

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРУШЕНИЯ ГЛИНИСТОГО СКЛОНА СО СЛАБЫМ ПОДСТИЛАЮЩИМ СЛОЕМ

Качаев А.Е., Турапин С.С., Лесников И.Р.

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

Ключевые слова: склон, слой, перемещение, деформация, сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент устойчивости.

Аннотация. В работе проведены исследования устойчивости природного склона под своим собственным весом посредством моделирования его в программном комплексе GTS NX. Целью работы является верификация (сравнение) результата расчетов аналитического метода снижения прочности (деформации и обрушения) глинистого склона со слабым подстилающим слоем с численным расчетом в программном комплексе GTS NX по величине коэффициента устойчивости. Устойчивость объекта исследования подтверждается результатами численного моделирования и аналитическими расчетами. Расхождение между полученными результатами не превышает 1%. Следовательно, при создании цифрового двойника склона были правильно учтены характеристики материалов, из которых он состоит, а также правильно заданы для численного моделирования граничные условия задачи (объекта).

MODELING THE FAILURE OF A CLAY SLOPE WITH A WEAK UNDERLYING LAYER

Kachaev A.E., Turapin S.S., Lesnikov I.R.

*All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply
“Raduga”, Kolomna, Russia*

Keywords: slope, layer, displacement, deformation, adhesion, angle of internal friction, stability coefficient.

Abstract. This paper examines the stability of a natural slope under its own weight using modeling in the GTS NX software package. The objective of the study is to verify (compare) the results of calculations using an analytical method for reducing the strength (deformation and collapse) of a clay slope with a weak underlying layer with numerical calculations using the GTS NX software package based on the magnitude of total displacements. The stability of the studied object is confirmed by the results of both numerical modeling and analytical calculations. The discrepancy between the obtained results does not exceed 1%. Therefore, it can be concluded that the characteristics of the materials from which it is composed were correctly taken into account when creating the digital twin of the elephant, and the boundary conditions of the problem (object) were correctly defined for the numerical modeling.

Введение. Цифровизация процесса проектирования и научных исследований в области проектирования гидротехнических сооружений и природных агроландшафтов позволяет получать не только цифровые двойники исследуемых объектов, но и способствуют принятию проектных решений при работах, связанных с их реконструкцией и капитальным ремонтом [1].

Особую роль в технологиях информационного моделирования занимает процесс верификации (сравнения) полученных результатов различными расчетными способами и при помощи различных программных продуктов. Правильность результатов, получаемых при численном моделировании, необходимо оценивать при помощи аналитических методов, известных для конкретного случая и метода определения параметров. Аналогичные вопросы исследования обрушения склона при различных моделях грунта поднимались в работе [2]. Следует отметить, что подобная в работе [2] методика верификации применима и сегодня.

Целью работы является верификация (сравнение) результата расчетов аналитического метода снижения прочности (деформации и обрушения) глинистого склона со слабым подстилающим слоем с численным расчетом в программном комплексе GTS NX по величине полных перемещений.

Методы исследования. Для проведения верификации была выбрана расчетная схема склона (объект исследования), показанная на рисунке 1. На рисунке 1 показан склон на однородном основании с заглубленным слоем из менее прочного грунта для моделирования скользкой подкладки в системе полигона. Проведен предварительный аналитический расчет устойчивости склона по методу снижения прочности (SRM - Strength Reduction Method). Смещения ограничены в горизонтальном направлении вдоль вертикальных кромок и во всех направлениях вдоль нижней кромки. Система откосов склона в природном состоянии имеет нагружение от собственного веса.

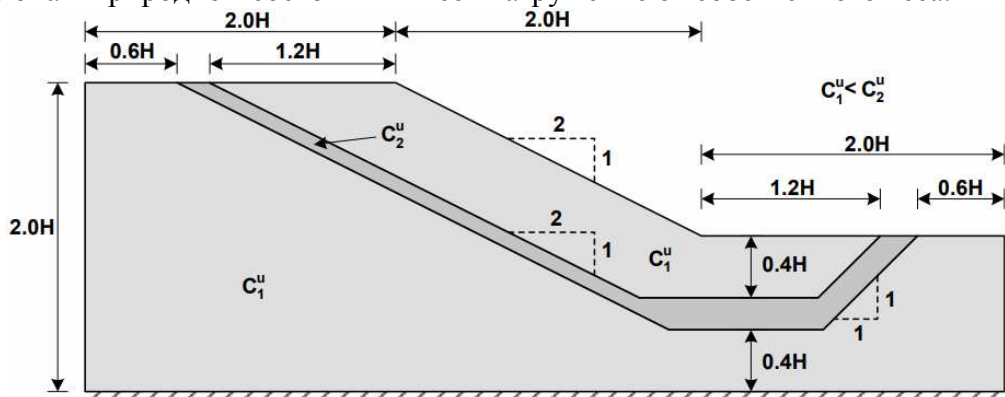


Рис. 1. Расчетная схема объекта исследования

При рассмотрении подобного рода задач используются аналитические и численные методы. Численными методами разрабатывается модель объекта исследования и генерируются результаты моделирования, а с помощью аналитики проводится проверка полученных при численном моделировании результатов. Такой подход используется в BIM-моделировании объектов капитального строительства [3].

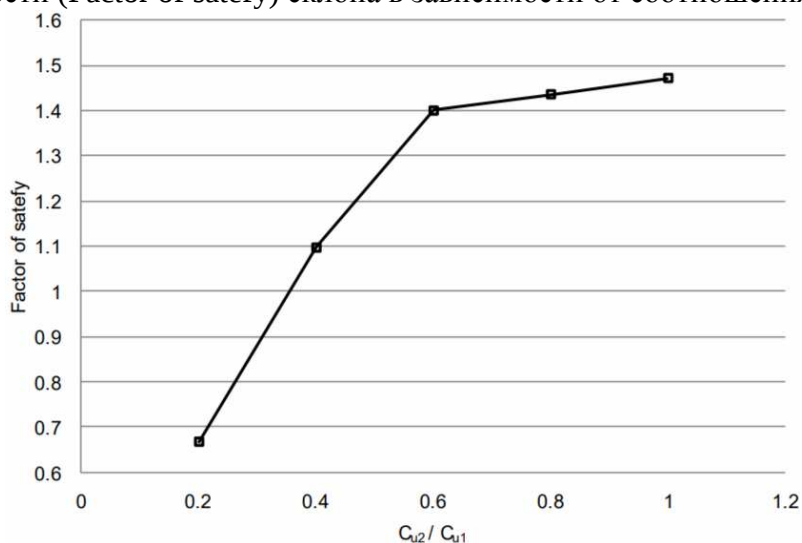
В таблице 1 представлены характеристики материалов, которые были использованы при численном моделировании природного склона со слабым подстилающим слоем.

Табл. 1. Характеристики материала численной модели склона

Показатель	Величина
Модуль Юнга, ГПа	0,8
Коэффициент Пуассона, ν	0,3
Тип модели	Мора - Кулона
Когезия – сцепление (C_{u1}), кПа	50,0
Когезия – сцепление (C_{u2}), кПа	20,0 ~ 50,0
Угол внутреннего трения, °	0
Угол дилатансии, °	0
Собственный вес γ_m , кН/м ³	20,0

Аналитический метод определения коэффициента устойчивости склона использовался в соответствии с рекомендациями работы [4].

При сохранении прочности грунта, устойчивость склона (откоса) оценивалась для нескольких значений прочности слабого слоя: $C_{u2}/C_{u1} = 0,2$, 0,4 и 1,0. На рисунке 2 представлен график изменения коэффициента устойчивости (Factor of safety) склона в зависимости от соотношения C_{u2}/C_{u1} .

Рис. 2. Коэффициент устойчивости склона при различных значениях C_{u2}/C_{u1}

Результаты и обсуждение. На рисунке 3 показаны деформированные формы модели в окрестности точки неустойчивого равновесия для различных значений прочности подстилающего слоя. Деформированная форма соответствует форме подстилающего слоя при $C_{u2}/C_{u1} = 0,2$ и превращается в круглую форму по мере приближения модели к однородности. Оба механизма разрушения активируются при $C_{u2}/C_{u1} = 0,6$. Эти результаты иллюстрируют преимущества анализа устойчивости склона на основе метода конечных элементов, который не требует априорного знания механизма разрушения.

В таблице 2 представлены значения коэффициента устойчивости склона, полученные при аналитическом и численном расчетах. На основании результатов работы [5] определялся аналитический коэффициент

устойчивости, как референсное значение безопасности объекта, а затем численно он был подтвержден в программном комплексе GTS NX. Такой же подход использовался в работе [6]. Результаты верификации удовлетворительны. Расхождение между результатами аналитического расчета и численного моделирования параметра – коэффициента устойчивости – не превышает 1%.

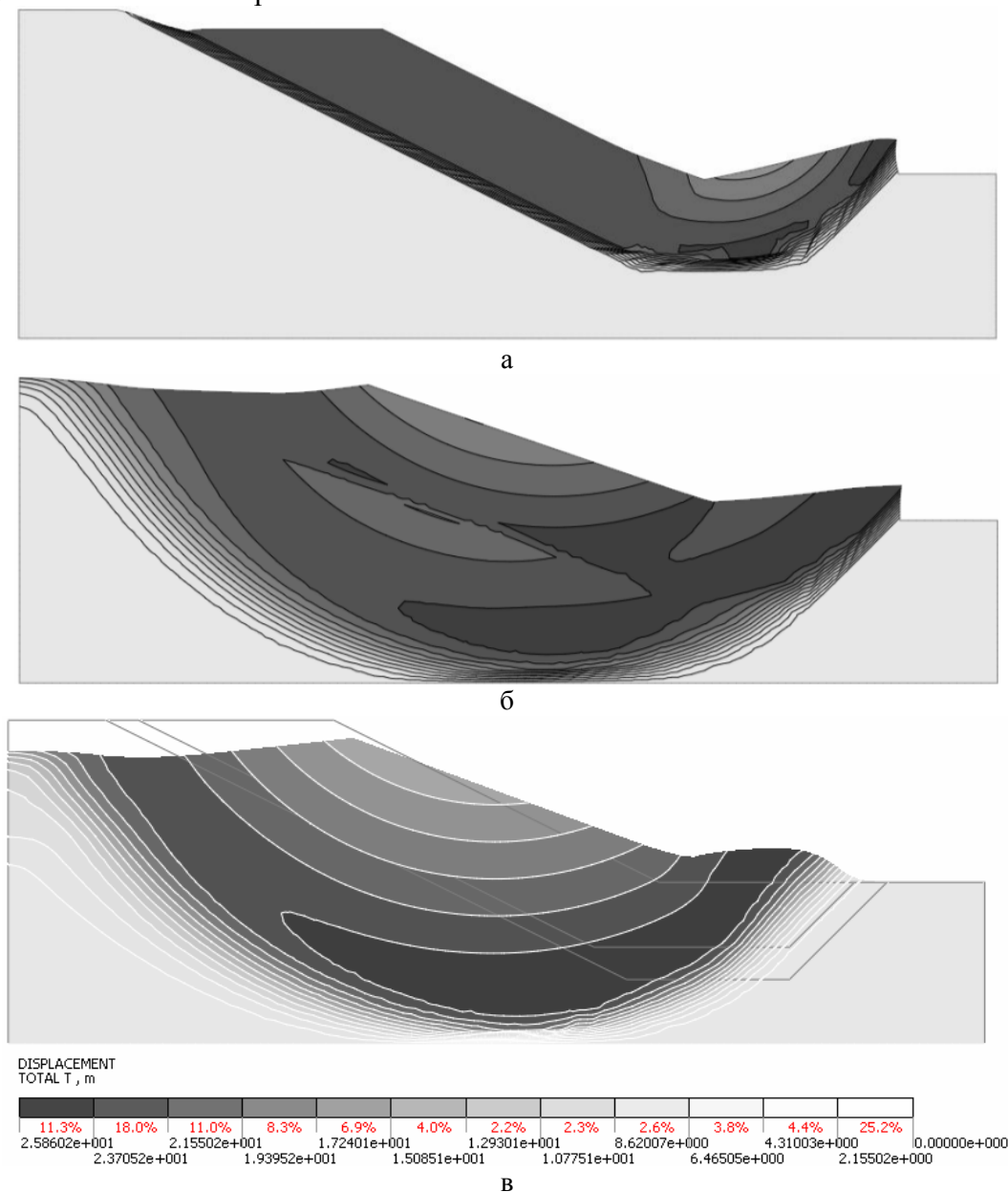


Рис. 3. Деформированная форма склона при его разрушении: а) $C_{u2}/C_{u1} = 0,2$; б) $C_{u2}/C_{u1} = 0,6$, в) $C_{u2}/C_{u1} = 1,0$ (с контуром его первоначального состояния)

Табл. 2. Коэффициент запаса прочности на насыпи для $C_{u2} / C_{u1} = 1.0$

Наименование параметра	Величина коэффициента устойчивости
Референсное значение, полученное аналитическим методом (SMR)	1,47
Значение, полученное численным моделированием прочности склона по методу снижения прочности в GTS NX	1,4617

В соответствии со сложностями геотехнических расчетов при использовании программно-вычислительных комплексов необходимо в обязательном порядке проводить верификацию полученных результатов с результатами аналитических расчетов по методикам, которые прежде всего изложены в нормативной документации и общепринятой литературе.

Выводы. В результате проведенной верификации показателя безопасной эксплуатации природного склона – коэффициента устойчивости – установлено, что численное моделирование объекта исследования в программном комплексе GTS NX, соответствует результатам аналитического расчета данного показателя по методу снижения прочности.

Список литературы

1. Качаев А.Е., Турапин С.С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. – 2024. – №3. – С. 1-5. – doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
2. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.
3. Сидоренко Д.А., Качаев А.Е. BIM-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракетоуплана многоразовой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12-14 апреля 2023 года. – Рязань: Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2023. – С. 490-492.
4. Jasim M. Abbas, A.Aljanabi Qasim, AliMutinyDiyala Zainab. Slope stability analysis of an earth dam // Journal of Engineering Sciences. 2017, vol. 10, no. 01, pp. 106-117.
5. 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.org/ 10.22227/2305-5502.2022.3.1.
6. 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.org/10.35688/2413-8452-2024-04-001.

References

1. Kachaev A.E., Turapin S.S. Justification of the Need to Develop Integrated Computational Models of Earth Dams in Land Reclamation Systems // Science and the World. 2024, no. 3, pp. 1-5. doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
2. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.
3. Sidorenko D.A., Kachaev A.E. BIM technologies in construction: what's next? // New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XXI International scientific and technical conference dedicated to the 35th anniversary of the flight of the orbital rocket plane of the reusable transport space system "Buran", Ryazan, April 12-14, 2023. – Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2023. – P. 490-492.
4. Jasim M.Abbas, A.Aljanabi Qasim, AliMutinyDiyala Zainab. Slope stability analysis of an earth daM // Journal of Engineering Sciences. 2017, vol. 10, no. 01, pp. 106-117.
5. 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.org/10.22227/2305-5502.2022.3.1.
6. Kachaev A.E., Turapin S.S. Methodology for numerical modeling of the stability of an earth dam during emergency drawdown of a reservoir // Ecology and Construction. 2024, no. 4, pp. 4-13. doi.org/ 10.35688/2413-8452-2024-04-001.

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, senior researcher of the Department of operation of irrigation and hydraulic engineering structures
Турапин Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, врио директора	Turapin Sergey Sergeevich – candidate of technical sciences, leading researcher, acting director
Лесников Иван Романович – инженер-исследователь отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений doctor_cement@mail.ru	Lesnikov Ivan Romanovich – research engineer of the Department of operation of irrigation and hydraulic structures

Received 03.12.2025