УДК 627.8

Скоробагатько К. В., старший инженер ПАО «Укргидропроект»
(ООО «Гидротехпроект» , г. Харьков)

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ВЕРХНЕГО ВОДОЕМА ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

В статье представлена методика и результаты выполнения численных исследований напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС для условий ежедневной сработки и наполнения водоема с учетом сейсмических воздействий.
Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, прочность, устойчивость, плотины из грунтовых материалов, метод редукции.

Введение. Одной из важнейших задач при проектировании высоконапорных ГАЭС является обеспечение их надежности и безопасности. Верхнее водохранилище является самым крупным и технически сложным сооружением Днестровской ГАЭС, поэтому безопасная эксплуатация всей станции напрямую зависит от его надежности, которая, в свою очередь, обеспечивается прочностью и устойчивостью ограждающей дамбы.

Оценка прочности и устойчивости ограждающей дамбы выполняется на основе анализа напряженно-деформированного состояния с учетом всей совокупности факторов, которые могут оказать влияние на устойчивость откосов дамбы. Среди этих факторов можно выделить следующие: состав грунтов тела дамбы, инженерно-геологическое строение основания, физико-механические характеристики грунтов тела дамбы и основания, режим работы водохранилища, сейсмичность района строительства и др.

Оценка прочности и устойчивости ограждающей дамбы в период эксплуатации является весьма актуальной задачей для обеспечения безопасной и надежной работы строящейся в настоящее время Днестровской ГАЭС. Поэтому в отделе расчетного обоснования сооружений ООО «Гидротехпроект» были выполнены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС.

Целями расчетных исследований являлись:

1. Определение напряженно-деформированного состояния дамбы с учетом основания.

2. Определение значений коэффициентов запаса прочности и устойчивости откосов дамбы против обрушения.

При выполнении расчетных исследований использовался программный комплекс Midas GTS 2011.

Расчеты выполнялись в соответствии с действующими в настоящее время в Украине нормами проектирования [1–4].

Краткое описание конструкции и условий работы ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС. Общая длина ограждающей дамбы составляет 7350 м. В связи с этим было рассмотрено несколько поперечных сечений дамбы, которые являются наиболее потенциально опасными. Среди них сечения на ПК9+55, ПК17+95, ПК 45+70, ПК 56+68.

Тело дамбы отсыпано из неоднородных грунтов. В основании дамбы залегают полускальные породы. Отметка гребня дамбы +231,500 м. Высота дамбы составляет 19,3 м.

Верховой откос запроектирован с двумя бермами:

- берма на отметке +223,300 м шириной 9,5 м;
- берма на отметке +214,600 м шириной 9,3 м.

В теле дамбы вблизи верхового откоса предусмотрен противофильтрационный экран из суглинка.

Крепление верхового откоса предусмотрено горной массой толщиной 1,2 м, укладываемой на грунты переходных слоев. Всего под горной массой находятся два переходных слоя. Первый слой – щебень толщиной 0,3 м. Под щебнем располагается второй слой из песка, толщина которого изменяется от 0,2 м выше бермы на отметке +223,300 м до 2,4 м ниже этой бермы. Толщина суглинистого экрана изменяется по высоте от 1,00 м на гребне до 3 м у основания откоса. В нижней части верхового откоса экран из суглинка сопрягается с экраном дна верхнего водоема. Заложение верхового откоса составляет 1:3,5.

Низовой откос дамбы запроектирован с одной бермой на отметке +223,400 м шириной 5,0 м. Заложение низового откоса выше бермы 1:2, ниже – 1:3. Крепление низового откоса предусмотрено слоем растительного грунта толщиной 0,2 м.

От ПК44 до ПК47 в пределах тела дамбы имеет место целик, поэтому, фактически, дамба образована за счет врезки в естественный склон.

Расчетные исследования выполнялись для всех вышеуказанных се-

чений, однако, результаты исследований показали, что предложенная конструкция по сечению на ПК45+70 не обеспечивает необходимый запас устойчивости, поэтому было принято решение изменить коэффициент заложения верхового откоса дамбы выше бермы на отметке +223,300 м с 1:3,5 до 1:4. Окончательная конструкция дамбы на ПК45+70 показана на рисунке 1. Далее речь пойдет непосредственно о сечении дамбы на ПК45+70, так как именно это сечение является наименее устойчивым.

Дамба работает в условиях ежедневной сработки и наполнения водоема. В расчетных исследованиях учитывается отставание («зависание») уровня воды в песчаных грунтах над экраном и в самом экране от уровня воды в водоеме при снижении его от нормального подпорного уровня (НПУ) +229,500 м до уровня мертвого объема (УМО) +215,500 м.

Ограждающая дамба верхнего водоема, как и все сооружения Днестровской ГАЭС, расположена в сейсмически опасном районе. Согласно данным сейсмологических исследований расчетная сейсмичность участка расположения дамбы составляет 7 баллов по шкале MSK-64.

Класс последствий (ответственности) сооружения – ССЗ, категория ответственности – А принят в соответствии с нормами проектирования [1].

Методика исследований. Расчеты напряженно-деформированного состояния ограждающей дамбы 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 использована модель упругопластической среды Мора-Кулона, которая обычно применяется при исследовании напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений. Ползучесть грунтов не учитывалась.

Расчеты прочности и устойчивости дамбы, в результате которых были получены значения коэффициентов запаса прочности и устойчивости, выполнены методом редукции. Суть метода редукции заключается в следующем. Выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния дамбы для ряда последовательно

Расчетные геотехнические характеристики грунтов тела и основания плотины

№ п/п	Наименование грунтов	Плотности		Коэффициенты				Удельное сцепление при		Модуль деформации при дорожностатике
		грунта при W	грунта при $W_{нат}$	относительной деформации	относительной деформации	относительной деформации при $W_{нат}$	внутреннего трения при			
		ρ	$\rho_{нат}$	ν	$\nu_{нат}$	W	$W_{нат}$	W	$W_{нат}$	$E_{нат}$
		т/м³				$tg\,\varphi_1$	$tg\,\varphi_1$	C_1	C_1	0,1 МПа
1	Глина и суглинок $d0_{IV}$	1,88	1,99	0,30	0,30	0,34	0,29	0,20	0,15	180
2	Переслаивание песка пылеватого влажного с влажной, мягкой	1,98	2,07	0,30	0,30	0,34	0,32	0,11	0,11	250
3	Насыпь из песчаных и влажных грунтов	1,97	2,08	0,30	0,35	0,34	0,25	0,12	0,20	250
4	Глина мягкая пылеватая твердая мягкопластичная	1,99	2,03	0,30	0,30	0,20	0,18	0,24	0,24	220
5	Глина мерзлая с прослойми мерзлой	1,93	2,00	0,30	0,30	0,27	0,25	0,18	0,18	200
6	Экран дамбы из суглинка	1,85	1,98	0,36	0,38	0,17	0,17	0,25	0,25	300
7	Глина тяжелая щебенистая-бентонитовая с содержанием карбонатов до 30% слабовлажная	1,68	1,77	0,30	0,30	0,14	0,12	0,19	0,19	80
8	Относительно сохранная средняя часть массива известняков (Nsy II)	1,95	2,03	0,30	0,30	0,35	0,30	0,24	0,20	4500
9	Горная масса	2,00	2,20	0,27	0,27	0,78	0,75	0,02	0,01	600
10	Песок насыпи (средней крупности и крупнозернистый)	1,87	2,05	0,30	0,30	0,60	0,55	0	0	250
11	Экран дна из сарматской глины	1,93	2,01	0,20	0,20	0,18	0,18	0,39	0,35	4,20

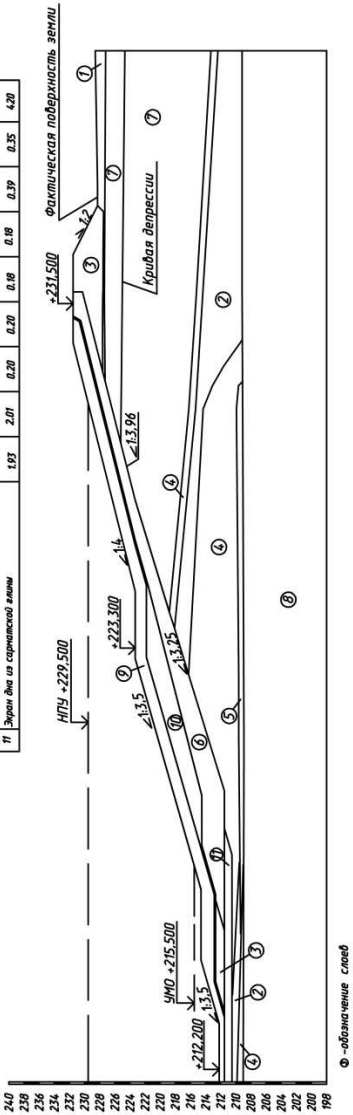

Рис. 1. Сечение дамбы на ПК45+70

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 определяется как отношение значений расчетных сдвиговых характеристик грунтов (удельное сцепление c_I и тангенс угла внутреннего трения $tg\varphi_I$) к сниженным значениям сдвиговых характеристик, соответствующим состоянию предельного равновесия ($c_{\lim}$, $tg\varphi_{\lim}$):

$$k_r = \frac{c_I}{c_{\lim}} = \frac{tg\varphi_I}{tg\varphi_{\lim}}. \qquad (1)$$

Такая операция выполняется автоматически при работе программы Midas GTS 2011.

Так же при выполнении исследований напряженно-деформированного состояния дамбы учитывались фильтрационные и сейсмические воздействия, которые являются очень важными факторами при оценке устойчивости грунтовых сооружений, поскольку они влияют на общее напряженно-деформированное состояние.

Фильтрационные воздействия определялись с использованием программного комплекса Midas GTS 2011, в котором было определено расчетное положение депрессионной кривой с учетом «зависания» в песке переходного слоя и в экране. При этом решалась плоская стационарная задача фильтрации. Для моделирования «зависания» фильтрующейся воды при сработке верхнего водоема, в расчетных узлах поверхности переходного слоя и экрана в пределах от НПУ до УМО задаются напоры, соответствующие отметкам расчетных узлов. Считается, что в пределах горной массы крепления «зависания» воды не будет. Ниже отметки УМО значения напоров в расчетных узлах задаются равными отметке УМО. Так же учитывалась инфильтрация. В результате расчетов находятся значения фильтрационных нагрузок, которые автоматически переносятся в задачу определения напряженно-деформированного состояния дамбы.

Сейсмические воздействия для рассматриваемого сечения на ПК45+70 определялись по статической теории сейсмостойкости в соответствии с приложением *Е* [2], так как в этом месте дамба образована за счет врезки в естественный склон.

Расчетная модель. Расчетная область включает в себя собственно

дамбу и некоторую область основания. Размеры расчетной области основания принимаются в зависимости от деформационных свойств залегающих пород. В рассматриваемом сечении дамба опирается на массив полускальных пород и поэтому рассматривается сравнительно небольшая область этого массива. Такой подход связан с тем, что значения модуля деформации полускальных грунтов существенно выше значений модуля деформации нескальных грунтов. Поэтому деформации полускальных грунтов незначительно влияют на напряженно-деформированное состояние дамбы.

Задача решается методом конечных элементов. Расчетная область аппроксимируется треугольными и четырехугольными конечными элементами квадратичного типа.

Конечно-элементная модель сечения дамбы на ПК45+70 включает 16784 элементов. Элементы, моделирующие дамбу верхнего водоема, имеют характерный размер 0,5 м.

Конечно-элементная модель сечения дамбы, включающая всю расчетную область, приведена на рисунке 2, а фрагмент модели, включающий непосредственно дамбу, - на рисунке 3.

Учитывались следующие граничные условия:

– вертикальные перемещения нижней границы расчетной области принимаются равными нулю;

– горизонтальные перемещения боковых границ расчетной области принимаются равными нулю.

Результаты исследований. Были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС на ПК45+70. Рассматривались следующие расчетные случаи:

Расчетный случай 1. Эксплуатационный, основное сочетание нагрузок и воздействий. Сооружение возведено до проектных отметок. Произведено наполнение верхнего водоема ГАЭС до отметки НПУ с последующей сработкой до отметки УМО с «зависанием» фильтрующей воды в песке переходного слоя и в экране.

Расчетный случай 2. Эксплуатационный, особое сочетание нагрузок и воздействий. Сооружение возведено до проектных отметок. Произведено наполнение верхнего водоема ГАЭС до отметки НПУ с последующей сработкой до отметки УМО с «зависанием» фильтрующей воды в песке переходного слоя и в экране. Сооружение подвержено сейсмическому воздействию уровня МРЗ (7 баллов), направленному горизонтально в сторону верхнего бьефа.

Для всех расчетных случаев определялись напряжения, перемещения и деформации как для расчетных значений сдвиговых характеристик грунтов c_I и $tg\varphi_I$, так и для предельных значений сдвиговых характеристик грунтов $c_{\lim}$ и $tg\varphi_{\lim}$, соответствующих состоянию предельного равновесия.

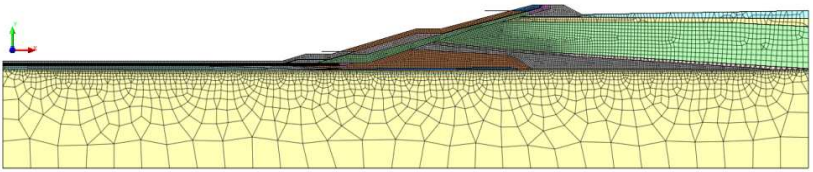

Рис. 2. Конечно-элементная модель расчетной области сечения дамбы на ПК45+70

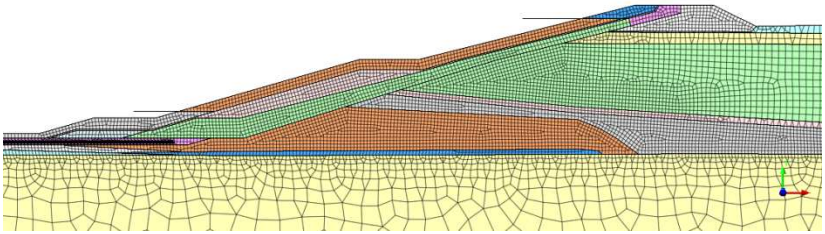

Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной модели расчетной области сечения дамбы на ПК45+70

На рисунках 4-5 для примера показаны главные напряжения σ_1 и σ_3 дамбы на ПК45+70 для расчетного случая 1 с учетом расчетных значений сдвиговых характеристик грунтов c_I и $tg\varphi_I$. На рисунках 6–7 показаны области максимальных пластических деформаций $\gamma_{\max}$ для расчетных случаев 1 и 2, соответствующих состоянию предельного равновесия дамбы.

Были выполнены расчеты прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС на ПК45+70 методом редукции. Результаты этих расчетов приведены в таблице. Результаты по другим рассмотренным сечениям не приводятся, так как они значительно превышают нормативные.

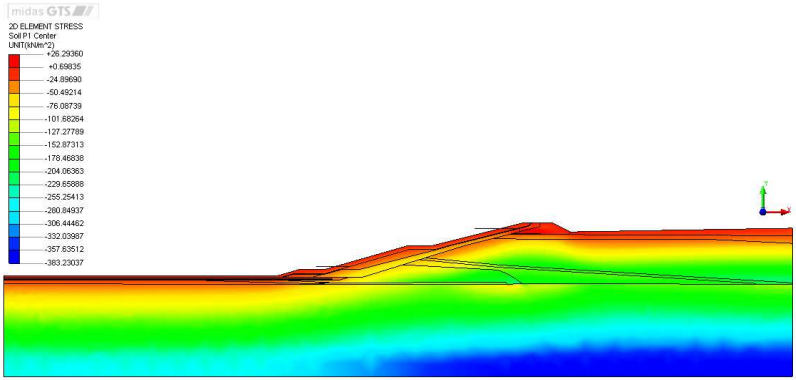

Рис. 4. Изополя главных напряжений σ_1, кПа при расчетных значениях сдвиговых характеристик для расчетного случая 1

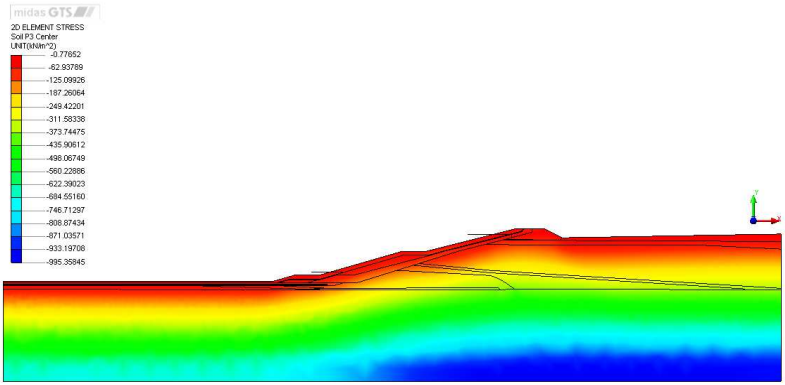

Рис. 5. Изополя главных напряжений σ_3, кПа при расчетных значениях сдвиговых характеристик для расчетного случая 1

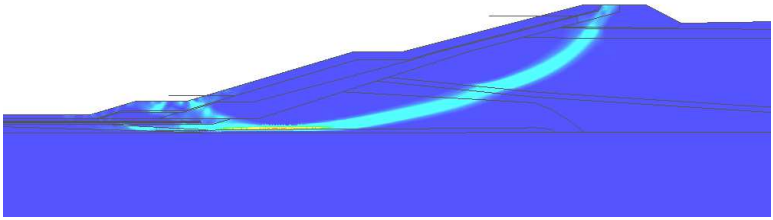

Рис. 6. Область максимальных пластических деформаций $\gamma_{\max}$ для состояния предельного равновесия для расчетного случая 1

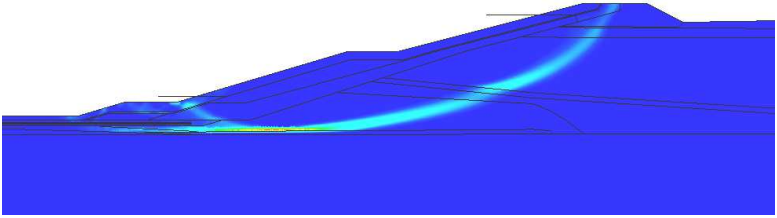

Рис. 7. Область максимальных пластических деформаций γ_{max} для состояния предельного равновесия для расчетного случая 2

Таблица

Результаты расчетов прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС на ПК45+70

Расчетный случай	Расчетный коэффициент запаса устойчивости	Нормативный коэффициент запаса устойчивости
1	1,28	1,25
2	1,16	1,06

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что коэффициенты запаса прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС выше, чем нормативные, следовательно, прочность и устойчивость дамбы обеспечена.

Выводы

1. Были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС.

2. Расчеты прочности и устойчивости выполнялись методом редукции сил. В результате расчетов прочности и устойчивости ограждающей дамбы по методу редукции, для условий ежедневной сработки и наполнения водоема, были получены коэффициенты запаса прочности и устойчивости, а так же области максимальных пластических деформаций, которые отображают наиболее вероятную поверхность обрушения.

3. Результаты расчетов показали, что прочность и устойчивость откосов дамбы обеспечена с коэффициентами запаса большими, чем нормативные.

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення /Мінрегіонбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 37 с. **2.** ДБН В.1.1-12:2006. За-

хист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2006. – 84 с. **3.** СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов./ Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 68 с. **4.** СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 48 с.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Skorobagatko K. V., Senior Engineer of PJSC "Ukrhydroproject"
("Gidrotehproekt" Co.Ltd, Kharkiv)

NUMERICAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE, STRENGTH AND STABILITY OF THE UPPER RESERVOIR LEVEE OF DNESTROVSKAYA PSP

The article describes the methodology and the results of numerical studies of the stress-strain state, strength and stability of the upper reservoir levee of Dnestrovskaya PSP for the conditions of daily drawdown and filling of the reservoir with the seismic actions.
Keywords: stress-strain state, strength, stability, earth dam, the method of reduction.

Скоробагатько К. В., старший інженер ПАТ «Укргідропроект»
(ООО «Гідротехпроект» , м. Харків)

ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ, МІЦНОСТІ І СТІЙКОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ ДАМБ ВЕРХНЬОЇ ВОДОЙМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

У статті представлена методика та результати виконання чисельних досліджень напружено-деформованого стану, міцності та стійкості огороджуючої дамби верхньої водойми Дністровської ГАЕС для умов щоденного спрацювання та наповнення водосховища з урахуванням сейсмічних впливів.
Ключові слова: напружено-деформований стан, міцність, стійкість, греблі з ґрунтових матеріалів, метод редукції.