

Научная статья

УДК 627.83

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-36-47>

EDN KXXRUE

Оценка технического состояния комплекса гидротехнических сооружений водозабора с применением численных методов моделирования

*Сергей Олегович Агеев¹, Вера Валерьевна Гоголева²,
Денис Романович Романов³✉, Анна Алексеевна Ханова⁴*

¹

*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия*

^{2, 3}*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия, romatov.d.r@outlook.com*

⁴*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия*

Аннотация. С целью анализа эксплуатации комплекса гидротехнических сооружений (ГТС) водозабора с точки зрения безопасности и надежности проводится оценка технического состояния с применением численных методов моделирования. Оценка технического состояния ГТС, ее состав, применяемые методы регламентируются требованиями ФЗ-117 «О безопасности гидротехнических сооружений» и нормативными документами в области безопасности ГТС. Поставлена задача обеспечить комплексный подход к обследованию ГТС, включающий сбор исходной информации, в том числе проведение инженерных изысканий, последовательное проведение визуальных и инструментальных осмотров и наблюдений, выполнение поверочных расчетов с применением современных инженерных программных комплексов. С целью решения одной из поставленных задач был получен и проанализирован опыт использования программы GTS NX, продукт фирмы Midas, в которой заложен метод конечных элементов. В программе GTS NX реализовано моделирование взаимодействий между сооружениями и их основаниями на основе метода конечных элементов. Для контроля и определения сходимости полученных результатов расчетов дополнительно проводятся расчеты в соответствии с рекомендациями нормативной литературы. Разница между результатами расчетов не превышает 9 %. Окончательно результаты комплексного обследования сравниваются с ранее разработанными и утвержденными в органах Ростехнадзора России критериями безопасности, проводится оценка соответствия нормативным документам в области безопасности ГТС. Применение комплексного подхода к обследованию в сочетании с численными методами моделирования позволяет не только оценить текущее состояние ГТС, но и разработать эффективные меры по обеспечению их долговечности и безопасности. Это особенно важно для сооружений, выполняющих ключевую роль в системе водоснабжения, срок эксплуатации которых составляет более 50 лет, т. к. их надежность напрямую влияет на бесперебойную работу всей инфраструктуры.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, уровень безопасности, эксплуатационная надежность, фильтрационная прочность, статическая устойчивость, метод конечных элементов

Для цитирования: Агеев С. О., Гоголева В. В., Романов Д. Р., Ханова А. А. Оценка технического состояния комплекса гидротехнических сооружений водозабора с применением численных методов моделирования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 2. С. 36–47. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-36-47>. EDN KXXRUE.

The technical condition assessment of the water intake hydraulic structures complex using numerical modeling methods

Sergei O. Ageev¹, Vera V. Gogoleva², Denis R. Romanov³✉, Anna A. Khanova⁴

¹

Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia

^{2, 3}Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia, romanov.d.r@outlook.com✉

⁴Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia

Abstract. In order to analyze the operation of the complex of hydraulic structures (HS) of the water intake from the point of view of safety and reliability, the technical condition is assessed using numerical modeling methods. The assessment of the technical condition of the HS, its composition, and the methods used are regulated by the requirements of FZ-117 "On the Safety of Hydraulic Structures" and regulatory documents in the field of HS safety. The task is to provide an integrated approach to the inspection of the HS, including the collection of initial information, including engineering surveys, consistent visual and instrumental inspections and observations, and verification calculations using modern engineering software systems. In order to solve one of the tasks set, the experience of using the GTS NX program, a Midas product, which uses the finite element method, was obtained and analyzed. The GTS NX program implements modeling of interactions between structures and their foundations based on the finite element method. To control and determine the convergence of the obtained calculation results, calculations are additionally performed in accordance with the recommendations of the regulatory literature. The difference between the calculation results does not exceed 9%. Finally, the results of the comprehensive examination are compared with the safety criteria previously developed and approved by the Rostechnadzor of Russia, and compliance with regulatory documents in the field of HS safety is assessed. The use of an integrated approach to the survey in combination with numerical modeling methods allows not only to assess the current state of the HS, but also to develop effective measures to ensure their durability and safety. This is especially important for structures that play a key role in the water supply system, which have a service life of more than 50 years, as their reliability directly affects the smooth operation of the entire infrastructure.

Keywords: hydraulic structures, safety level, operational reliability, filtration strength, static stability, finite element method

For citation: Ageev S. O., Gogoleva V. V., Romanov D. R., Khanova A. A. The technical condition assessment of the water intake hydraulic structures complex using numerical modeling methods. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;2:36-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-36-47>. EDN KXXRUE.

Введение

Анализ безопасности – это ключевой момент при эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС). Он позволяет оценить техническое состояние сооружений, своевременно выявлять возможные риски и разрабатывать стратегии по их устранению, разработать меры для обеспечения эксплуатационной надежности, что способствует безопасной эксплуатации ГТС, оптимизации затрат на ремонт ГТС, сохранению водных ресурсов и поддержанию экологического баланса.

Методы и состав наблюдений и исследований при оценке безопасности сооружений зависят от типа, класса и назначения ГТС [1] и традиционно включают следующие этапы [2]:

- визуальный осмотр: проводится для выявления видимых дефектов и повреждений;
- инструментальные наблюдения: используются для определения геометрических параметров сооружения, прочности материалов и других характеристик;
- поверочные расчеты: применяются для оценки фильтрационной прочности грунта тела и основания земляной плотины и статической устойчивости земляной плотины;
- анализ результатов: полученные данные обрабатываются и анализируются для определения технического состояния ГТС, сравниваются с критериями безопасности. Проводится оценка соответствия полученных результатов нормативным

документам в области безопасности ГТС [3]. Разрабатываются рекомендации по дальнейшей эксплуатации исследуемых ГТС.

Вероятность отказов в работе ГТС с большим сроком эксплуатации увеличивается, поэтому Ростехнадзор для всех ГТС со сроком эксплуатации свыше 50 лет предписывает проведение многофакторного обследования [4]. Обследование состояния ГТС является актуальной и важной частью контроля при их эксплуатации.

Вопросами прогнозирования уровня безопасно-

сти ГТС, оценки их эксплуатационного состояния, оценки риска аварий занимаются ведущие вузы и НИИ страны [1, 5–7]. Решение этих важных вопросов нацелено на повышение эксплуатационной надежности ГТС путем их приведения к безопасному техническому состоянию.

Объект исследования

В качестве примера рассматривается комплекс ГТС, предназначенный для водоснабжения небольшого населенного пункта (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения комплекса ГТС

Fig. 1. The layout of the HS complex

Исследуемый комплекс ГТС относится ко II классу и состоит из грунтовой плотины, водосброса, отводящего канала, донного водоспуска, оголовка, самотечной линии, береговой насосной станции. Комплекс ГТС водозабора эксплуатируется порядка 60 лет [8].

Согласно ранее проведенным исследованиям и имеющейся публикации [9], комплекс ГТС имеет высокие показатели коэффициента риска аварий и вероятности возникновения аварии из расчета на год [10], что может свидетельствовать о низком качестве проектирования, строительства и эксплуатации рассматриваемых ГТС и требует разработки мероприятий по снижению риска.

С целью всестороннего обследования комплекса ГТС и сбора исходных данных для анализа его состояния были выполнены следующие работы:

1. Инженерно-геодезические работы, включющие топографическую съемку комплекса ГТС и обмерные работы в целях выявления отклонения существующих параметров от проектных.

2. Разбивка и закрепление опорно-наблюдательной сети с целью организации мониторинга технического состояния комплекса ГТС.

Разбивка опорно-наблюдательной сети и инженерно-геодезические работы выполнялись электронным тахеометром Leica FlexLine TS-06 (точность измерений углов – 5", линий – 3 мм + 2 мм/км) и спутниковым геодезическим приемником EFT M2 GNSS (точность измерений в плане – 8 мм + 1 мм/км, по высоте – 15 мм + 1 мм/км).

Результаты выполненных работ:

– разбита опорно-наблюдательная сеть, состоящая из трех грунтовых реперов (рис. 2), шести стеновых марок, двенадцати наблюдательных марок, представляющих собой анкера;

– составлена схема размещения контрольно-измерительной аппаратуры и пунктов наблюдения на ГТС;

– составлен инженерно-топографический план комплекса ГТС.



Рис. 2. Грунтовый репер: *a* – закладка; *b* – вид сверху; *c* – конструкция

Fig. 2. Ground reference point: *a* – bookmark; *b* – top view; *c* – construction

3. Инженерно-геологические изыскания с целью определения фактических физико-механических характеристик инженерно-геологических элементов грунтов, слагающих тело и основание плотины для дальнейших фильтрационных и статических расчетов. Бурение произведено механическим способом, рейсами по $0,5 \div 1,5$ м, диаметром 135 мм, буровой

установкой УБШМ 1-20. В результате выполненных работ составлены литологические колонки (рис. 3) и определены физико-механические характеристики грунтов тела и основания грунтовой плотины.

Выделенные инженерно-геологические элементы показаны на разрезе ниже. Разрез по грунтовой плотине на ПК0 + 24 представлен на рис. 4.

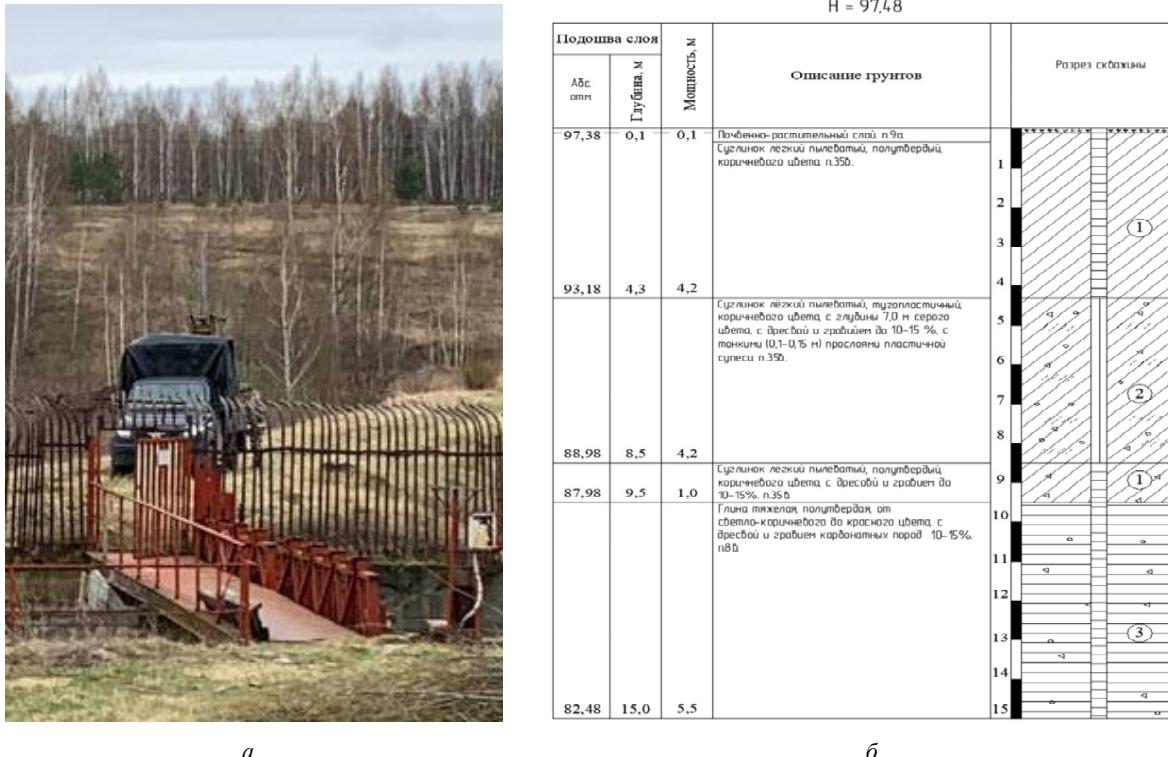


Рис. 3. Инженерно-геологические изыскания: *a* – буровая установка УБШМ 1-20; *b* – литологическая колонка по скважине 1

Fig. 3. Engineering and geological surveys: *a* – drilling rig UBSM 1-20; *b* – lithological column for well 1

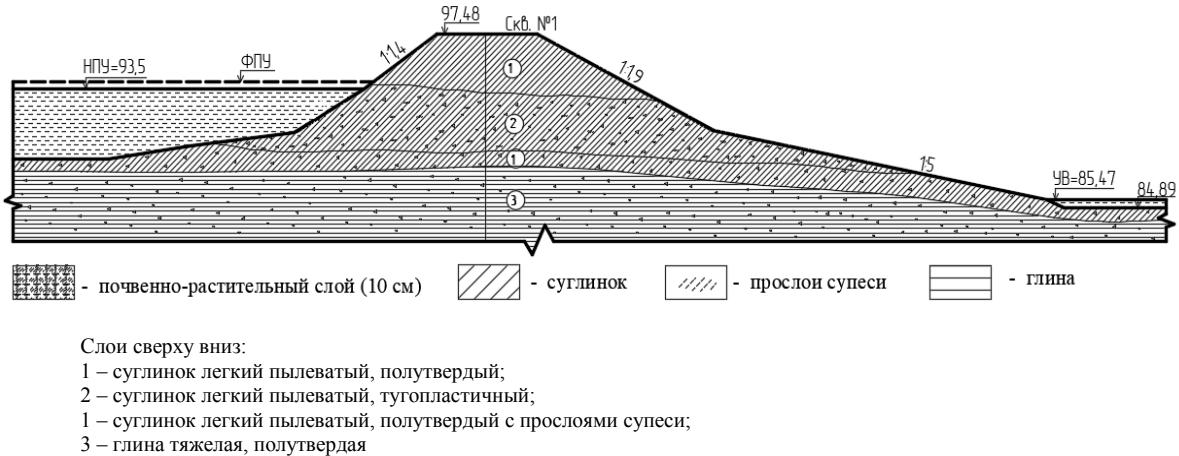


Рис. 4. Разрез по грунтовой плотине согласно результатам проведенных изысканий

Fig. 4. The section along the soil dam according to the results of the conducted surveys

4. Визуальное и инструментальные обследования с целью подготовки материалов (профиль плотины, заложение откосов, дефекты сооружений, очаги фильтрации и др.) для дальнейших расчетов.

В результате визуального и инструментального обследования выявлены следующие основные дефекты, такие как:

– высачивание воды и намокание откосов, вынос грунта из тела сооружения, обширные ходы фильтрации грунтовой плотины;

– дефекты защитных покрытий, трещины на гранях сооружений в зонах сопряжения элементов сооружений и оснований с различными механическими и фильтрационными свойствами, следы выщелачивания, коррозии бетона;

– дефекты и повреждения в виде сколов, раковин, каверн, выбоин, полос или зон истирания, сквозных отверстий с обнажением или оголением арматуры, с коррозией арматуры и т. п.;

– локальные несоответствия заложения верхового откоса.

5. Водолазное обследование с целью определения состояния подводных элементов сооружений. Для выполнения водолазного обследования использовалось водолазное снаряжение СВУ-5-1 (рис. 5).

В результате водолазного обследования выявлены следующие основные отклонения от нормального эксплуатационного состояния:

– разрушение бетона на глубину до 30 см с оголением арматуры в зоне переменного уровня;

– наличие посторонних предметов (мусор, бревна), незначительное заиление дна.

6. Проверочные расчеты. На основании полученных в ходе изыскательских работ материалов с учетом выявленных дефектов были проведены проверочные расчеты.



Рис. 5. Водолазные работы

Fig. 5. Diving operations

С целью решения поставленной задачи был проанализирован опыт использования различных программ, в которых реализован метод конечных элементов, таких как SiO 2D, Geo5, GTS NX. Практика их применения широко использована в подобных расчетах [11]. Для рассматриваемого случая применена программа GTS NX, продукт фирмы Midas. В программе GTS NX реализовано моделирование взаимодействий между сооружениями и их основаниями на основе метода конечных элементов [12].

Для контроля и определения сходимости полученных результатов дополнительно фильтрационный расчет был проведен в соответствии с рекомендациями [13–15], а расчет устойчивости выполнен по круглоцилиндрическим поверхностям [13] в про-

грамме Slope.

Метод конечных элементов, использованный в расчетах, имеет ряд преимуществ [16]:

— криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов, что позволяет рассчитывать объекты, имеющие сложную геометрическую форму;

– размеры элементов могут быть переменными, именно это позволяет укрупнять или уменьшать сетку разбиения области на элементы;

– универсальность метода позволяет задать граничные условия с разрывной поверхностной нагрузкой или смешанными граничными условиями.

Границы условия, описывающие условия истечения – гидравлические граничные условия:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

где H – пьезометрический напор; K – коэффициент проницаемости грунта; Q – расход; θ – влагосодержание; t – время.

Фильтрационный расчет проводился с целью определения положения свободной поверхности фильтрационного потока (кривой депрессии). Фильтрационная прочность тела и основания сооружения оценивалась по условию [13]

$$I_{est.m} \leq \frac{1}{\gamma_n} I_{cr.m},$$

где $I_{est.m}$ – действующий средний градиент напора в расчетной области фильтрации; $I_{cr.m}$ – критический

средний градиент напора; γ_n – коэффициент надежности по ответственности плотины.

Статический расчет проводился с целью проверки устойчивости низового откоса земляной плотины. Критерием устойчивости откосов плотины являлось соблюдение для наиболее опасной призмы обрушения неравенства [13]

$$K_{\text{yct}} \geq \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c},$$

где $K_{уст}$ – коэффициент устойчивости откоса; γ_n , γ_{fc} , γ_c – коэффициенты ответственности сооружения, сочетания нагрузок, условий работы, определяемые по [13]. В расчетах для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации коэффициенты γ_{fc} и γ_c принимаются равными 1, а коэффициент ответственности сооружения γ_n принят равным 1,2, что соответствует II классу сооружения.

На первом этапе, согласно результатам проведенных инженерных изысканий, была построена твердотельная модель (рис. 6), представляющая собой триангуляционную сеть. Модель твердого тела представляется в виде множества треугольников, что позволяет точно описать поверхность объекта, сохраняя его геометрические особенности и детали.

Расчетная двухмерная сеть с промежуточным переразбиением поверхности сети учитывает качественный характер залегающих слоев грунта тела и основания.

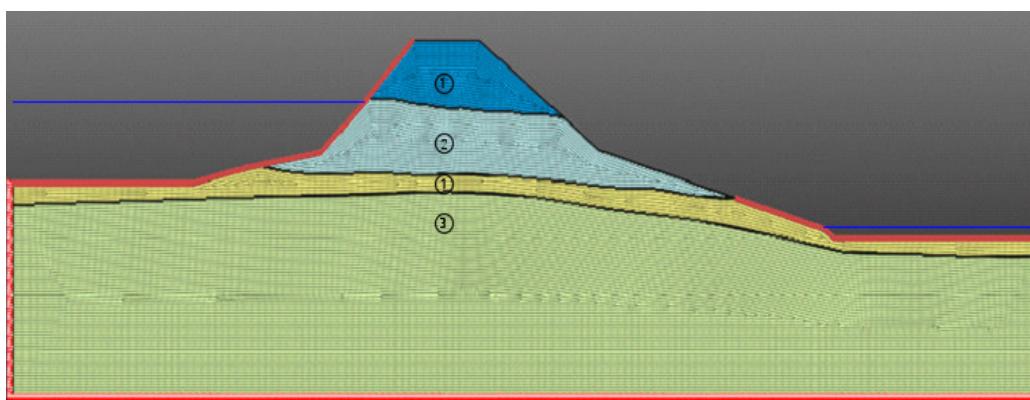


Рис. 6. Схема для расчета устойчивости: 1–3 (см. рис. 4)

Fig. 6. The scheme for calculating stability: 1-3 (see fig. 4)

На *втором этапе* проведен расчет фильтрационной прочности сооружения. Учитывалось влияние различных факторов на процесс фильтрации: пористость, неоднородность среды и т. д.

В процессе расчета программа GTS NX выдает промежуточные результаты и графики, которые

позволяют оценить ход расчета и при необходимости внести корректировки. Результаты фильтрационного расчета с помощью программы GTS NX представлены на рис. 7. Получившееся положение кривой депрессии сравнивалось с фактическими отметками кривой депрессии по буровым скважинам.

Результаты расчета сверялись с допустимыми градиентами [14], представленными в табл. 1.

Расчет устойчивости был выполнен методом анализа напряжений (SAM) на основе метода ко-

нечных элементов. В основе метода лежит анализ предварительно заданных поверхностей скольжений (круглоцилиндрических поверхностей). Результаты проведенного расчета приведены на рис. 8.

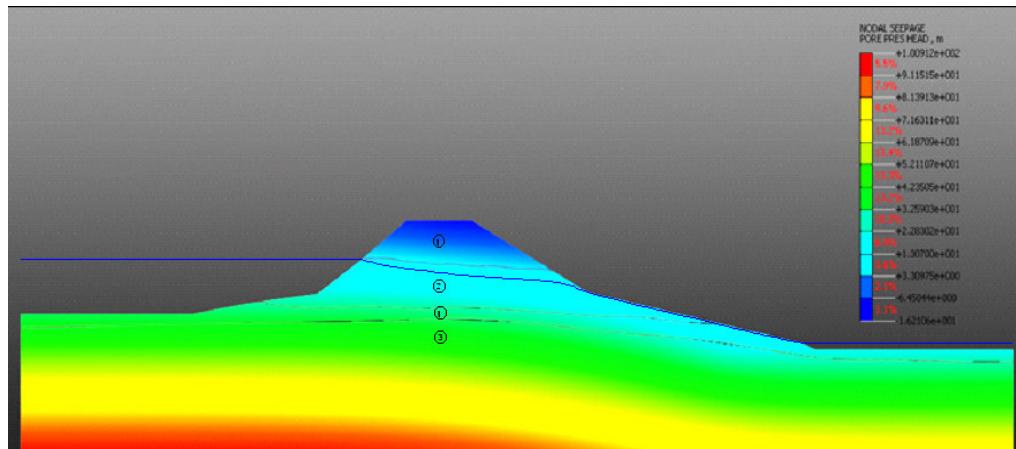


Рис. 7. Результаты фильтрационного расчета: 1–3 (см. рис. 4)

Fig. 7. Results of filtration calculation: 1-3 (see fig. 4)

Таблица 1

Table 1

Сводная таблица градиентов напора и сравнение с фактическими значениями показателей

Summary table of pressure gradients and comparison with actual values of indicators

№ слоя	Вид грунта	Допускаемый градиент $I_{\text{доп}}$ [14]	Фактический градиент $I_{\text{факт}}$ по GTS NX	Соответствие
1 слой (тело)	Суглинок	1,15	0,492	Не превышает
2 слой (тело)	Суглинок	1,15	0,478	Не превышает
3 слой (основание)	Суглинок	0,50	0,364	Не превышает
4 слой (основание)	Глина	1,00	0,358	Не превышает

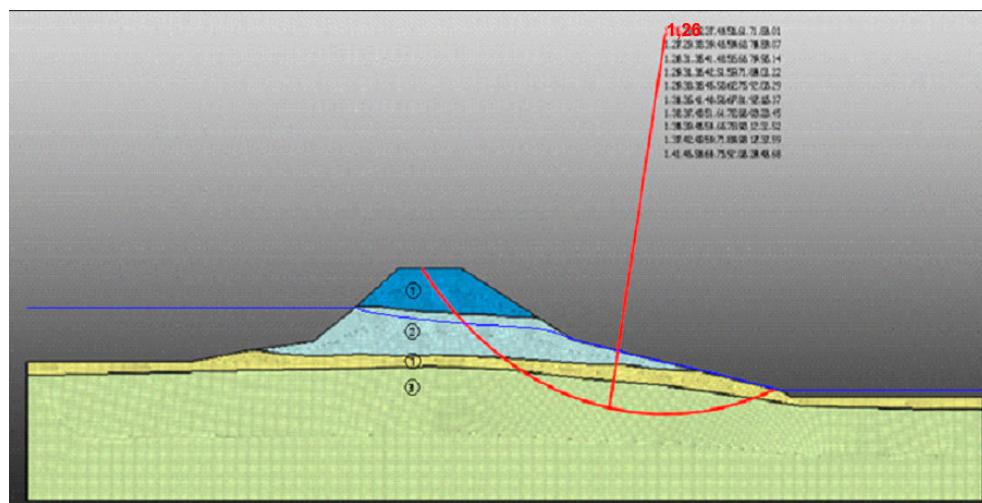


Рис. 8. Результат устойчивости откоса: 1–3 (см. рис. 4)

Fig. 8. The result of slope stability: 1-3 (see fig. 4)

В результате расчета условие устойчивости откоса грунтовой плотины выполняется:

$$K_{\text{уст}} = 1,26;$$

$$K_{\text{уст}} = 1,26 > \frac{1,2 \cdot 1,0}{1,0} = 1,2,$$

что удовлетворяет требованиям для сооружений II класса [10, 13].

Коэффициент устойчивости и опасная кривая скольжения для проверки были определены методами Г. Крея, К. Терцаги и «весового давления» Р. Р. Чугаева. Расчет устойчивости с применением данных методов реализован в программе Slope, предназначеннной для расчета устойчивости земляных откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения (рис. 9).

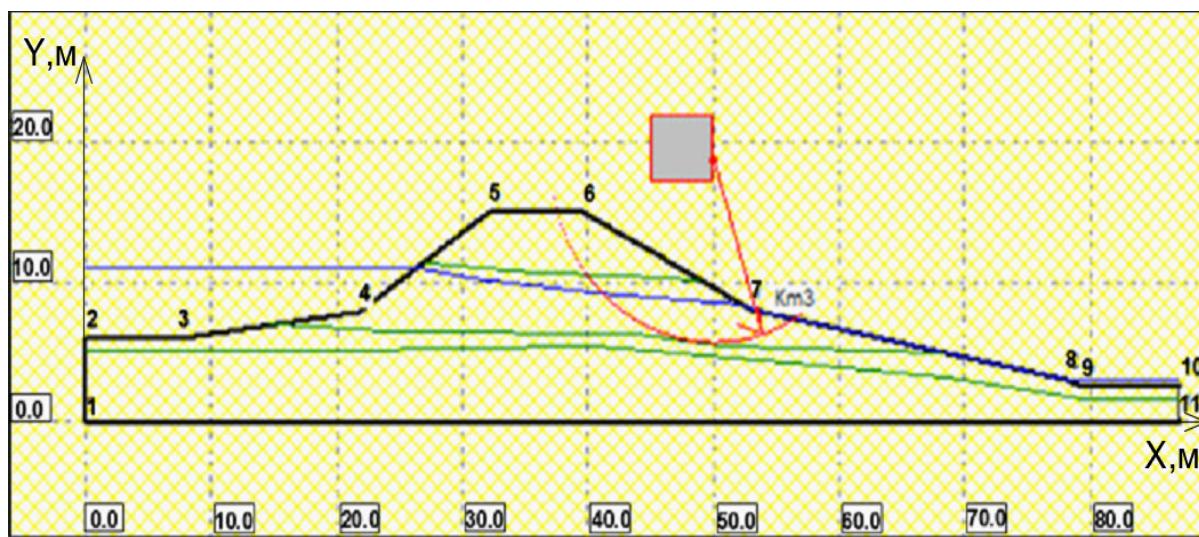


Рис. 9. Результаты расчета в программе Slope

Fig. 9. Calculation results in the Slope program

Минимальные коэффициенты устойчивости составили:

- по методу Г. Крея – $K_{\min} = 1,45$;
- по методу К. Терцаги – $K_{\min} = 1,41$;
- по методу «весового давления» – $K_{\min} = 1,38$.

Условие устойчивости откоса грунтовой плотины также выполняется.

Результаты, полученные в программах:

- GTS NX: $K_{\text{уст}} = 1,26$;
- Slope: $K_{\min} = 1,38$.

Разница в результатах составила 9 %, она связана и с тем, что в программе Slope расчет ведется на ограниченном количестве заданных прямых скольжения, в то время как программа GTS NX ведет расчет с использованием всех возможных областей обрушения.

7. На заключительном этапе всестороннего обследования комплекса ГТС во исполнение требований статьи 9 Федерального закона от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических со-

оружений» [3] собственник (или эксплуатирующая организация) обязан обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности ГТС.

При определении критериев безопасности с целью обоснования прочности и устойчивости комплекса ГТС и их оснований должно быть выполнено условие недопущения наступления предельных состояний в соответствии со строительными нормами и правилами. Контроль за безопасностью ГТС (комплекса ГТС), в том числе оперативная оценка их состояния, осуществляется путем сравнения измеренных (или вычисленных на основе измерений) количественных и качественных показателей с их критериальными значениями.

Результаты обследования были сведены и сопоставлены с критериями безопасности комплекса ГТС. В табл. 2, 3 приведено сравнение полученных результатов с качественными (определяемыми визуально) и количественными (определяемыми инструментально) критериями безопасности.

Таблица 2
Table 2

Сводная таблица качественных критерииов безопасности и сравнение с фактическими значениями показателей

Summary table of qualitative safety criteria and comparison with actual values of indicators

Объект наблюдений	Критерии безопасности		Соответствие
	K1 (появление)	K2 (развитие во времени)	
Грунтовая плотина	Высасывания воды и намокания откосов		Превышает K1
	Выноса грунта из тела сооружения, обширных ходов фильтрации		Превышает K1
	Процесса фильтрации воды в виде зон влаголюбивой растительности, мокрых пятен, наледи зимой, луж, болот, высасывания воды, ключей, грифонов, ручьев		Превышает K1
Водосброс	Трещин на гранях сооружений, в зонах сопряжения элементов сооружений и оснований с различными механическими и фильтрационными свойствами		Превышает K1
	Следов выщелачивания, коррозии бетона		Превышает K1
	Дефектов антакоррозионного покрытия		Превышает K1
	Дефектов и повреждений в виде сколов, раковин, каверн, выбоин, полос или зон истирания, сквозных отверстий; с обнажением или оголением арматуры, с коррозией арматуры и т. п.		Превышает K1
	Фильтрации (появление мокрых пятен или высолов; капельной, очаговой или струйной фильтрации)		Превышает K1
Отводящий канал	Деформаций и размыва откосов (берегов)		Превышает K1
	Зарастания мелководий и откосов		Превышает K1
	Отложения наносов, мусора		Превышает K1

Таблица 3
Table 3

Сводная таблица количественных критерииов безопасности и сравнение с фактическими значениями показателей

Summary table of quantitative safety criteria and comparison with actual values of indicators

Контролируемый показатель	Критериальные значения диагностических показателей		Фактические параметры	Соответствие критериям безопасности
	K1. Первый (предупреждающий) уровень	K2. Второй (предельный) уровень		
Грунтовая плотина				
Среднее заложение верхового откоса	1:1,5	Менее 1:1,5	1:1,5 (переработан)	Соответствует не в полной мере

Заключение

Результаты проведенной оценки технического состояния комплекса ГТС водозабора с применением численных методов моделирования показали, что фильтрационная прочность и устойчивость обеспечивается (условия выполняются). Согласно результатам сопоставления полученных данных с критериями безопасности, по терминологии СП 13–102–2003 [17], эксплуатационное состояние ГТС характеризуется как ограниченно работоспособное. Следует отметить, что часть выявленных дефектов при неблагоприятном стечении обстоятельств могут привести к возникновению аварийной ситуации. Делается вывод: сооружение требует ремонта, который необходимо выполнить в кратчайшие сроки.

Расчеты устойчивости определили сходимость результатов (отклонение составляет 9 %), что свидетельствует о возможности применения метода конечных элементов в дальнейшем, более детальном исследовании данного сооружения. Численные методы позволили рассчитать с большой вероятностью точности устойчивость низового откоса земляной плотины для самого опасного сечения плотины. В перспективе с целью изучения процессов, влияющих на снижение прочности сооружения, планируется построить трехмерную модель всего сооружения (грунтовой плотины и водосброса) и оценить его прочность на контакте разных материалов (т. к. визуально наблюдаются очаги фильтрации).

Список источников

1. Линкевич Н. Н. Оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. Минск: Изд-во БНТУ, 2021. С. 28–42.
2. Рекомендации по обследованию гидротехнических сооружений с целью оценки их безопасности. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2001. С. 11–20.
3. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон РФ от 21.07.1997 № 117-ФЗ (с изменениями на 11.06.2021). URL: http://cntr.gosnadzor.ru/activity/control/Gidro_nadz/doc/5.%20%D0%9E%20%D0% B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0% B8%20%D0%93%D0%A2%D0%A1.pdf (дата обращения: 24.10.2024).
4. Об утверждении федеральных норм и правил в области безопасности гидротехнических сооружений. Требования к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений): Приказ Ростехнадзора от 08.05.2024 № 151. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-08052024-n-151-ob-utverzhdenii-federalnykh/?ysclid=m9tu7rycyu678739566> (дата обращения: 24.10.2024).
5. Козлов Д. В., Снежко В. Л., Симонович О. С. Прогноз уровня безопасности грунтовых плотин низкой опасности за пределами нормативного срока эксплуатации. М.: Изд-во МГСУ, 2022. С. 2–9.
6. Панкова Т. А., Орлова С. С. Оценка эксплуатационного состояния водосбросного сооружения на Балке Курдюм Саратовского района у села Клещевка Саратовской области. Саратов: Изд-во СГАУ им. Н. И. Вавилова, 2015. С. 132–135.
7. Шестова М. В., Добрынина А. В. Исследование современного состояния нижнего бьефа Нижегородской ГЭС с учетом русловых деформаций и влияния дноуглубительных работ // Науч. проблемы вод. трансп. 2022. № 73. С. 255–265.
8. Гидротехнические сооружения водозабора в г. Лысково: техн. паспорт. Лысково, 2000. 19 с.
9. Агеева В. В., Февралев А. В. Опыт оценки риска аварий низконапорных гидротехнических сооружений // Приволж. науч. журн. 2023. № 2 (66). С. 142–145.
10. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 16.12.2019 № 811/пр). М.: Стандартинформ, 2020. 35 с.
11. Лапушкин А. С. Применение автоматизированной программы «GEO5 2022 – устойчивость откоса» для расчета железнодорожных насыпей. Беларусь, Гомель: Изд-во БГУТ, 2022. С. 355–358.
12. Ким М. С., Селезнева В. Н., Волков С. Н. Базовые модели расчета песчаных и глинистых грунтов в программном комплексе MIDAS GTS NX. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. С. 24–29.
13. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. СНиП 2.06.05-84 (утв. и введен в действие Приказом Минрегиона России от 29.12.2011 № 635/18). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521?ysclid=m9tvhjjerj249073348> (дата обращения: 24.10.2024).
14. Приложение к СП 39.13330.2012. Плотины земляные (намывные и насыпные). URL: http://ural.gosnadzor.ru/activity/control/gidrotech/norm_praw_akt/СП%2039.13330.2012%20Плотины%20из%20грунтовых%20материалов.%20Актуализированная%20редакция%20СНиП%202.06.05-84.pdf (дата обращения: 24.10.2024).
15. П 55-76. Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотины из грунтовых материалов. Л.: Изд-во ВНИИГ, 1976. 80 с.
16. Пайшанбиеев С. А., Калинин Э. В. Основные преимущества и недостатки метода конечных элементов при решении задач инженерной геодинамики. М.: Изд-во МГУ им. Ломоносова, 2018. С. 199–205.
17. СП 13-102-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений (принят постановлением Госстроя России от 21.08.2003). URL: <https://www.gupcti.ru/upload/iblock/87b/q1dy195u4xmnnpruersf613u377i98oq1.pdf?ysclid=m9tvzca4cj755035484> (дата обращения: 24.10.2024).

References

1. Linkevich N. N. *Otsenka urovnia bezopasnosti i risika avariий gidrotehnicheskikh sooruzhenii* [Assessment of the level of safety and risk of accidents of hydraulic structures]. Minsk, Izd-vo BNTU, 2021. Pp. 28-42.
2. *Rekomendatsii po obsledovaniiu gidrotehnicheskikh sooruzhenii s tsel'iu otsenki ikh bezopasnosti* [Recommendations for the inspection of hydraulic structures in order to assess their safety]. Saint Petersburg, Izd-vo VNIIG imeni B. E. Vedeneeva, 2001. Pp. 11-20.
3. *O bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenii: Federal'nyi zakon RF ot 21.07.1997 № 117-FZ (s izmeneniiami na 11.06.2021)* [On the safety of hydraulic structures: Federal Law of the Russian Federation dated 07/21/1997 No. 117-FZ (as amended on 06/11/2021)]. Available at: http://cntr.gosnadzor.ru/activity/control/Gidro_nadz/doc/5.%20%D0%9E%20%D0% B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0% B8%20%D0%93%D0%A2%D0%A1.pdf (accessed: 24.10.2024).
4. *Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenii. Trebovaniia k obespecheniiu bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenii (za iskliucheniem sudokhodnykh i portovykh gidrotehnicheskikh sooruzhenii): Prikaz Rostekhnadzora ot 08.05.2024 № 151* [On the approval of federal standards and regulations in the field of safety of hydraulic structures. Safety requirements for hydraulic structures (with the exception of shipping and port hydraulic structures): Rostekhnadzor Order No. 151 dated 05/08/2024]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-08052024-n-151-ob-utverzhdenii-federalnykh/?ysclid=m9tu7rycyu678739566> (accessed: 24.10.2024).
5. Kozlov D. V., Snejzhko V. L., Simonovich O. S. *Prognoz urovnia bezopasnosti gruntovykh plotin nizkoi opasnosti za predelami normativnogo sroka ekspluatatsii* [Forecast of the safety level of low-risk ground dams beyond the stand-

ard operating life]. Moscow, Izd-vo MGSU, 2022. Pp. 2-9.

6. Pankova T. A., Orlova S. S. *Otsenka ekspluatatsionnogo sostoianija vodosbrosnogo sooruzhenija na Balke Kurdiu姆 Saratovskogo raiona u sela Kleshchevka Saratovskoi oblasti* [Assessment of the operational condition of the spillway structure on the Kurdyum Gulch, Saratov region, near the village of Kleshchevka, Saratov region]. Saratov, Izd-vo SGAU imeni N. I. Vavilova, 2015. Pp. 132-135.

7. Shestova M. V., Dobrynina A. V. Issledovanie sovremennoj sostoianija nizhnego b'efa Nizhegorodskoi GES s uchetom rulovykh deformatsij i vlijanija dnoуглubitel'nykh rabot [Investigation of the current state of the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station, taking into account channel deformations and the impact of dredging operations]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2022, no. 73, pp. 255-265.

8. *Gidrotehnicheskie sooruzhenija vodozabora v g. Lyskovo: tekhnicheskii pasport* [Hydraulic structures of the water intake in Lyskovo: technical data sheet]. Lyskovo, 2000. 19 p.

9. Ageeva V. V., Fevralev A. V. Opyt otsenki risika avarii nizkonapornykh gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Experience in assessing the risk of accidents in low-pressure hydraulic structures]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*, 2023, no. 2 (66), pp. 142-145.

10. SP 58.1330.2019. *Gidrotehnicheskie sooruzhenija. Osnovnye polozhenija. SNiP 33-01-2003 (utverzhden i vведен v deistvie Prikazom Minstroja Rossii ot 16.12.2019 № 811/pr)* [SP 58.1330.2019. Hydraulic engineering structures. The main provisions. SNiP 33-01-2003 (approved and put into effect by the Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 16, 2019 No. 811/pr)]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 35 p.

11. Lapushkin A. S. *Primenenie avtomatizirovannoi programmy «GEO5 2022 – ustoichivost' otkosa» dlja rascheta zheleznodorozhnykh nasyp'ei* [Application of the automated program “GEO5 2022 – slope stability” for calculating railway embankments]. Belarus', Gomel', Izd-vo BGUT, 2022. Pp. 355-358.

12. Kim M. S., Selezneva V. N., Volkov S. N. *Bazovye modeli rascheta peschanykh i glinistykh gruntov v pro-*

grammnom komplekse MIDAS GTS NX [Basic calculation models for sandy and clay soils in the MIDAS GTS NX software package]. Voronezh, Izd-vo VGTU, 2023. Pp. 24-29.

13. SP 39.13330.2012. *Plotiny iz gruntovykh materialov. SNiP 2.06.05-84 (utverzhden i vведен v deistvie Prikazom Minregiona Rossii ot 29.12.2011 № 635/18)* [SP 39.13330.2012. Dams made of ground materials. SNiP 2.06.05-84 (approved and put into effect by Order of the Ministry of Regional Development of Russia dated December 29, 2011 No. 635/18)]. Available at: <https://docs.ctnd.ru/document/1200095521?ysclid=m9tvhjjr249073348> (accessed: 24.10.2024).

14. *Prilozhenie k SP 39.13330.2012. Plotny zemlianye (namyvnye i nasypnye)* [Appendix to JV 39.13330.2012. Earthen dams (alluvial and bulk)]. Available at: http://ural.gosnadzor.ru/activity/control/gidrotech/norm_prav_akt/СП%2039.13330.2012%20Плотины%20из%20грунто вых%20материалов.%20Актуализированная%20редакци я%20ЧНиП%202.06.05-84.pdf (accessed: 24.10.2024).

15. P 55-76. *Rukovodstvo po raschetam fil'tratsionnoi prochnosti plotin iz gruntovykh materialov* [P 55-76. Guidelines for calculating the filtration strength of a dam made of ground materials]. Leningrad, Izd-vo VNIIG, 1976. 80 p.

16. Paishaniev S. A., Kalinin E. V. *Osnovnye preimushchestva i nedostatki metoda konechnykh elementov pri reshenii zadach inzhenernoi geodinamiki* [The main advantages and disadvantages of the finite element method in solving problems of engineering geodynamics]. Moscow, Izd-vo MGU imeni Lomonosova, 2018. Pp. 199-205.

17. SP 13-102-2003. *Svod pravil po proektirovaniu i stroitel'stvu. Pravila obследovaniia nesushchikh stroytel'nykh konstruktsij zdaniij i sooruzhenij (priiat postanovleniem Gosstroja Rossii ot 21.08.2003)* [Joint venture 13-102-2003. A set of rules for design and construction. Rules for the inspection of load-bearing building structures of buildings and structures (adopted by the decree of the State Construction Committee of Russia dated 08/21/2003)]. Available at: <https://www.gupeti.ru/upload/iblock/87b/q1dy195u4xmnnpuesrf613u377i980q1.pdf?ysclid=m9tvzca4cj755035484> (accessed: 24.10.2024).

Статья поступила в редакцию 18.02.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025; принята к публикации 30.04.2025
The article was submitted 18.02.2025; approved after reviewing 27.03.2025; accepted for publication 30.04.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Олегович Агеев – кандидат технических наук; доцент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений; Волжский государственный университет водного транспорта; gg6258@yandex.ru

Sergei O. Ageev – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures; Volga State University of Water Transport; gg6258@yandex.ru

Вера Валерьевна Гоголева – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры гидротехнических и транспортных сооружений; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; Sbag.nn@mail.ru

Vera V. Gogoleva – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Hydraulic Engineering and Transport Structures; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; Sbag.nn@mail.ru

Денис Романович Романов – студент кафедры гидротехнических и транспортных сооружений; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; romanov.d.r@outlook.com

Анна Алексеевна Ханова – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры прикладной информатики; Астраханский государственный технический университет; akhanova@mail.ru

Denis R. Romanov – Student of the Department of Hydraulic Engineering and Transport Structures; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; romanov.d.r@outlook.com

Anna A. Khanova – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Applied Informatics; Astrakhan State Technical University; akhanova@mail.ru

