.A., Sergeev S.A. Stability of the slope of an earth dam during reservoir drawdown // Construction: Science and Education. 2022. Vol. 12, No. 3. Pp. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.
 2. Kachaev A.E., Turapin S.S. Methodology for numerical modeling of earth dam stability during emergency reservoir drawdown // Ecology and Construction. 2024. No. 4. Pp. 4–13. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-04-001.
 3. Fellenius W. Calculation of the Stability of Earth Dams, Trans. 2nd Cong. on Large Dams. Vol 4. 1936. 445 p.
 4. Bishop A.W., Morgenstern N. Stability Coefficients for Earth Slopes. *Geotechnique*. Vol.10(4).1960. Rr. 129–153. DOI: 10.1680/geot.1960.10.4.129.
- Сорока Вадим Вадимович**, студент 4-го курса, ORCID: 0009-0009-6990-3666 (Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Коломна, Россия); **Качаев Александр Евгеньевич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. отделом эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений, doctor_sement@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6840-2477; **Турапин Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, врио директора, вед. науч. сотрудник, rtgaduga@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-1198-2511 (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна, Россия).

УДК 626/627

DOI: 10.32962/0235-2524-2026-1-11-14

ОСОБЕННОСТИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЧУКСКОГО ГИДРОУЗЛА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ ВОД

Д.Е. КУПРИЯНОВ, Т.В. ПИЛИПЕНКО, Д.А. ЕФРЕМЕНКО, М.В. ГЛИСТИН

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, агрессивные воды, соленые воды, коррозия бетона, сульфатная коррозия, георадарные исследования, добротность бетона, остаточный ресурс

Keywords: hydraulic structures, aggressive waters, saline waters, concrete corrosion, sulfate corrosion, ground penetrating radar, concrete quality factor, residual service life

Аннотация. Кучукский гидроузел, расположенный на озере Кучук Алтайского края, эксплуатируется в условиях воздействия агрессивных соленых вод, что существенно влияет на долговечность и надежность его конструкций. В статье представлены результаты комплексного обследования бетонных и металлических элементов гидроузла, выполненного в рамках экспертизы декларации безопасности гидротехнического сооружения. Исследования включали визуальное обследование, неразрушающий и разрушающий контроль прочности бетона, лабораторные испытания кернов, а также георадарные исследования с анализом параметров объемной влажности и добротности бетона.

Установлено, что бетонные конструкции находятся в ограниченно работоспособном состоянии вследствие развития процессов выщелачивания и сульфатной коррозии, обусловленных химическим составом водоема. Металлические элементы характеризуются значительным коррозионным износом, превышающим 40 % от первоначальной толщины. Получена эмпирическая зависимость прочности бетона от параметра добротности Q , подтверждающая возможность использования георадарных методов для экспресс-оценки технического состояния гидротехнических сооружений. Выполнена оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций по показателю морозостойкости. Сформулированы рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации Кучукского гидроузла, соответствующие требованиям нормативных документов в области водного хозяйства и мелиорации.

Abstract. The Kuchuk hydraulic system located on Lake Kuchuk (Altai Territory) operates under the influence of aggressive saline waters, which significantly affects the durability and reliability of its structures. The article