



ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

Введение. Одним из важнейших факторов, определяющих надежность и безопасность высоконапорных ГАЭС, является устойчивость склона, в пределах которого размещаются основные сооружения. В состав этих сооружений обычно входят водоприемник, напорные водоводы, здание ГАЭС, водовыпуск.

В соответствии с действующими в настоящее время в Украине нормами проектирования [1–3] склон следует рассматривать как сооружение, класс ответственности которого должен соответствовать классу ответственности основных сооружений ГАЭС. При этом проектная оценка устойчивости склона должна выполняться на основе анализа его напряженно-деформированного состояния с учетом всей совокупности факторов, которые могут оказать влияние на устойчивость склона. В число этих факторов входят особенности инженерно-геологического строения, естественный и прогнозный гидрогеологический режим, физические и прочностные характеристики слагающих склон грунтов в условиях естественной влажности и при водонасыщении, сейсмичность района строительства и др.

Для оценки состояния склона в эксплуатационный период в пределах склона размещается необходимая контрольно-измерительная аппаратура, в состав которой входят пьезометры, марки и др. приборы. При анализе службой эксплуатации данных натурных наблюдений за состоянием склона используются критерии безопасности, не превышение которых обеспечивает прочность и устойчивость склона. Эти критерии назначаются при проектировании на основе анализа напряженно-деформированного состояния склона и впоследствии корректируются с учетом данных наблюдений.

Решение указанных выше задач является чрезвычайно актуальным для оценки надежности и безопасности строящейся в настоящее время Днестровской ГАЭС. Поэтому в отделе расчетного обоснования сооружений ПАО "Укрэнергопроект" бы-

ли выполнены систематические расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС*.

Целями расчетных исследований являлись:

1. Определение напряженно-деформированного состояния сложенного нескальными грунтами участка склона основных сооружений Днестровской ГАЭС в различных условиях периода эксплуатации.

2. Определение значений коэффициента запаса прочности и устойчивости этого участка склона для различных расчетных случаев эксплуатационного периода.

3. Определение критериев безопасности склона, которые необходимы службе эксплуатации для оценки состояния склона по данным натурных наблюдений. В число этих критериев входят:

- предельные значения приращений перемещений поверхности склона в период эксплуатации, при которых обеспечивается прочность и устойчивость склона с нормативными коэффициентами запаса устойчивости;

- предельное положение депрессионной поверхности (поверхности грунтовых вод), при котором прочность и устойчивость рассматриваемого участка склона обеспечивается с нормативными коэффициентами запаса.

При выполнении расчетных исследований использовался программный комплекс Midas GTS 2011 (версия 1.1).

Краткое описание склона основных сооружений Днестровской ГАЭС. Склоны в районе расположения Днестровской ГАЭС согласно данным инженерно-геологических изысканий, выполненных ПАО "Укрэнергопроект", а также результатам ряда исследований (см., например, [4]) являются потенциально опасными с точки зрения их устойчивости. Поэтому на всех этапах проектирования Днестровской ГАЭС этому вопросу

*В расчетных исследованиях участвовали сотрудники отдела расчетного обоснования сооружений ПАО "Укрэнергопроект" Рыжиков К.О., Скоробогатько К.В., Матвиенко А.А. под руководством д.т.н. Вайнберга А.И.



уделялось особое внимание. Выполненные в процессе проектирования расчеты показали, что устойчивость склонов, прилегающих к основным сооружениям этого объекта, обеспечена с коэффициентами запаса, большими, чем нормативные. При выполнении этих расчетов использовались регламентированные нормами проектирования методы, основанные на рассмотрении предельного равновесия потенциального массива обрушения при наперед заданной поверхности скольжения.

В последние годы появились новые методы расчетов прочности и устойчивости грунтовых сооружений и склонов, основанные на рассмотрении напряженно-деформированного состояния в рамках решения упруго-пластических задач. Эти новые методы, являющиеся по сути численными исследованиями, позволяют получить более объективную оценку прочности и устойчивости склонов. Поэтому было принято решение о выполнении численных исследований напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС, который рассматривается как наиболее ответственное сооружение объекта.

Склон основных сооружений Днестровской ГАЭС высотой 123 м характеризуется средним уклоном 1 : 3. Склон сложен преимущественно полускальными породами (известняками, аргиллитами, алевролитами, песчаниками), обладающими сравнительно высокими деформационными и прочностными характеристиками. В нижней части склона высотой около 34 м имеется массив нескальных грунтов, деформационные и прочностные характеристики которых ниже, чем соответствующие характеристики полускальных пород. Поэтому в настоящей работе рассматривается потенциально опасный участок склона, сложенный нескальными грунтами и подстилаемый массивом полускальных пород. Инженерно-геологический разрез этого участка показан на Рис. 1. Этот рисунок является фрагментом инженерно-геологической модели грунтового массива основных сооружений Днестровской ГАЭС. Как видно из этого рисунка рассматриваемый участок характеризуется значительной неоднородностью. В его пределах залегают суглинки, супеси, пески, дресвяные грунты. Основные физико-механические характеристики этих грунтов представлены на Рис. 1.

В пределах рассматриваемого участка склона в естественных условиях отсутствуют грунтовые воды. Однако после завершения строительства и наполнения верхнего и нижнего водоемов в склоне сформируется фильтрационный поток таким

образом, что в пределах этого участка могут появиться грунтовые воды. Выполненные фильтрационные исследования с учетом данных наблюдений за гидрогеологическим режимом позволили получить прогнозные положения депрессионной поверхности в склоне для различных условий эксплуатации. Прогнозные кривые депрессии в склоне показаны на Рис. 1. Эти кривые использовались в качестве исходных данных для определения напряженно-деформированного состояния участка склона, сложенного нескальными грунтами.

Рассматриваемый участок склона, как и все сооружения Днестровской ГАЭС, расположен в сейсмически опасном районе. Согласно данным выполненных сейсмологических исследований расчетная сейсмичность этого участка составляет 7 баллов по шкале MSK-64. Такая сейсмичность учитывалась при выполнении расчетов.

Класс последствий (ответственности) склона, рассматриваемого как основное сооружение гидроузла, — ССЗ, категория ответственности — А принят в соответствии с нормами проектирования [1].

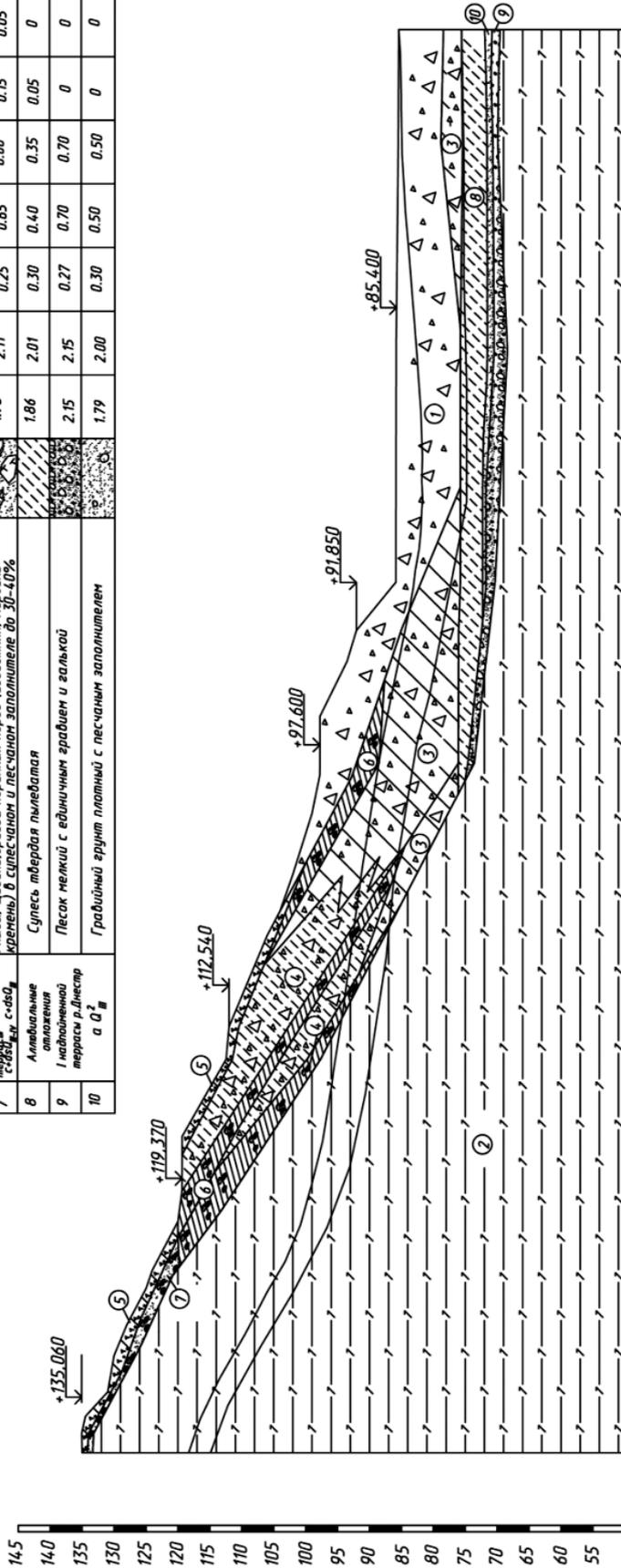
Методика исследований. Расчеты напряженно-деформированного состояния участка склона выполнялись в рамках решения плоской задачи (плоская деформация) теории пластичности методом конечных элементов с использованием программного комплекса Midas GTS 2011.

Для моделирования нелинейных свойств грунтов была использована модель упруго-пластической среды Мора-Кулона, которая обычно применяется при исследовании напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений. Ползучесть грунтов не учитывалась.

Расчеты прочности и устойчивости участка склона, в результате которых были получены значения коэффициентов запаса прочности и устойчивости, выполнены методом редукиции. При этом использовался программный комплекс Midas GTS 2010. Суть метода редукиции заключается в следующем. Выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния участка склона для ряда последовательно снижаемых сдвиговых характеристик нескальных грунтов модели (удельное сцепление и тангенс угла внутреннего трения). Такие расчеты выполняются до тех пор, пока не будет достигнуто состояние предельного равновесия, при котором вычислительный процесс расходится (прогрессирующее нарастание пластических деформаций). Значение коэффициента запаса устойчивости k_r определялось как отношение значений расчетных сдвиговых характе-

Расчетные геотехнические характеристики грунтового массива

№ п/п	Геологический индекс и условные обозначения грунтов	Наименование грунтов	Литология	Плотности		Коэффициенты			Удельное сцепление при			Модуль деформации при водонасыщении
				ρ при влажности w _{opt}	ρ _{нат}	ν	W	tg φ ₁	tg φ ₂	W	W _{нат}	
1	Делювиальные отложения О _н	Суглинок твердый тяжелый, с оклещенными щебня и дресвы до 25-30%		1.78	1.87	0.30	0.65	0.60	0	0	0	170
2	РЕ ₃	Осредненные характеристики скального массива		1.87	2.01	0.25	0.75	0.75	1	1	1	5000
3	Делювиально-осипные отложения в нижней части склона d-0-60 см	Суглинок дресвянистый с обломками коренных пород до 45%		1.91	1.96	0.30	0.42	0.33	0.33	0.20	0.20	180
4	Делювиально-осипные отложения в нижней части склона d-60-80 см	Суглинок дресвянистый с обломками коренных пород до 40-45%		1.82	2.12	0.25	0.45	0.35	0.10	0.10	0.05	180
5	ОСВ ₁ - осипы с обломками коренных пород (известняк, мергель)	Порубленная почва, суглинок мелкопесчаный, гумусированный с оклещенными щебня и дресвы кременей до 30%		1.70	1.90	0.37	0.30	0.25	0.20	0.20	0.15	100
6	ОСВ ₂ - осипы с обломками коренных пород (известняк, мергель)	Глибы, щебень, дресва коренных пород (известняк, мергель) с суглинистым и глинистым заполнителем до 30-40%		1.94	2.04	0.40	0.40	0.35	0.30	0.20	0.20	200
7	ОСВ ₃ - осипы с обломками коренных пород (известняк, мергель)	Глибы, щебень, дресва коренных пород (известняк, мергель) в суглинистом и песчаном заполнителе до 30-40%		1.98	2.11	0.25	0.65	0.60	0.15	0.15	0.05	400
8	Аллювиальные отложения I надпойменной террасы р. Днепр а О _п	Суглинок твердый пылеватая		1.86	2.01	0.30	0.40	0.35	0.05	0	0	150
9	Гравийный грунт плотный с песчаным заполнителем	Песок мелкий с единичным гравием и галькой		2.15	2.15	0.27	0.70	0.70	0	0	0	500
10	Гравийный грунт плотный с песчаным заполнителем	Гравийный грунт плотный с песчаным заполнителем		1.79	2.00	0.30	0.50	0.50	0	0	0	300



Расстояние, м	6	24	11	26	40	24	7	87	
Пикетаж	ПК2+70							ПК3	ПК4

Примечание: Пикетаж по подводящему водоводу № 1

Рис. 1. Инженерно-геологический разрез рассматриваемого участка склона



ристик ґрунтів (удельне сцеплення c_I і тангенс кута внутрішнього тертя $\text{tg } \phi_I$) к зниженим значенням сдвигових характеристик, що відповідають стану предельного рівноваги ($c_{\text{lim}}, \text{tg } \phi_{\text{lim}}$)

$$k_r = \frac{c_I}{c_{\text{lim}}} = \frac{\text{tg } \phi_I}{\text{tg } \phi_{\text{lim}}}$$

Така операція виконується автоматично при роботі програмного комплексу Midas GTS 2011.

При визначенні критеріїв безпеки схилу, які необхідні службі експлуатації для оцінки стану схилу за даними натурних спостережень, використовувалися наступні підходи.

Розглянемо спочатку методику визначення предельних значень приращень переміщень поверхні схилу в період експлуатації, при яких забезпечується міцність і стійкість схилу з нормативними коефіцієнтами запасу стійкості. Такі приращення переміщень повинні бути знайдені в найбільш характерних точках поверхні схилу для основного і особливого поєднань навантажень і впливів. Визначення значень цих приращень переміщень виконувалося методом послідовних наближень. При цьому сдвигові характеристики ґрунтів схилу знижувалися до тих пор, поки знайдені методом редукції значення коефіцієнта запасу міцності і стійкості не стануть рівними нормативним значенням.

Розглянемо тепер методику визначення предельного положення депресійної поверхні (поверхні ґрунтових вод), при якому міцність і стійкість розглянутого участка схилу забезпечується з нормативними коефіцієнтами запасу. Визначення предельного положення депресійної поверхні також виконувалося методом послідовних наближень. При цьому положення депресійної поверхні підвищалося до тих пор, поки знайдені методом редукції значення коефіцієнта запасу міцності і стійкості не стануть рівними нормативним значенням.

Розрахункова модель. Розрахункова область включає в себе складений нескальними ґрунтами участок схилу, підстилає масивом полускальних порід. Розміри цієї області прийняті на основі численного експерименту з умови відсутності впливу граничних умов на напружено-деформоване стан участку схилу, складеного нескальними ґрунтами.

Задача розв'язується методом кінцевих елементів. Розрахункова область апроксимується чоти-

рихугольними кінцевими елементами квадратичного типу. Для моделювання нелінійних властивостей ґрунтів використана модель Мора-Кулона. Кінечно-елементна модель розрахункової області приведена на Рис. 2. Модель включає 17410 елементів. Елементи, що моделюють нескальний ґрунт, мають характерний розмір 0.5 м.

Учитувалися наступні граничні умови:

- вертикальні переміщення нижньої границі розрахункової області приймаються рівними нулю;

- горизонтальні переміщення бокових границь розрахункової області приймаються рівними нулю.

Результати досліджень. Були виконані розрахунки напружено-деформованого стану схилу основних споруд Дністровської ГАЕС з використанням програмного комплексу "Midas GTS". Розглядалися наступні розрахункові випадки.

Розрахунковий випадок 1. Основне поєднання навантажень і впливів. Нескальні ґрунти всього розглянутого участка схилу знаходяться в стані природної вологості (крива депресії УГВ 0 проходить нижче подошви масиву нескальних ґрунтів).

Розрахунковий випадок 2. Основне поєднання навантажень і впливів. В нескальних ґрунтах має місце крива депресії УГВ 1, що відповідає нормальним підпорним рівням води в верхньому і нижньому водоемах.

Розрахунковий випадок 3. Особливе поєднання навантажень і впливів. В нескальних ґрунтах має місце крива депресії УГВ 2, що відповідає нормальному підпорному рівню води в верхньому водоемі і форсованому підпорному рівню води в нижньому водоемі.

Розрахунковий випадок 4. Особливе поєднання навантажень і впливів. Нескальні ґрунти всього розглянутого участка схилу знаходяться в стані природної вологості (крива депресії УГВ 0 проходить нижче подошви масиву нескальних ґрунтів). Крім того, враховуються сейсмічні впливи.

Розрахунковий випадок 5. Особливе поєднання навантажень і впливів. В нескальних ґрунтах має місце крива депресії УГВ 1, що відповідає нормальним підпорним рівням води в верхньому і нижньому водоемах. Крім того, враховуються сейсмічні впливи.

Для всіх розрахункових випадків визначалися напруження, переміщення і деформації як для розрахункових значень сдвигових характеристик

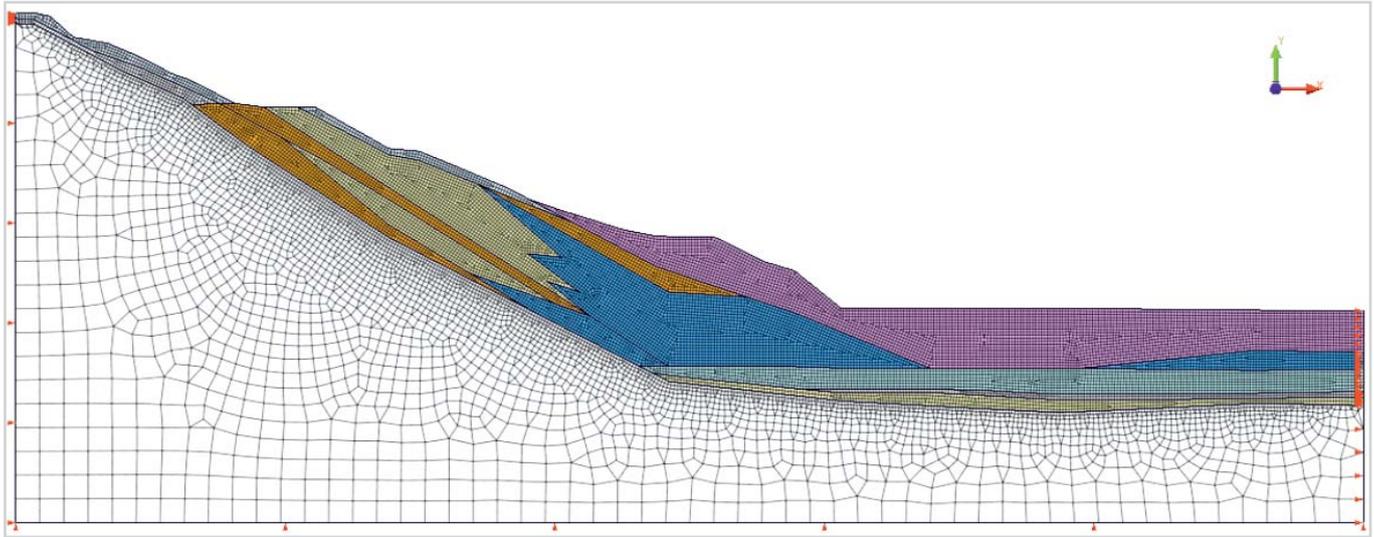


Рис. 2. Конечно-элементная модель расчетной области.

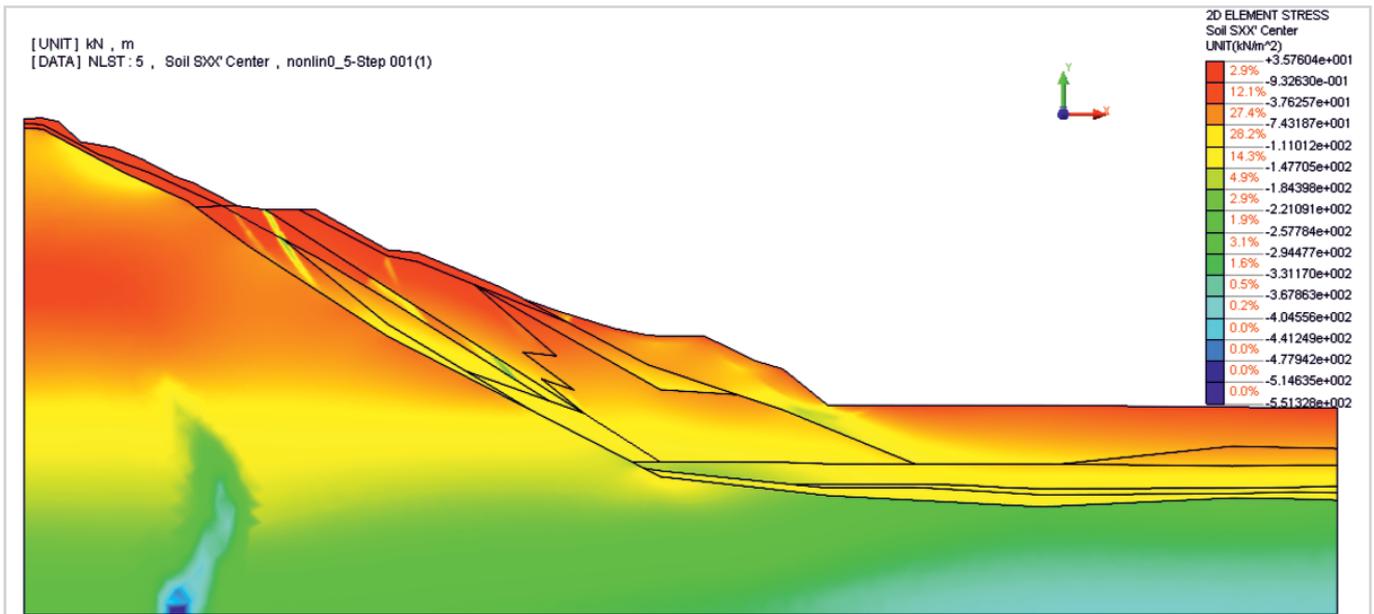


Рис. 3. Изополя напряжений σ_x , кПа, в склоне для расчетного случая 1.

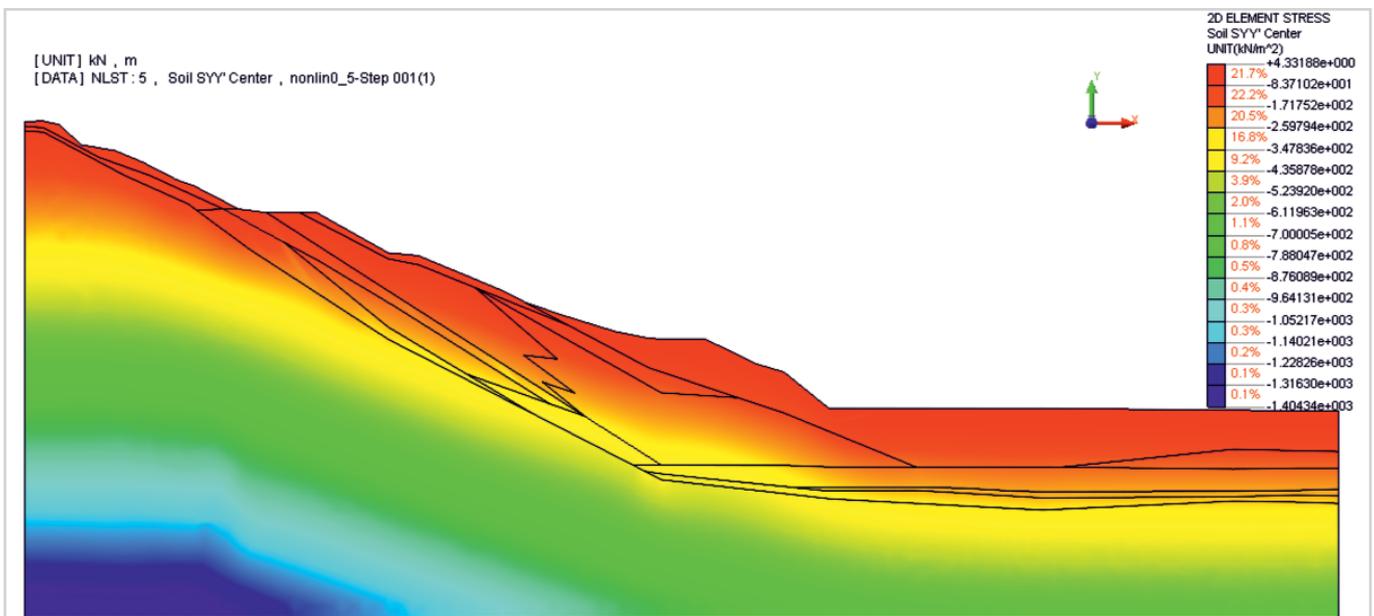


Рис. 4. Изополя напряжений σ_y , кПа, в склоне для расчетного случая 1.

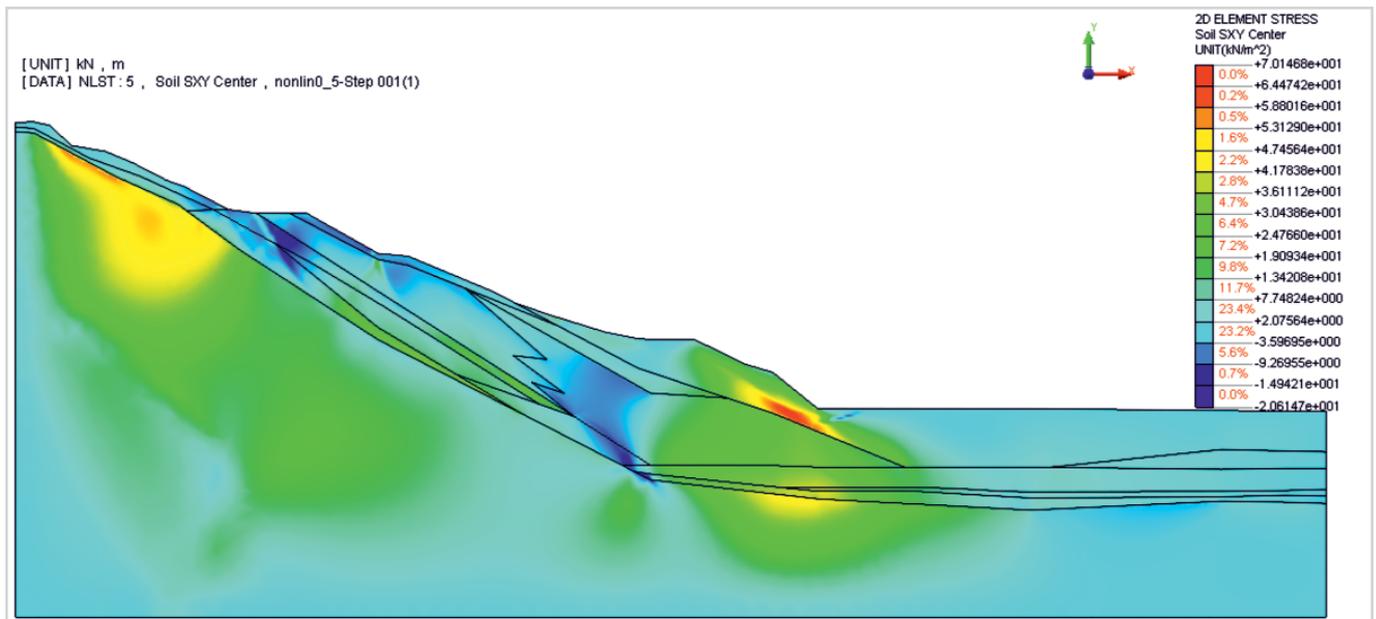


Рис. 3. Изополя напряжений τ_{xy} , кПа, в склоне для расчетного случая 1.

грунтов c_l и $\operatorname{tg} \phi_p$ так и для сниженных значений сдвиговых характеристик грунтов c_{lim} и $\operatorname{tg} \phi_{lim}$ соответствующих состоянию предельного равновесия.

Полученное напряженное состояние является характерным для таких склонов. Необходимо отметить, что в расчетной области во всех расчетных случаях отсутствуют сколько-нибудь значительные пластические деформации. Это позволяет сделать вывод, что склон не находится в состоянии предельного равновесия.

На Рис. 3–5 для примера приведены изополя напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} для первого расчетного случая.

Были выполнены расчеты прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС методом редукции. Результаты этих расчетов приведены в следующей таблице.

Анализ данных, приведенных в этой таблице, позволяет сделать вывод, что коэффициенты запаса прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС превышают нормативные значения во всех расчетных случаях на 15–20 %.

В соответствии с изложенной выше методикой были найдены предельные значения приращений перемещений, которые соответствуют

Таблица. Результаты расчетов прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС

Расчетные случаи	Положение кривой депрессии	Расчетный коэффициент запаса устойчивости k_r	Нормативный коэффициент запаса устойчивости k_n	
			Основное сочетание нагрузок	Особое сочетание нагрузок
1	УГВ 0	1,662	1,250	—
2	УГВ 1	1,455		
3	УГВ 2	1,308	—	1,125
4	УГВ 0	1,550	—	1,063
5	УГВ 1	1,310		

нормативным коэффициентам запаса прочности и устойчивости склона. Было также найдено предельное положение кривой депрессии, которое соответствует нормативным коэффициентам запаса прочности и устойчивости склона. Эти данные могут быть использованы службой эксплуатации в качестве критериев безопасности при оценке состояния склона.

ЛИТЕРАТУРА

- ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення / Мінрегіонбуд України. — К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. — 37 с.
- ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. /Мінбуд України. — К. : ДП Укрархбудінформ, 2006. — 84 с.
- СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений/Госстрой СССР. — М.: ЦИТИП Госстроя СССР, 1988. — 48 с.
- Проблемы инженерной геологии ГАЭС и водохранилищ с нестационарным режимом./Под ред. Г.С. Золотарева. — М. : Изд-во МГУ, 1983. — 266 с.