

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВАРИАНТА КАМЕННОНАСЫПНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТИНСКОЙ ГЭС-1 С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ ЭКРАНОМ

Ю.П. Ляпичев, А.В. Радзинский

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Макляя, 6, Москва, Россия, 117198

Приведены результаты расчетов напряженного состояния Камбаратинской каменнонасыпной плотины высотой 275 м с экраном из железобетона, выполненные с помощью программы ADINA. Рассмотрен поэтапный способ возведения плотины и бетонирования экрана. Впервые в практике проектирования для уменьшения прогибов экрана были применены подэкрановые элементы из жесткого укатанного бетона, что позволило значительно уменьшить прогибы экрана и повысить безопасность предлагаемого варианта плотины по сравнению с принятым вариантом взрывонабросной плотины.

Ключевые слова: каменнонасыпная плотина, подэкрановый элемент.

Основные положения настоящих расчетов плотины и исходные данные.

В статье рассмотрены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) каменнонасыпной плотины (КНП) Камбаратинской ГЭС-1 с экраном из железобетона. Целью этих расчетов было наблюдение за состоянием экрана из железобетона при одинаковых условиях загрузки и эксплуатации, так как от состояния экрана существенно зависит безопасность КНП. Для расчета был применен метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в расчетном комплексе ADINA. В программе ADINA использована идеально упруго-пластическая модель грунта Мора-Кулона. Выбор такой модели грунта был обусловлен соответствием работы модели Мора-Кулона и реальной работы горной массы, т.е. короткая зона упругих деформаций, за которой следуют пластические. Также эта модель проста в использовании и вводе данных.

Сетка из 3190 конечных элементов (КЭ) в виде четырехугольников и треугольников (рис. 1) моделируют 57 и 82 слоев (3 и 5 этапов строительства соответственно) возведения плотины на полный профиль и имеет требуемые сгущения КЭ вблизи экрана. Основание плотины (скальные породы) по сравнению с плотинной является несжимаемым и поэтому не включено в расчеты, что позволяет выявить влияние прежде всего экрана из железобетона и степени сжимаемости (уплотнения) переходных и боковых зон камня на НДС плотины и экрана.

При моделировании Камбаратинской КНП в программе ADINA была учтена поэтапность возведения плотины и поэтапность наполнения водохранилища. Учет поэтапности строительства необходим для более достоверного моделирования поведения экрана, переходных зон и боковых призм, что благоприятно сказывается на достоверности конечных результатов расчетов.

В расчетах НДС Камбаратинской КНП с экраном из железобетона рассматривались строительный и эксплуатационный расчетные случаи.

В таблице 1 представлены параметры материалов модели Мора-Кулона, использованные в расчете этой КНП (строительный случай).

Таблица 1

Зоны	γ (т/м ³)	φ (°)	C (т/м ²)	E (МПа)	ν
Боковые призмы	2,0	42	—	100	0,32
Переходные зоны	1,9	40	—	50	0,32
Экран из железобетона	2,36	15	10,0	12,5	0,49

В таблице 2 представлены параметры материалов модели Мора-Кулона использованные в расчете этой КНП (эксплуатационный случай).

Таблица 2

Зоны		γ (т/м ³)	φ (°)	C (т/м ²)	E (МПа)	ν
Боковые призмы	Верховая	1,41	39	—	100	0,3
	Низовая	2,0	42	—	100	0,32
Переходные зоны	Верховая	1,22	40	—	50	0,3
	Низовая	1,9	55	—	50	0,32
Экран из железобетона		2,36	15	10,0	12,5	0,49

При назначении расчетных прочностных и деформативных параметров модели виброкатанного камня гранитов использовались параметры, определенные по результатам трехосных испытаний камня гранодиоритов плотины Финтерталь (Австрия), близкого по своим физическим характеристикам к камню Камбаратинской КНП.

Результаты расчетов НДС Камбаратинской КНП с экраном из железобетона. В расчетах НДС Камбаратинской КНП полного профиля с экраном из железобетона рассматривались три расчетных случая:

- 1) строительство плотины в три этапа возведения — 100 м, 200 м и 275 м с поэтапным наполнением водохранилища в пять этапов (всего 57 шагов расчета);
- 2) строительство плотины в пять этапов возведения до гребня плотины по 55 м с поэтапным наполнением водохранилища в пять этапов (82 шага расчета);
- 3) строительство плотины в пять этапов с применением подэкрановой зоны из особо тощего бетона и с наполнением водохранилища в пять этапов.

Для упрощения анализа расчетов НДС выделены следующие результаты:

- перемещения d_y, d_z ;
- нормальные напряжения σ_y, σ_z ;
- максимальные сдвигающие напряжения τ_{\max} ;
- полные деформации по Y, Z ;
- пластические деформации по Y, Z ;
- распределение функции пластичности Мора-Кулона.

Результаты расчета прогибов железобетонного экрана Камбаратинской КНП. Анализ НДС с помощью МКЭ удовлетворяет всем условиям статического равновесия и позволяет определить возможные деформации железобетонного экрана. Напряжения в откосе определяются путем решения задачи плоской деформации.

Определение коэффициента общей устойчивости откоса в программе ADINA основано на методе, предполагающем пропорциональное изменение прочностных свойств грунта c и $\tan \varphi$ при использовании итерационного решения задачи.

Для модели Кулона-Мора данное выражение переписывается в виде:

$$k = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{c_r + \sigma \cdot \tan \varphi_r}, \quad (1)$$

где c_r , φ_r — значения сцепления и угла внутреннего трения на итерационной ступени, предшествующей ступени, на которой перемещения в рассматриваемой системе приобретают незатухающий характер.

В расчетах принимается, что угол внутреннего трения и сцепление уменьшаются в одной и той же пропорции:

$$\frac{c_r}{c} = \frac{\tan \varphi_r}{\tan \varphi} = M_{sf}. \quad (2)$$

Таким образом, в процессе расчетов величины прочностных характеристик грунтов пропорционально уменьшаются до тех пор, пока массив грунта или какая-либо его часть не придут в неустойчивое состояние (деформации становятся незатухающими). Коэффициент запаса устойчивости откоса представляет собой отношение истинных значений прочностных характеристик грунта к значениям прочностных характеристик грунта, при которых наступает разрушение массива.

Три этапа строительства Камбратинской КНП. При строительстве плотины в три этапа возведения — 100, 200 и 275 м с наполнением водохранилища в пять этапов выполняется 57 шагов расчета.

Результаты расчетов показаны на рис. 1—4, из которых видно, что вертикальные сжимающие напряжения в плотине распределяются равномерно (от 0 на гребне плотины до 6 МПа в ее основании). Распределение горизонтальных напряжений характеризуется наличием зоны нулевых напряжений у гребня и низового откоса. К основанию сжимающие напряжения возрастают до 3,0 МПа. На низовом откосе подэкрановой зоны имеется концентрация сжимающих напряжений (0,6—2,6 МПа).

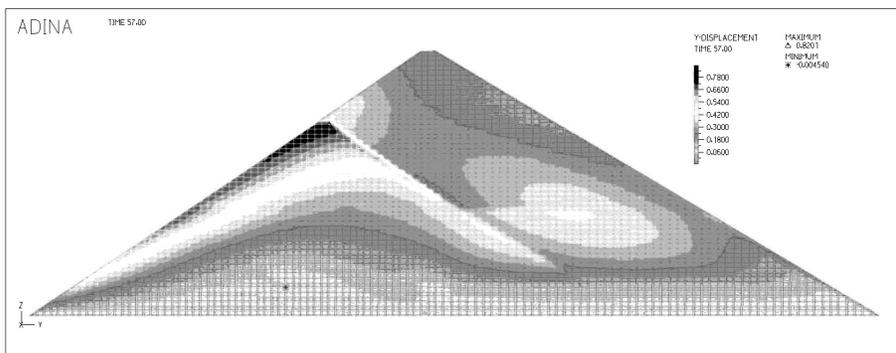


Рис. 1. Расчетные горизонтальные перемещения (м)

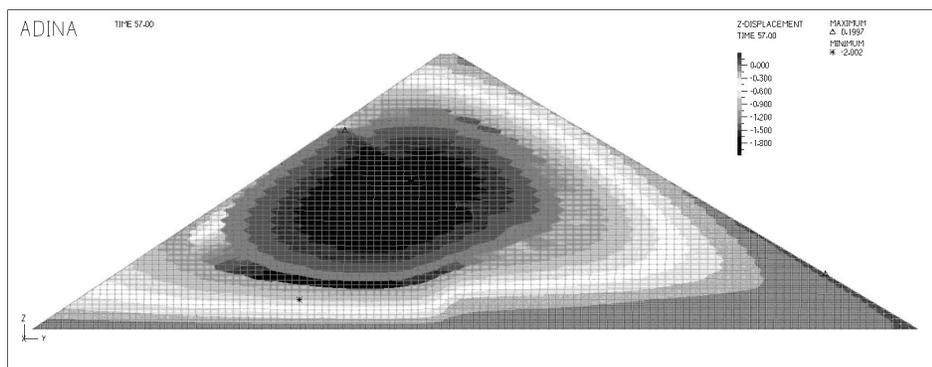


Рис. 2. Расчетные вертикальные перемещения (м)

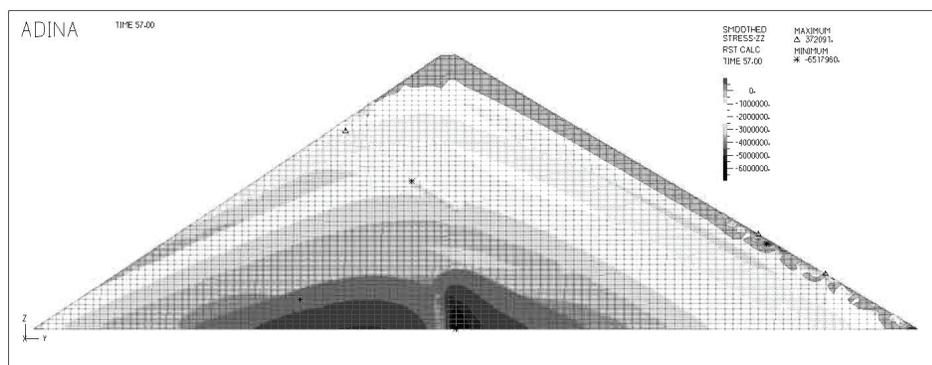


Рис. 3. Расчетные вертикальные напряжения (Па)

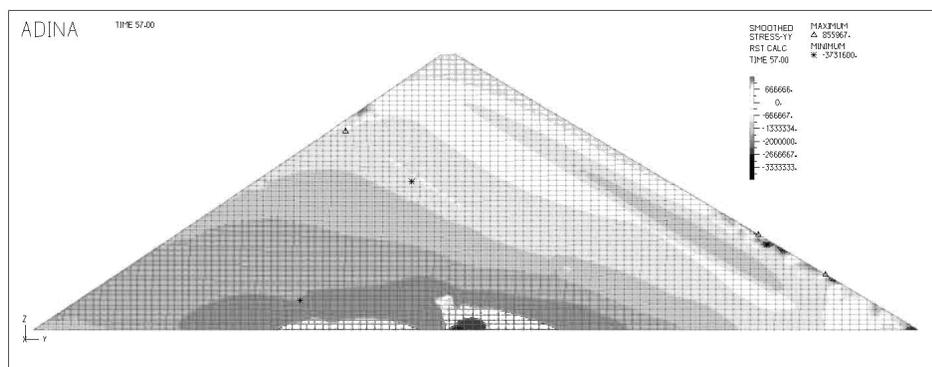


Рис. 4. Расчетные горизонтальные напряжения (Па)

Пять этапов строительства Камбратинской КНП. Результаты этих расчетов показаны на рис. 5—8, из которых видно, что характер горизонтальных перемещений по сравнению с предыдущим вариантом расчета не изменился, но этот характер стал более равномерным у верхового откоса. Расчетные вертикальные перемещения почти не изменились по сравнению с предыдущим расчетом.

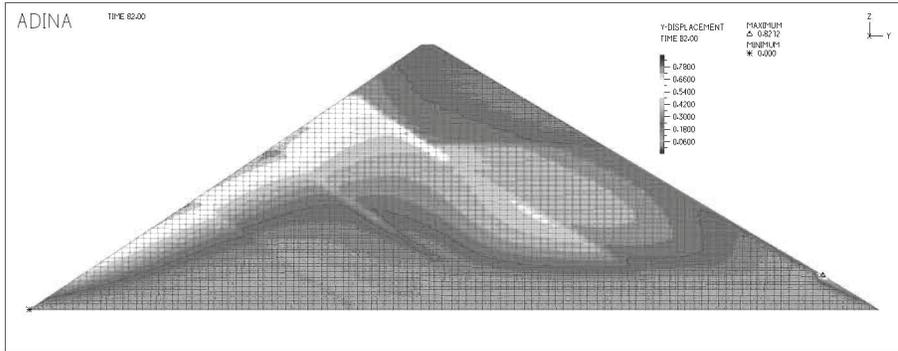


Рис. 5. Расчетные горизонтальные перемещения (м)

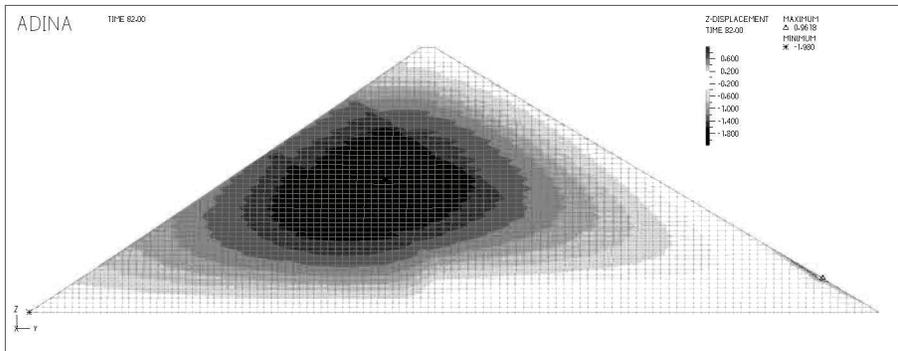


Рис. 6. Расчетные вертикальные перемещения (м)

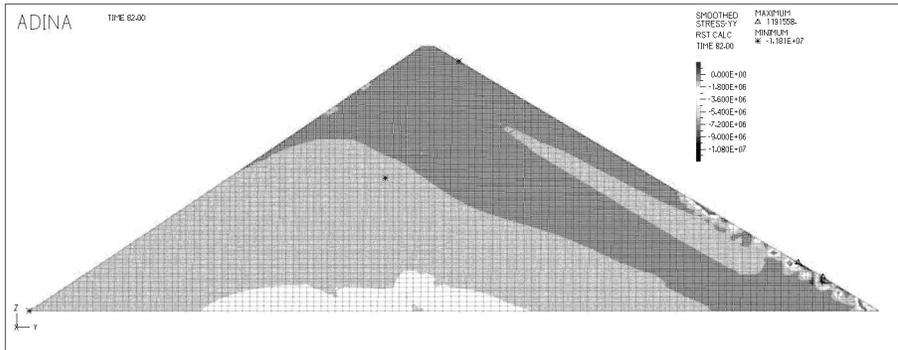


Рис. 7. Расчетные горизонтальные напряжения (Па)

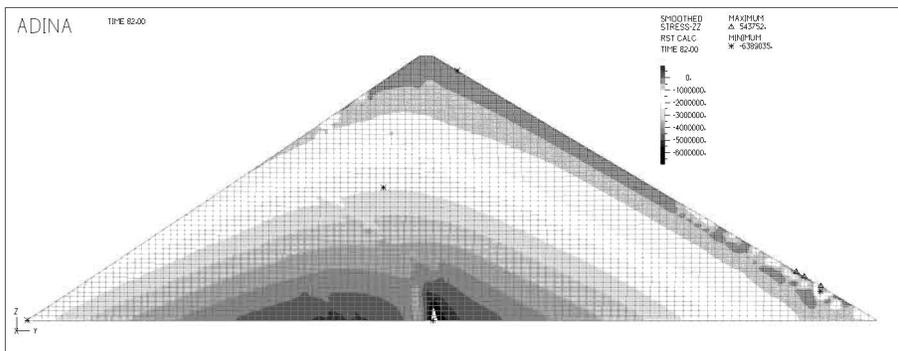


Рис. 8. Расчетные вертикальные напряжения (Па)

Пять этапов строительства Камбратинской КНП с применением подэкрановой зоны из тощего бетона. В этом расчете, так же, как и в предыдущем, строительство плотины велось до гребня в пять этапов плотины (по 55 м) с поэтапным наполнением водохранилища в пять этапов (всего 82 шагов расчета). В отличие от всех предыдущих расчетов в этом расчете подэкрановая зона выполняется не из обычного щебня, а из особо тощего укатанного бетона.

Как видно на рис. 9—11, применение подэкрановой зоны из особо тощего бетона привело к снижению горизонтальных перемещений экрана на гребне с 78 до 69 см.

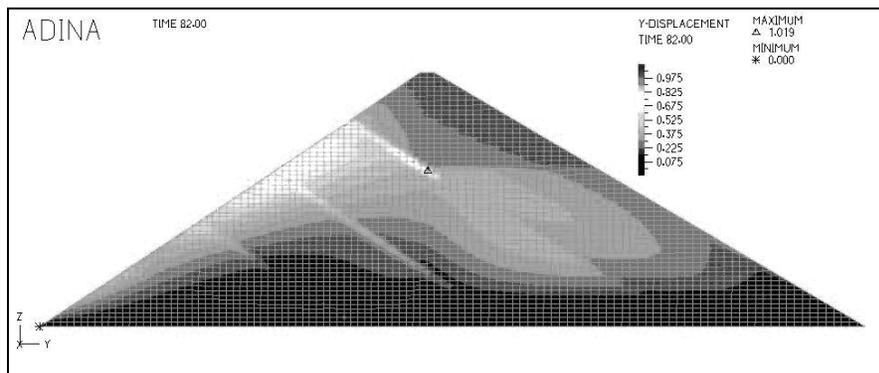


Рис. 9. Расчетные горизонтальные перемещения (м)

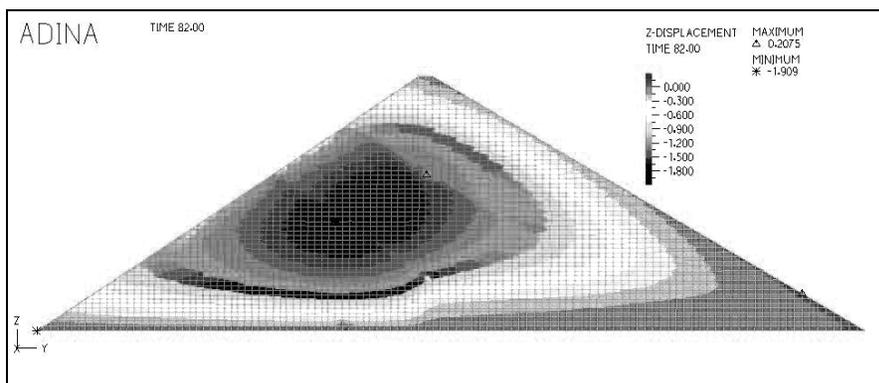


Рис. 10. Расчетные вертикальные перемещения (м)

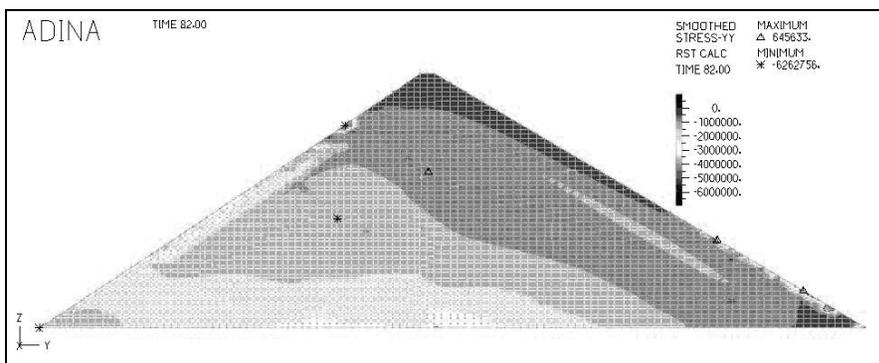


Рис. 11. Расчетные горизонтальные напряжения (м)

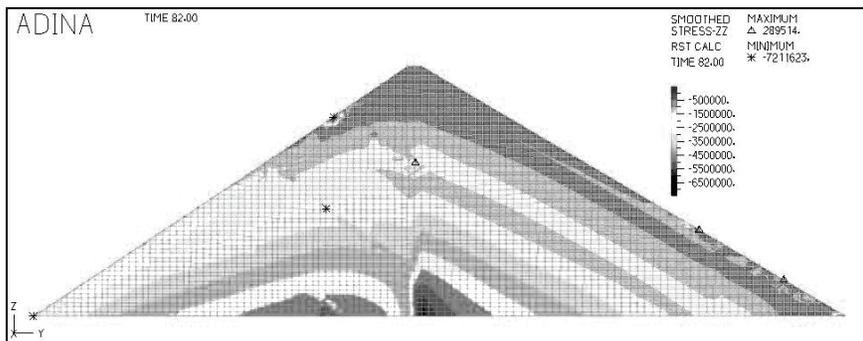


Рис. 12. Расчетные вертикальные напряжения (м)

Проверка достоверности расчетов Камбаратинской КНП по программе ADINA путем расчета плотины-аналога Тяньшэнцяо-1 (178 м, Китай) представлена на рис. 13—16.

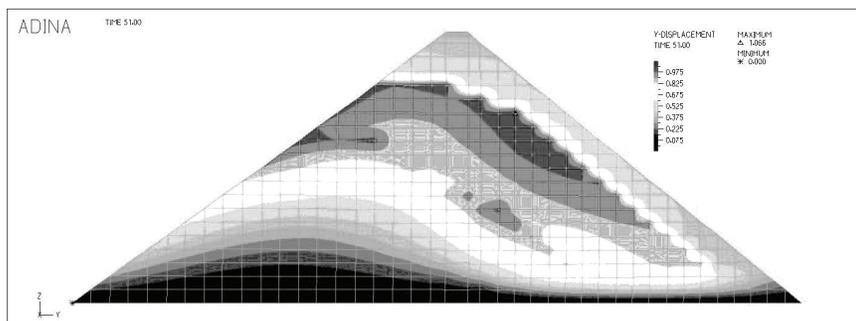


Рис. 13. Расчетные горизонтальные перемещения в плотине Тяньшэнцяо-1 (м)

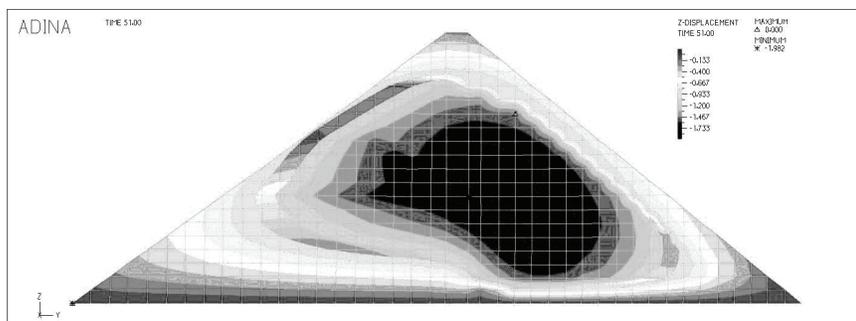


Рис. 14. Расчетные вертикальные перемещения в плотине Тяньшэнцяо-1 (м)

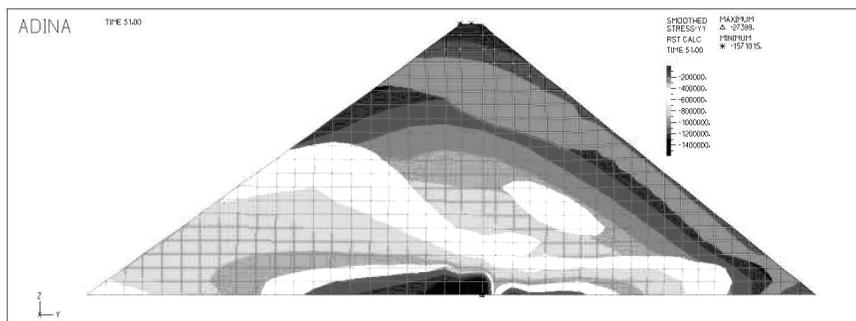


Рис. 15. Расчетные горизонтальные напряжения в плотине Тяньшэнцяо-1 (Па)

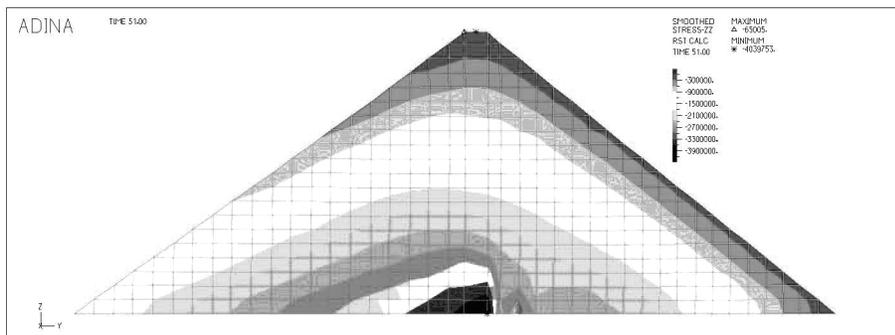


Рис. 16. Расчетные вертикальные напряжения плотине Тяньшэнцзяо-1 (Па)

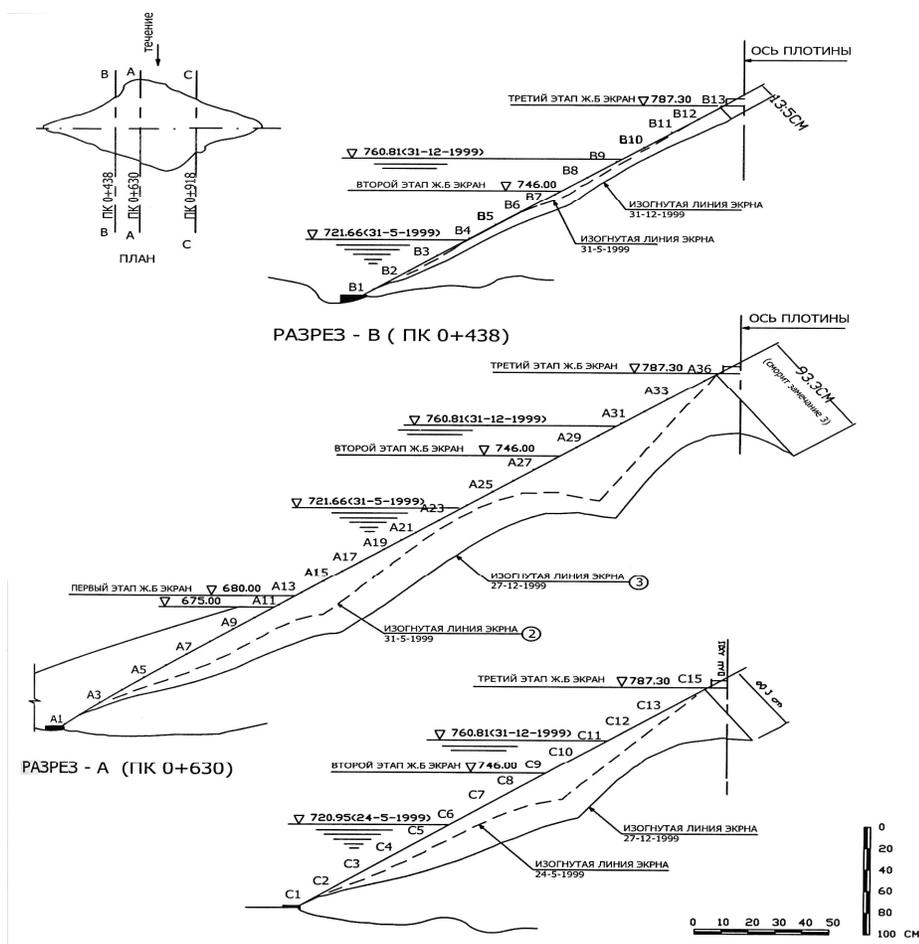


Рис. 17. Плотина Тяньшэнцзяо-1: натурные прогибы экрана (см)

Основные выводы. Расчеты плотины Тяньшэнцзяо-1 показали, что расчетные прогибы экрана этой плотины соответствуют натурным данным, из чего следует, что расчетные прогибы экрана Камбратинской плотины также будут соответствовать его реальным величинам.

Результаты расчета НДС Камбратинской плотины при трех этапах ее возведения показали, что горизонтальные перемещения сосредоточены примерно на $\frac{1}{3}$

длины экрана и имеет сосредоточенный характер, при этом прогиб экрана составляет около 140 см.

При строительстве Камбаратинской плотины в пять этапов (82 шагов расчетов) прогиб экрана составляет 120 см, что на 15% меньше, чем при трех этапах строительства.

Снижение прогиба экрана Камбаратинской плотины с помощью подэкрановой зоны из укатанного бетона оказалось эффективным (прогиб составил 50 см и снизился на 40%).

Вариант Камбаратинской плотины с экраном из железобетона и подэкрановой зоной из тощего укатанного бетона обеспечивает значительно большее сокращение стоимости и сроков строительства плотины, в нем также отсутствует опасное взрывное воздействие на скальные береговые примыкания плотины по сравнению с принятым в советское время вариантом взрывонабросной плотины и этот вариант плотины необходимо разработать детально сейчас в проекте этой крупнейшей ГЭС Кыргызстана.

STRESS-STRAIN STATE OF VARIANT OF ROCKFILL DAM WITH CONCRETE FACING OF KAMBARATA-1 HYDROPOWER PLANT

Yu.P. Lyapichev, A.V. Radzinsky

Peoples' Friendship University of Russia
Mikluho-Maklaja str., 6, Moscow, Russia, 117198

The 2-D stress-strain state analyses of Kambarata and TSQ-1 concrete face rockfill dams were performed using ADINA program with ideally elasto-plastic model of rockfill with Mohr-Column criterion. The great influence of consequence of construction on the stress-strain state of both dams was received. The new effective method of decrease of deflection of concrete face by roller compacted concrete (RCC) elements integrated under the middle of concrete face was proposed and assessed for Kambarata dam. The proposed Kambarata concrete face rockfill dam is the most favorable one comparing with the traditional concrete of rockfill dams whose are under design now.

Key words: concrete face rockfill dam, stress-strain state, face deflection, RCC elements.