

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-53-152-158>

ДИНАМИКА НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ПРИ ВАРИАЦИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Гарголина К.В., Каштанов В.В., Медведева А.А.

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна, Россия

Ключевые слова: устойчивость, нагрузка, деформация, уровень воды, PLAXIS, напряжение, безопасность.

Аннотация. В данной работе представлено исследование устойчивости плотины с ядром при двух режимах изменения уровня воды в водохранилище (быстром и медленном). Актуальность работы обусловлена растущим количеством гидротехнических сооружений и необходимостью обеспечения их безопасной эксплуатации. Исследование выполнено с помощью программного комплекса PLAXIS 2D 2024, где применена модель Mohr-Coulomb для описания поведения грунтовых массивов. Основное внимание уделено анализу деформационных процессов и напряжённого состояния конструкции при разных скоростях изменения уровня воды. Установлено, что медленное понижение уровня обеспечивает равномерное распределение нагрузок, тогда как быстрое снижение приводит к формированию зон повышенного напряжения. Выявленные закономерности поведения плотины при различных режимах эксплуатации могут быть применены при проектировании и эксплуатации аналогичных гидротехнических сооружений.

DYNAMICS OF THE STRESS STATE OF SOIL DAMS UNDER VARIATIONS OF HYDROSTATIC PRESSURE

Gargolina K.V., Kashtanov V.V., Medvedeva A.A.

*All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply
«Raduga», Kolomna, Russia*

Keywords: stability, load, deformation, water level, PLAXIS, stress, safety.

Abstract. This paper presents a study of the stability of a dam with a core under two modes of changing the water level in the reservoir (fast and slow). The relevance of the work is due to the growing number of hydraulic structures and the need to ensure their safe operation. The study was carried out using the PLAXIS 2D 2024 software package, which uses the Mohr-Coulomb model to describe the behavior of soil masses. The main focus is on analyzing the deformation processes and the stress state of the structure at different rates of water level change. It has been established that a slow decrease in the water level ensures an even distribution of loads, while a rapid decrease leads to the formation of high-stress zones. The identified patterns of the dam's behavior under different operating conditions can be applied in the design and operation of similar structures.

Введение. Надежность и безопасность – одна из остро стоящих проблем в вопросах эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) [1]. Сложившиеся аварийные ситуации, практически, во всех случаях, несут значительный ущерб городским и хозяйственным объектам, а также это представляет серьёзную угрозу для окружающей среды.

Для детального рассмотрения данных проблем, важно учитывать расчет устойчивости всех видов ГТС при воздействии разносторонних внешних

факторов, влияющих на состояние сооружения. В том числе особенно важно учитывать скорость изменения уровня воды в водохранилищах [2-3].

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины с ядром, при разных режимах изменения уровня воды – медленном и быстром понижении.

Эти данные могут быть использованы для разработки рекомендаций по эксплуатации сооружений и предотвращения потенциально опасных ситуаций, связанных с резким изменением гидрологического режима.

Материалы и методы. Исследование проводилось с применением современного программного комплекса PLAXIS 2D (2024 года), который позволил построить математическую модель плотины с глинистым ядром и отсыпанными боковыми призмами [4]. В основе исследования лежит рассмотрение нагрузок в теле плотины при падении уровня воды с отметки НПУ 25 метров до УМО 5 метров. Объектом исследования выступает плотина высотой 30 метров, шириной 172,5 метров в основании и 5 метров по гребню.

В качестве основной расчётной модели грунтов (переуплотнённый заиленный песок) была выбрана модель Mohr-Coulomb (рис. 1), обеспечивающая достоверное описание поведения грунтовых массивов под нагрузкой. Данная модель учитывает все ключевые физико-механические характеристики материалов конструкции, включая прочностные и деформационные параметры [5].

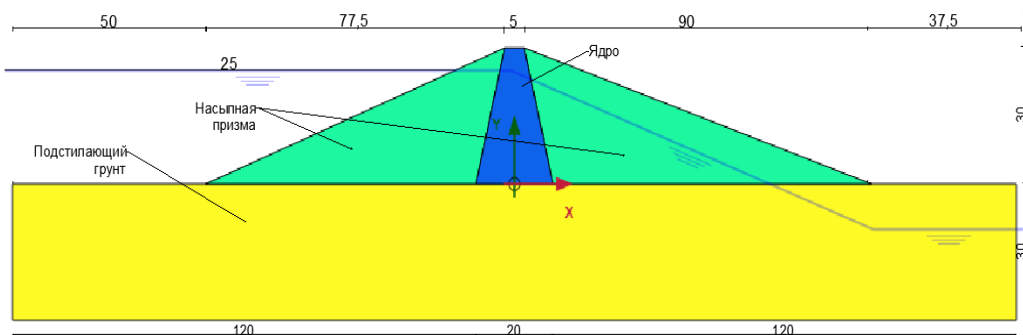


Рис. 1. Параметры расчетной модели исследуемой плотины

Исходные данные для моделирования были получены на основе изучения физико-механических характеристик всех конструкций (табл. 1). Процесс моделирования включал несколько этапов: построение геометрической модели сооружения, задание механических свойств материалов, определение начальных и граничных условий, а также параметров нагружения. Для каждого компонента конструкции были заданы соответствующие реологические свойства и прочностные характеристики [6].

В ходе исследования были рассмотрены два сценария изменения уровня воды в водохранилище, что позволило оценить поведение конструкции при различных режимах эксплуатации. Для каждого сценария проводилось поэтапное моделирование с последовательным анализом результатов.

Табл. 1. Физико-механические свойства грунтов плотины

Физико-механические свойства грунтов	Ядро	Насыпная призма	Подстилающий грунт
Модель	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Плотность, γ unsat, кН/м ³	16,00	16,00	17,00
Удельный вес, γ sat, кН/м ³	18,00	20,00	21,00
Угол внутреннего трения, φ , °	-	31,00	35,00
Сцепления, c , кН/м ²	-	5,00	1,00
Модуль Юнга, E , кН/м ²	1500	20,00Е3	50,00Е3
Козф Пуассона, V	0,3500	0,3300	0,2000
Угол Дилатансии, ψ	-	1,00	0,3000

Результаты и обсуждения. Для сравнения распределения порового давления (P_{active}) в теле плотины был проведён анализ двух видов сценариев изменения уровня воды в водохранилище через построение сетки конечных элементов (рис. 2).

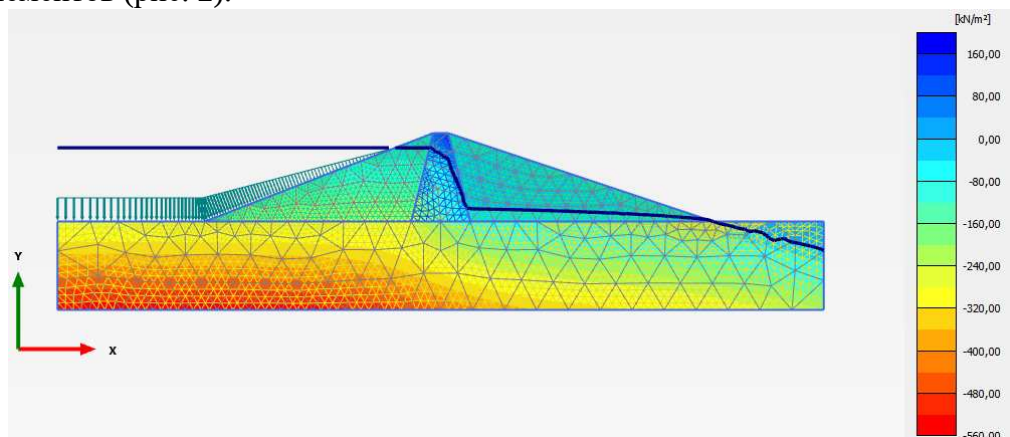


Рис. 2. Распределение порового давления на фазе с установившемся состоянием при обычном уровне НПУ (25 м)

При моделировании медленного понижения уровня воды наблюдалась плавная адаптация конструкции к изменяющимся нагрузкам [7, 8]. Распределение напряжений по верховому откосу происходило равномерно, без образования опасных зон сосредоточения напряжений. Показательно, что состояние нижней части ядра плотины, где деформации развивались постепенно, находились в пределах допустимых значений. Зона контакта ядра с подстилающим грунтом демонстрировала стабильное состояние без признаков критического нагружения (рис. 3).

Ситуация кардинально менялась при моделировании быстрого понижения уровня воды [8]. В этом случае конструкция демонстрировала более сложное напряженно-деформированное состояние. Верховой откос плотины испытывал значительно более высокие нагрузки, что приводило к формированию зон

повышенного напряжения в придонной части сооружения. Особенно, требующим внимания, оказался факт неравномерного распределения деформаций, с образованием локальных участков концентрации напряжений в области сопряжения ядра с насыпной призмой (рис. 4).

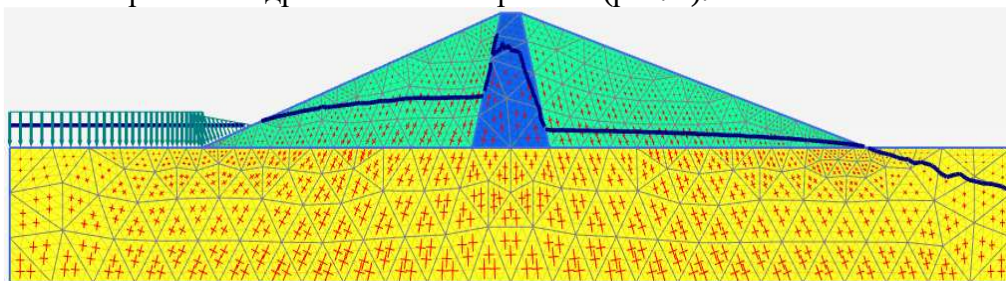


Рис. 3. Построение конечной сетки элементов при проверке распределения порового давления на фазе с медленным понижением уровня воды

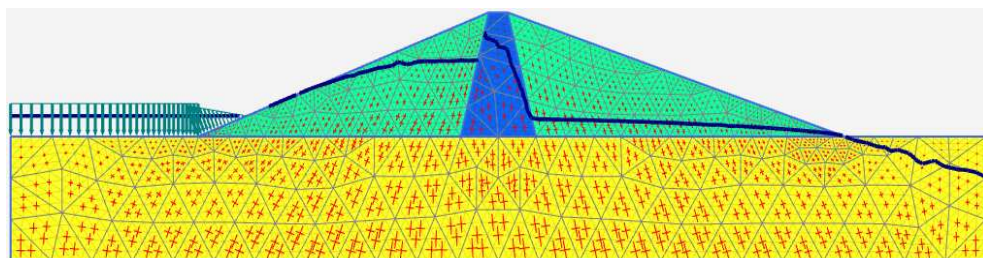


Рис. 4. Построение конечной сетки элементов при проверке распределения порового давления на фазе быстрого понижением уровня воды

Анализируя распределение нагрузок на верховой откос при различных сценариях, можно отметить закономерность. При медленном понижении уровня воды эпюры напряжений имели плавный, постепенный характер, что свидетельствовало о естественной адаптации конструкции к изменяющимся условиям (рис. 5). В случае же быстрого спада воды наблюдался резкий скачок нагрузок с образованием пиковых значений в определенных зонах (рис. 6) [9, 10].

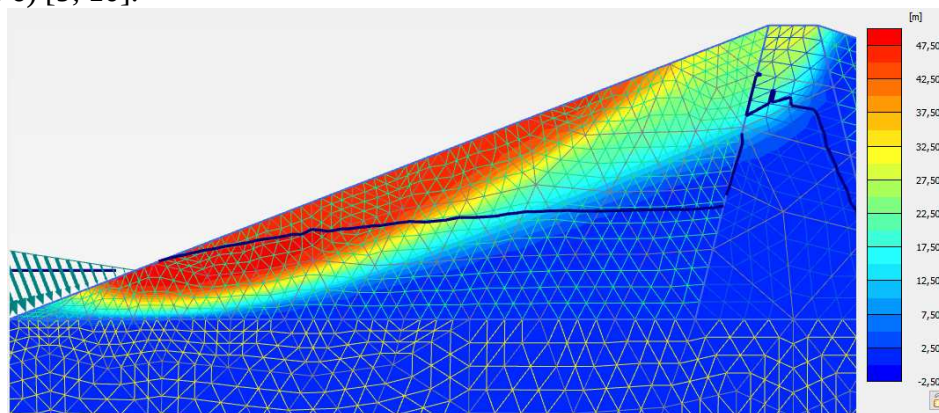


Рис. 5. Распределения нагрузки в теле плотины при медленном понижении уровня воды

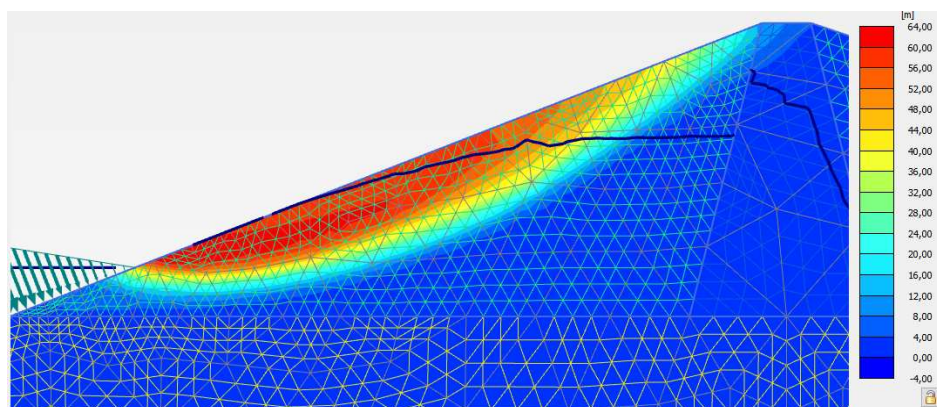


Рис. 6. Распределения нагрузки в теле плотины при быстром понижении уровня воды

В ходе проведенного исследования построен график для детального рассмотрения распределения нагрузок. При медленном понижении уровня воды в водохранилище график демонстрирует плавный рост коэффициента устойчивости с увеличением нагрузок (синяя линия). Другая кривая отображается на графике при рассмотрении быстрого понижения уровня воды (красная линия). Здесь явно прослеживается резкое колебание в начальной фазе, что указывает на значительное повышение нагрузок (рис. 7).

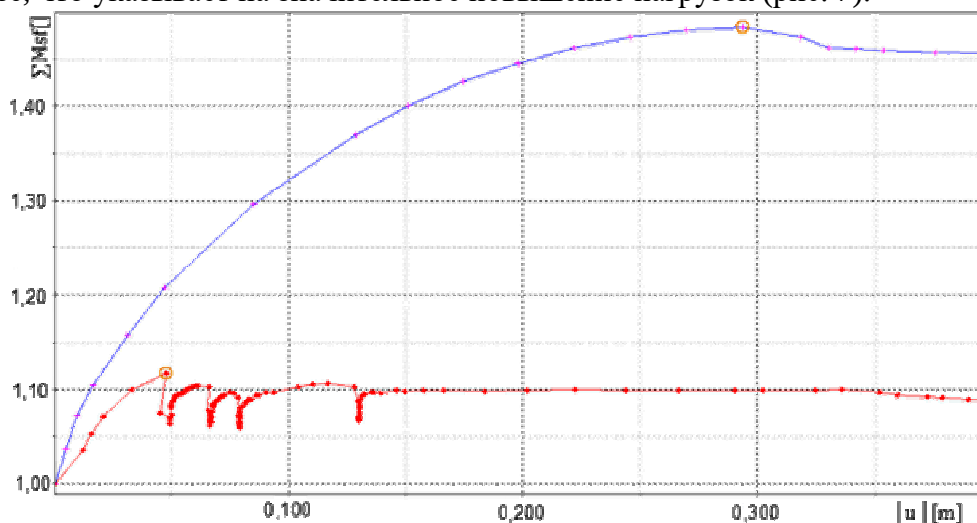


Рис. 7. Распределение нагрузок в основании плотины при двух сценариях понижения уровня воды в водохранилище

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о необходимости контроля скорости снижения уровня воды в водохранилище. Конструкция плотины, безусловно, обладает достаточным запасом прочности и устойчивости, однако характер ее технического состояния, существенно зависит от режима эксплуатации. Медленное понижение уровня воды представляется оптимальным вариантом, обеспечивающим равномерное распределение нагрузок и минимизацию риска возникновения критических деформаций.

Заключение. Проведенное исследование позволило существенно расширить понимание поведения плотин с ядром при различных режимах эксплуатации, особенно в условиях изменения уровня воды в водохранилище. Полученные результаты демонстрируют четкую зависимость напряженно-деформированного состояния конструкции от скорости понижения уровня воды.

Выявленные закономерности имеют важное практическое значение для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений. Установлено, что характер распределения нагрузок и деформаций в теле плотины существенно различается при медленном и быстром понижении уровня воды, что необходимо учитывать при планировании режимов работы водохранилища.

Список литературы

1. Талипов Ш., Юрченко А., Оспанов М., Джолдошалиев И., Набиев А., Баллыев К. Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений: методическое пособие / Под ред. группы экспертов ЕЭК ООН и МФСА. – Алматы: Евразийский банк развития, 2013. – 156 с.
2. Васильев И.М. Прочность и устойчивость подпорных грунтовых гидротехнических сооружений // Библиотека гидротехника и гидроэнергетика. Вып. 92. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.
3. Мороз М.Ф., Водчиц Н.Н. Гидротехнические сооружения: Методические указания. – Брест: Брестский государственный технический университет, 2007. – 37 с.
4. 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.
5. Качаев А.Е. Учет деформаций грунтов насыпных плотин при консолидированных расчетах // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2025. – №48. – С. 71-74. – DOI: 10.26160/2474-5901-2025-48-71-74.
6. Гарголина К.В. Анализ технологий дистанционного зондирования для выявления дефектов и повреждений гидротехнических сооружений // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2025. – №3(12). – С. 39-47.
7. Мирсаидов М.М., Султанов Т.З., Юлдошев Б.Ш. Методы оценки напряженного состояния грунтовых плотин с учетом влажностных свойств грунта. – Ташкент: Adabiyot uchqunlari, 2020. – 156 с.
8. Саинов М.П., Гапеев Д.С., Кудрявцев Г.М. Влияние напряжённого состояния каменно-земляной плотины на устойчивость её откосов // Вестник евразийской науки. – 2017. – Т. 9, №6. – С. 1-17.
9. Качаев А.Е., Гарголина К.В. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины при максимально наполненном водохранилище // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2025. – №3(12). – С. 48-58.
10. Niu X., Yao Y., Sun Y., He Y., Zhang H. 3D Numerical Analysis of Synergetic Interaction between High-Rise Building Basement and CFG Piles Foundation // Applied Sciences. 2018, vol. 8, no.11, pp. 2040. doi.org/10.3390/app8112040.

References

1. Talipov Sh., Yurchenko A., Ospanov M., Dzholdoshaliev I., Nabiev A., Balliev K. Development and Creation of a Complex of Measures to Ensure the Safety of Hydraulic Structures: A Methodological Guide / Edited by a Group of UNECE and IFAS Experts. – Almaty: Eurasian Development Bank, 2013. – 156 p.
2. Vasiliyev I.M. Strength and stability of retaining soil hydraulic structures // Library of hydraulic engineering and hydropower. Issue 92. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 112 p.
3. Moroz M.F., Vodchits N.N. Hydraulic Structures: Methodological Guidelines. – Brest: Brest State Technical University, 2007 – 37 p.
4. Kachaev A.E., Turapin S.S. Analysis of the stages of BIM modeling in the design and reconstruction of hydraulic structures // Science and World. 2025, no. 1, pp. 16-20. DOI: 10.26526/2307-9401-2025-1-16-20.
5. Kachaev A.E. Accounting for soil deformations of embankment dams in consolidated calculations // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025, iss. 48, pp. 71-74. DOI: 10.26160/2474-5901-2025-48-71-74.
6. Gargolina K.V. Analysis of remote sensing technologies for the detection of defects and damage to hydraulic structures // Building structures, buildings and structures. 2025, no. 3(12), pp. 39-47.
7. Mirsaidov M., Sultanov T.Z., Yuldoshev B.Sh. Methods for assessing the stress state of earth dams taking into account the moisture properties of the soil. – Tashkent: Adabiyot uchqunlari, 2020. – 156 p.
8. Sainov M.P., Gapeev D.S., Kudryavtsev G.M. The influence of the stressed state of a stone-earth dam on the stability of its slopes // Bulletin of Eurasian Science. 2017, vol. 9, no. 6, pp. 1-17.
9. Kachaev A.E., Gargolina K.V. Research of the stress-strain state of a soil dam with a maximum reservoir capacity // Construction Structures, Buildings and Structures. 2025, no. 3(12), pp. 48-58.
10. Niu X., Yao Y., Sun Y., He Y., Zhang H. 3D Numerical Analysis of Synergetic Interaction between High-Rise Building Basement and CFG Piles Foundation // Applied Sciences. 2018, vol. 8, no.11, pp. 2040. doi.org/10.3390/app8112040.

Гарголина Кристина Витальевна – младший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений	Gargolina Kristina Vitalyevna – junior researcher at the Department of operation of land reclamation systems and hydraulic structures of the federal state budgetary scientific institution
Каштанов Василий Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений	Kashtanov Vasily Vasilyevich – candidate of technical sciences, leading researcher at the Department of operation of hydro-reclamation systems and hydraulic structures
Медведева Анна Александровна – младший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений	Medvedeva Anna Aleksandrovna – junior researcher at the Department of operation of hydro-reclamation systems and hydraulic Structures
kristina.gargolina@yandex.ru	

Received 25.03.2026