

УДК 539.3

Салямова К.Д., д.т.н., проф.,

Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз,

Иламонов О.С. магистр

Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства «ТИИиМСХ», г. Ташкент, Республика Узбекистан

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ В ПЛОСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Основная задача расчетов напряженно-деформированного состояния грунтового сооружения при основных нагрузках (силы гравитации) вычисление нормальных, касательных и эффективных напряжений для оценки динамической устойчивости системы «грунтовая плотина-основание». Это является одной из основных задач при проектировании грунтовых плотин, так как в действующих нормативных документах [1] указано, что для особенно ответственных сооружений необходимо произвести расчеты по плоской схеме теории упругости с учетом конструктивных особенностей и кусочно неоднородных физико-механических параметров грунта.

Задача о упругом напряженно-деформированном состоянии плотины на основании решалась МКЭ, исходным уравнением для которого являлось вариационное уравнение [2,3]

$$\delta A = \delta A_{\sigma} + \delta A_p + \delta A_p = - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \rho g \delta v dV + \int_S \gamma h \delta v dS = 0 \quad (1)$$

где интегралы представляют работу сил упругости - первый интеграл, массовых сил – вес - второй и гидростатического давления на поверхность верхового откоса - третий.

Для получения разрешающей системы уравнений в ходе конечно-элементной дискретизации элементы объединяются в узловых точках, перемещения которых и является решением вариационного уравнения (1), реализующим экстремум (минимум) функционала работы. Полученная при этом разрешающая система уравнений для статических задач имеет вид

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (2)$$

где $[K]$ – матрицы жесткости модели, формирующаяся из матриц жесткости отдельных элементов; $\{u\}$ – искомый вектор узловых перемещений; $\{P\}$ – вектор гидростатической нагрузки.

По полученным в ходе решения системы (2) перемещениям $\{u\}$ узловых точек модели, определяются перемещения внутри каждого элемента, а затем

деформации в элементах - при помощи уравнений Коши:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\quad (3)$$

Напряжения определяются по формулам–Закона Гука

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (4)$$

В ходе решения системы линейных алгебраических уравнений (2) методом Гаусса были определены деформации (3) и компоненты напряжений (4) в узловых точках модели плотины на основании.

Приняты следующие граничные условия

– нижняя грань основания жестко закреплена, что выражается в отсутствии здесь горизонтальных - u и вертикальных - v возможных перемещений:

$$y=0: \quad \delta u|_{y=0}=0; \quad \delta v|_{y=0}=0 \quad ;$$

– на боковых гранях основания - подвижные шарниры, здесь возможны вертикальные перемещения, горизонтальные отсутствуют).

Граничные условия здесь будут:

$$\delta u|_{x=0,l}=0 \quad \delta v|_{x=0,l} \neq 0;$$

– гребень и нижний бьеф – свободны от нагрузки:

$$\sigma_{ij}n_j=0 \quad (1)$$

Исследования выполнены в двух вариантах: 1 – плотина находится под действием только собственного веса и 2 – под собственным весом и гидростатическим давлением на верхний бьеф. В первом случае граничные условия на верхний бьеф совпадают с граничными условиями (1). Во втором – на точку поверхности, расположенную на глубине h_i от свободной поверхности воды, действует гидростатическое давление, определяемое по формуле

$$\sigma_{ij}n_j=\gamma h_i$$

Выше использовались обозначения: u, v – горизонтальные и вертикальные перемещения точки поверхности; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений в точке поверхности; n_j – компонента вектора нормали к поверхности; γ – удельный вес

жидкости ($0,01\text{МН/м}^3$).

В качестве примера рассматривается плоская модель неоднородной Туполангской (республика Узбекистан) грунтовой плотины высотой $H=165\text{м}$, с коэффициентами заложения откосов: верхового - $m_1=2$; низового - $m_2=1,9$. Оба откоса симметричного ядра имеют коэффициент заложения - $m=0.2$.

Исходные данные для грунтов плотины и основания приняты, согласно проектным данным АО Гидропроекта:

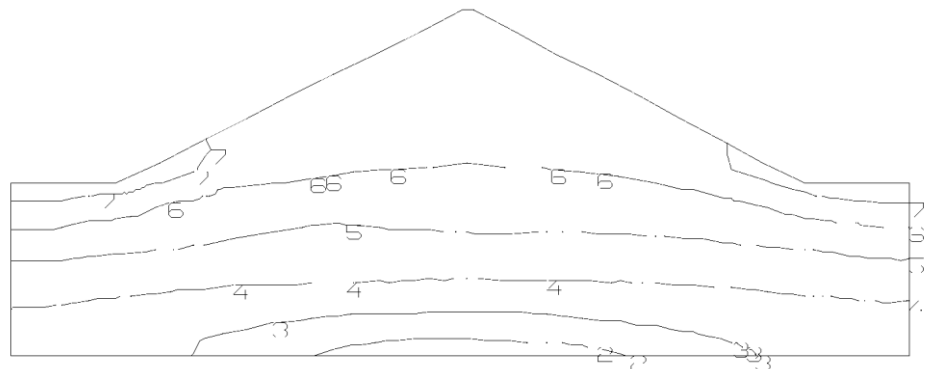
- ядро: $E=15\text{ МПа}$; $\rho=2100\text{ кг/м}^3$; $\nu=0,3$ (суглинок);
- верхняя упорная призма: $E=70\text{ МПа}$; $\rho=2284\text{ кг/м}^3$; $\nu=0,25$ (камень);
- нижний бьеф: $E=70\text{ МПа}$; $\rho=2040\text{ кг/м}^3$; $\nu=0,25$ (камень).

При расчете поперечного сечения плотины (с основанием и без) учитывалось среднее значение $E=3500\text{МПа}$ для всей плотины; при расчете модели продольного сечения значение E выбиралось равным значению в ядре, т.е. $E = 70\text{ МПа}$.

Результаты представлены на рис.1 – рис. 3, где одинаковыми цифрами обозначены изолинии с одинаковыми значениями соответствующих компонент напряженно-деформированного состояния плотины, находящейся под действием либо только собственного веса (а), либо с дополнительным учетом гидростатики (б).

а) σ_x , МПа без гидростатики

7 -2 63E-01
 6 -5 77E-01
 5 -8 92E-01
 4 1 21E+00
 3 1 52E+00
 2 -1 84E+00
 1 -2 15E+00
 Max=+7 34E-03
 Min=-2 04E-02



б) σ_x , МПа с гидростатикой

9 +1 15E-01
 8 -1 37E-01
 7 -3 88E-01
 6 -6 39E-01
 5 8 91E+01
 4 -1 14E+00
 3 -1 39E+00
 2 1 64E+00
 1 -1 90E+00
 Max=+3 66E-01
 Min=-2 15E-02

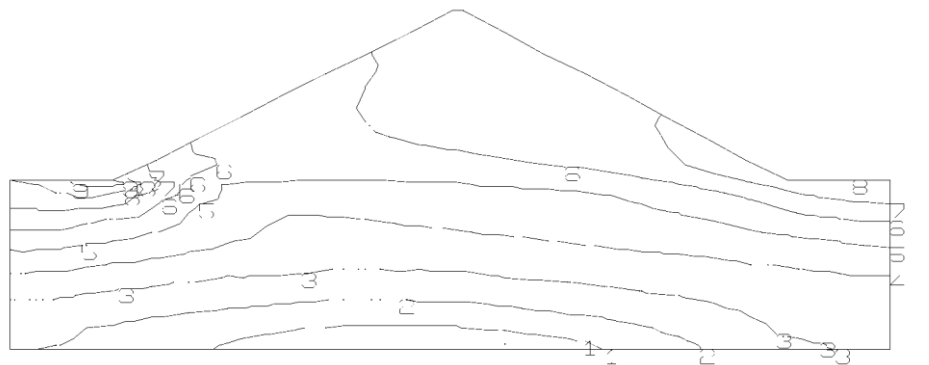
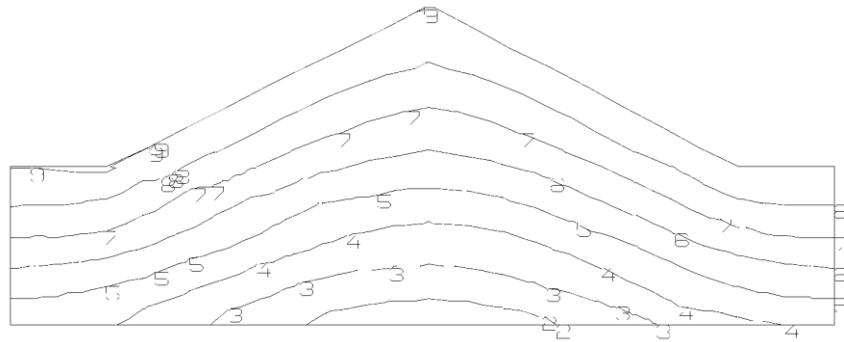


Рис. 1 Горизонтальные напряжения без учета (а) и с учетом (б) гидростатики

а) σ_y , МПа без гидростатики

9 1 89Г 21
 8 -1 06F+20
 7 -1 93E+20
 6 -2 80E+20
 5 -3 67E+20
 4 -4 55E+20
 3 5 47I+20
 2 -6 29F+20
 1 -7 16E+20
 Max=-1 87E-02
 Min=-6 80E+00



б) σ_y , МПа с гидростатикой

9 -8 86E-01
 8 1 53L+00
 7 -2 29E+00
 6 -2 98E+00
 5 3 67I+00
 4 -1 37E+00
 3 -5 07E+00
 2 -5 76E+00
 1 -6 46E+00
 Max=-1 89E-01
 Min=-7 16E+00

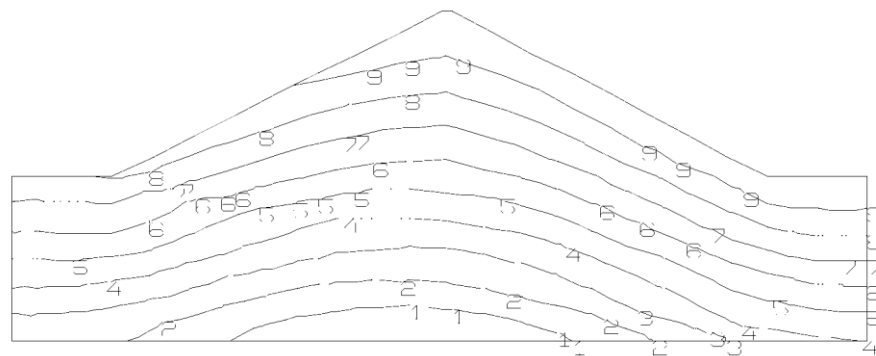
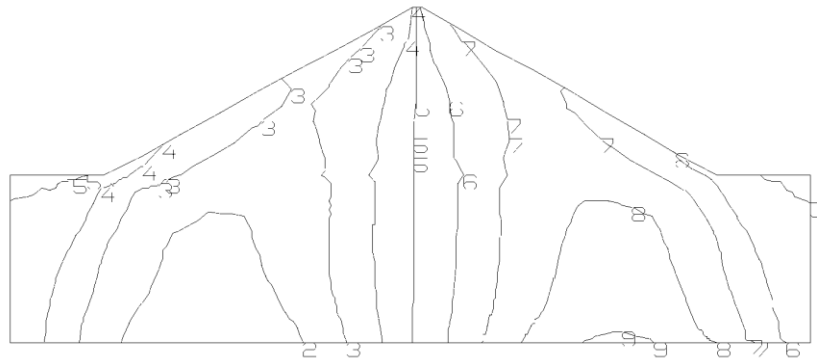


Рис. 2 Вертикальные напряжения без учета (а) и с учетом (б) гидростатики

а) τ_{xy} , МПа без гидростатики

9 +4 27F-01
 8 +3 20E-01
 7 +2 13E-01
 6 +1 07C 01
 5 -1 49F-08
 4 -1 07E-01
 3 -2 14F-01
 2 -3 20E-01
 1 -4 27F-01
 Max=+4 40C 01
 Min=-4 27C 01



б) τ_{xy} , МПа с гидростатикой

9 +4 62Г 01
 8 +3 93E-01
 7 +3 24E-01
 6 +2 54Г 01
 5 +1 85E-01
 4 +1 11I 01
 3 +4 62E-02
 2 -2 31E-02
 1 3 24I 02
 Max=+5 31E-01
 Min=-1 62E-01

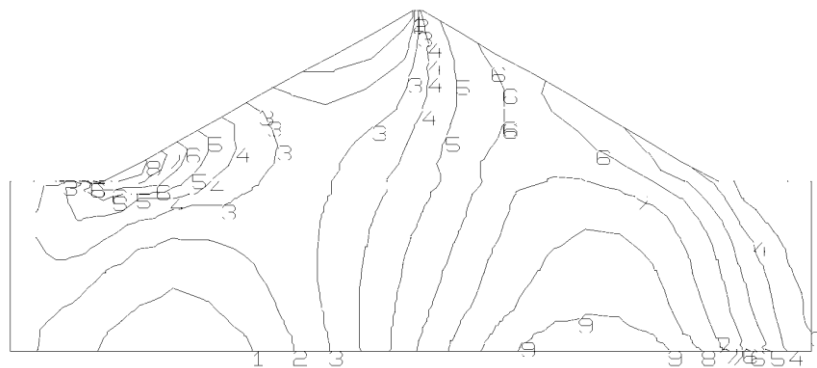


Рис. 3 Касательные напряжения без учета (а) и с учетом (б) гидростатики

Полученные результаты (рис. 1, рис. 2) показывают небольшое увеличение горизонтальных напряжений при гидростатике в пригребневой зоне с 0,057 МПа – рис.1, а до 0,63 МПа – рис.1, б и увеличение вертикальных напряжений на верховом откосе с 0,17 МПа (линия 9 на рис.2, а) до 0,9 МПа (линия 9 на рис.2, б). В результате воздействия гидростатического давления увеличивается максимальное давление на основание с 6,8 МПа (рис.2, а) до 7,16 МПа (рис.2, б).

Проведенные расчеты по определению напряженного состояния грунтовой плотины Туполангской ГЭС показывают:

1. При учете гидростатики в грунтовой плотине изменяется симметричная картина касательных напряжений, наблюдаемая в сечении модели под действием только веса (ср.рис.3а и рис.3б).
2. При учете только собственного веса касательные напряжения вдоль поверхности и верхового и низового откосов, особенно, у подошвы плотины незначительны (0,1МПа). Дополнительный же учет гидростатического давления на верховой откос увеличивает касательные напряжения вблизи основания откоса почти в 5 раз (до 0,5МПа). При этом распределение касательных напряжений, такое же как и нормальных (рис.1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ШНК 2.06.11-04.Строительство в сейсмических районах. Гидротехнические сооружения. Госархитекстрой. Ташкент. 2004. – 46 с.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 572 с.
3. Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтовых плотин. LAMBERT / ACADEMIC PUBLISHING. 147 р.