

УДК 624.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОТИНЫ ШУРАБСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ ОСНОВАНИЯ

Низомов Д.Н., д.т.н., профессор, член-корр. АН РТ, заведующий лабораторией института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии (ИГССС) АН РТ;

Ходжибоев А.А., д.т.н., ТТУ им. акад. М.С. Осими;

Икромов И.И., к.т.н., ТАУ им. Ш. Шотемур;

Ходжибоев О.А., СНС ИГССС АН РТ

*Ключевые слова:* грунтовая плотина, напряжённо-деформированное состояние, сейсмическое воздействие, метод граничных уравнений, ядро, основание.

### **Введение**

При оценке сейсмостойкости плотин возникает необходимость в построение математической модели системы «основание-сооружение» при сейсмическом воздействии. Земляная плотина по строению является неоднородной средой, которая состоит из нескольких блоков. Поэтому математическое моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния сложных объектов [1], в том числе задача взаимодействия сооружений с основанием при неоднородности системы, является актуальной проблемой.

### **1. Плотина Шурабской ГЭС**

Напряженно-деформированное состояние плотин, в частности земляных, в значительной степени определяются физико-механическими характеристиками их оснований. Скальные породы характеризуются модулем деформации на сжатие не менее 10%, от модуля упругости бетона [3] (Гришин, 1975). По значению модуля деформации скальные породы подразделяются: на слабые- 2-7 ГПа ( $2 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^3$  МПа); среднепрочные-7-30 ГПа и высокопрочные- более 30 ГПа. Динамический модуль упругости скального основания, в зависимости от значений волнового сопротивления и коэффициента вязкости, колеблется в пределах от 3 до 30 ГПа [4] (Синицын, 1969). Модуль деформации нескальных пород (валунные, галечниковые, гравийные, песчаные и др.) изменяется в пределах от  $0,003 \cdot 10^3$  до  $0,1 \cdot 10^3$  МПа [7] (СНиП 2.02.02-85\*). Основание плотины Шурабской ГЭС, состоящего из алевролита ( $E = 1,5 \cdot 10^3$  МПа) и песчаника ( $E = 2,5 \cdot 10^3$  МПа), относится к полускальным по квалификационной характеристике грунтов основания [7] (СНиП 2.02.02-85\*). Плотность сухого грунта в массиве основания  $\rho = 2,2 - 2,65$  т/м<sup>3</sup>. Неоднородное тело плотины состоит из ядра и упорных призм. Верховая и низовая призмы –каменно-набросные ( $E = 0,1 \cdot 10^3$  МПа), грунтовое ядро из суглинка с модулем деформации  $E = 0,062 \cdot 10^3$  МПа ( $0,62 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>).

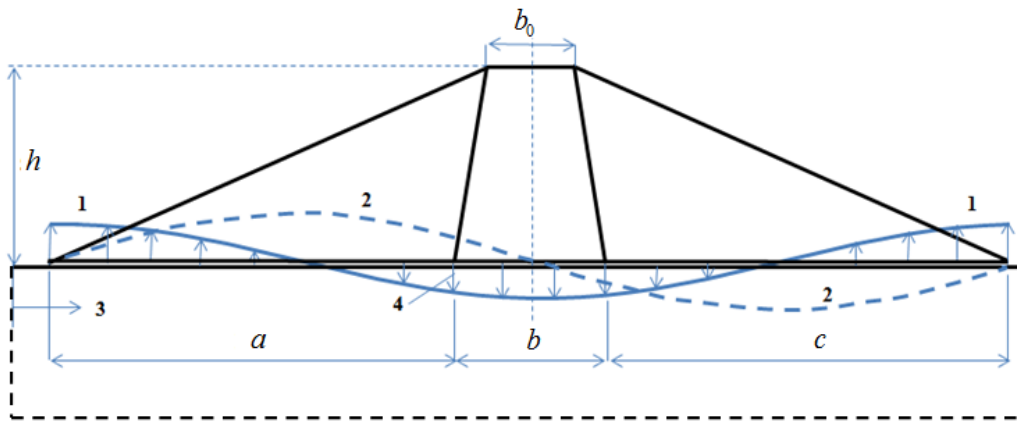


Рис.1. Схема воздействия бегущей волны (смещение грунта в вертикальной плоскости): 1, 2-бегущие волны; 3-направление движения волны; 4-направление ускорений.

**2. Нагрузки, действующие на плотину (рис.2).** На плотину действуют следующие нагрузки[6-9]: 1) собственный вес плотины ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ); 2) гидростатическое давление воды в верхнем ( $W_1$ ) и нижнем бьефах; 3) фильтрационное противодавление на подошву плотины ( $W_2$ ); 4) взвешивающее давление на подошву плотины; 5) давление волн; 6) давление отложившихся в верхнем бьефе наносов; 7) сейсмические воздействия на плотину, воду водохранилища и отложившиеся наносы (рис.2); 8) сейсмическое воздействие в виде бегущей волны на подошву плотины (рис.1).

### 3. Сейсмические воздействия

Поскольку ширина подошвы плотины соизмерима с длинами сейсмических волн, например, в полускальных породах  $c = 1000 - 1500$  м/с [5] (Корчинский, 1978) и при периоде сейсмических волн  $T = 0,2$  с,  $\lambda = 200 - 300$  м, то принимая бегущую сейсмическую волну синусоидальной, движущейся с постоянной скоростью, можно выделить следующие предельные случаи движения плотины (рис.1). При вертикальных колебаниях основания в предельных случаях перемещения могут быть либо симметричными (кривая 1), либо кососимметричными (кривая 2). Здесь направление перемещений и ускорений колебаний грунта основания направлены перпендикулярно направлению движения сейсмической волны. Также, необходимо учитывать возможность воздействия ускорений, направленных вдоль движения волны в горизонтальной плоскости.

Таким образом, для оценки напряженно-деформированного состояния плотины рассматриваются действие двух стоячих волн, т.е. независящих от времени, имеющих очертания по длине подошвы плотины, одной – по закону косинуса, а другой - синуса и изменяющихся во времени с периодом  $T = \lambda / c$ . Интенсивность воздействия в виде ускорения основания представляется в виде  $A \cos(2\pi x / \lambda)$  и  $A \sin(2\pi x / \lambda)$ , где  $A$  - амплитудное значение ускорений,  $\lambda$  - длина волны, равная ширине подошвы плотины. Окончательно, от действия бегущей волны на подошву плотины будет приложена нагрузка для двух случаев:

$$p_y = p_0 \cos(2\pi x / \lambda), \quad p_y = p_0 \sin(2\pi x / \lambda),$$

где  $p_0$  - амплитудное значение нагрузки, которое можно принять, равным 30%, от максимального значения горизонтальной расчетной сейсмической нагрузки.

### 4. Напряженно-деформированное состояние плотины от собственного веса

Рассмотрим решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния неоднородной плотины на основе модели «основание-сооружение» в условиях плоской деформации (рис.2). При этом предполагается, что упорные призмы 1 и 3 могут иметь разные физико-механические характеристики, которые отличаются от характеристики ядра 2, а деформируемое основание является однородным. Таким образом, неоднородная область с общей линией основания и соответствующими объемными силами и действующей нагрузкой моделирует статическое состояние плотины с центральным ядром.

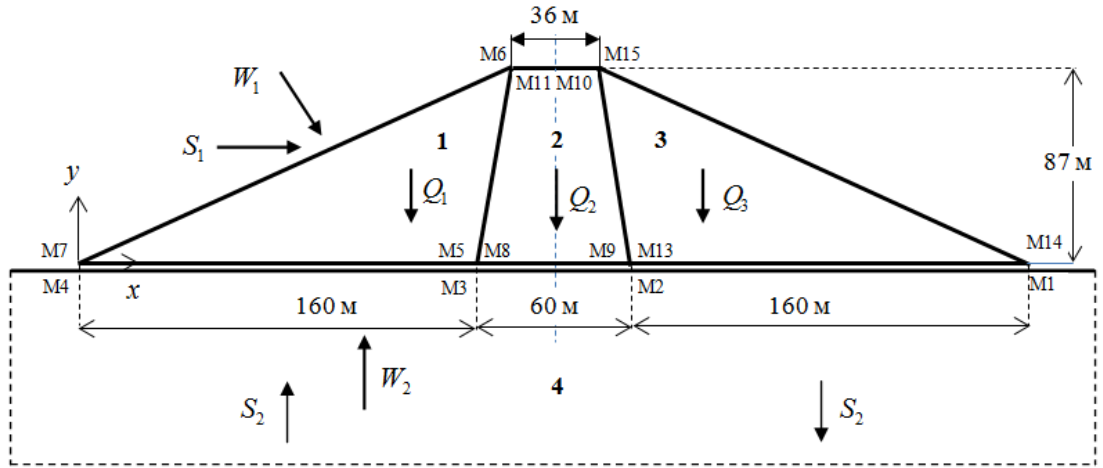


Рис. 2. Профиль плотины Шурабской ГЭС:

1, 3-упорные призмы из галечника; 2-ядро из суглинка; 4-деформируемое основание.

**5. Алгоритм решения задачи методом граничных уравнений.** Систему разрешающих уравнений можно представить в матричной форме[2]

$$\begin{bmatrix} A_{12} & -B_{12} & 0 & -B_{01} & 0 \\ A_{21} & B_{21} & A_{22} & 0 & -B_{02} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{12} \\ P_{12} \\ U_{22} \\ P_{01} \\ P_{02} \end{Bmatrix} = B_{22} P_x^0. \quad (1)$$

Здесь  $U_{12}, P_{12}$  - векторы перемещений и напряжений на контактной границе;  $U_{22}$  - вектор перемещений на поверхности плотины  $S_{22}$ ;  $P_{01}, P_{02}$  - векторы напряжений на опорной границе ядра и упорных призм, соответственно. Блочные матрицы  $A_{12}$  и  $B_{12}$ , соответствующие контактной границе ядра имеют вид

$$A_{12} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad B_{12} = \begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $A(a_{ij}), B(b_{ij}), C(c_{ij}), D(d_{ij}), E(e_{ij}), F(f_{ij}), G(g_{ij}), H(h_{ij})$  (2)- прямоугольные матрицы размера  $(N_{12} + N_{01}) \times N_{12}$  с элементами:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= -b \int_{\Delta S_j} (c + 2m_{1i}^2) \frac{\cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j, & b_{ij} &= bc \int_{\Delta S_j} \frac{\sin \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j - 2b \int_{\Delta S_j} m_{1i} m_{2i} \frac{\cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j, \\ c_{ij} &= -bc \int_{\Delta S_j} \frac{\sin \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j - 2b \int_{\Delta S_j} m_{1i} m_{2i} \frac{\cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j, & d_{ij} &= -b \int_{\Delta S_j} (c + 2m_{1i}^2) \frac{\cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} ds_j, \\ e_{ij} &= -a \int_{\Delta S_j} [(3 - 4\nu_1) \ln r_{ij} - m_{1i}^2] ds_j, & f_{ij} &= a \int_{\Delta S_j} m_{1i} m_{2i} ds_j, & g_{ij} &= f_{ij}, \\ h_{ij} &= -a \int_{\Delta S_j} [(3 - 4\nu_1) \ln r_{ij} - m_{2i}^2] ds_j, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \cos \gamma_{ij} &= m_{1i} n_{1j} + m_{2i} n_{2j}, & \sin \gamma_{ij} &= m_{1i} n_{2j} - m_{2i} n_{1j}, \\ n_{1j} &= \cos \alpha_j, & n_{2j} &= \sin \alpha_j, & m_{1i} &= \cos \beta_j, & m_{2j} &= \sin \beta_j, \\ r_{ij} &= [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2}, & i &= 1, 2, \dots, N_{12} + N_{01}; & j &= 1, 2, \dots, N_{12}, \\ a &= 1/8\pi\mu_1(1 - \nu_1), & b &= 1/4\pi(1 - \nu_1), & c &= 1 - 2\nu_1, \end{aligned}$$

где  $\mu_1, \nu_1$  - модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала ядра.

Блочная матрица  $B_{01}$  (2) с элементами  $E(e_{ij}), F(f_{ij}), G(g_{ij}), H(h_{ij})$ , где  $i = 1, 2, \dots, N_{12} + N_{01}$ , а  $j$  отсчитывает номера элементов на контуре  $S_{01}$ , является прямоугольной и имеет размер

$2(N_{12} + N_{01}) \times 2N_{01}$ . Блочные матрицы  $A_{12}, B_{21}, A_{22}, B_{02}$ , соответствующие области  $\Omega_2$ , записываются аналогично (2). Для определения коэффициентов (3) используется численный метод Гаусса.

В результате решения системы алгебраических уравнений (1) определяются векторы перемещений и напряжений, соответствующие контурам ядра и упорных призм относительно глобальной системе координат. На втором этапе расчета вычисляются нормальные и тангенциальные перемещения относительно локальной системе координат, а затем определяются тангенциальные и нормальные напряжения.

На основе разработанных математической модели и алгоритма, решения методом граничных уравнений на языке ФОРТРАН, составлены программы расчёта неоднородной плотины на действия различных нагрузок. Эта программа зарегистрирована в национальном патентном центре Республики Таджикистан и получена авторское свидетельство за номером №1671200241 [10]. Дальнейшие приводимые расчёты по определению напряженно-деформированного состояния неоднородной грунтовой плотины выполнены согласно компьютерной программы имеющейся в [10].

На рис. 3 представлены результаты напряженно-деформированного состояния при следующих данных модулях деформаций:  $1- E_0 = E_1 = E_2 = E_3 = 2,4 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>;  $2- E_0 = E_2 = 1,2 \cdot 10^4, E_1 = E_3 = 2,4 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>, где  $E_0$ -модуль деформации основания,  $E_1, E_3$ -модули деформации упорных призм,  $E_2$ -модуль деформации ядра.

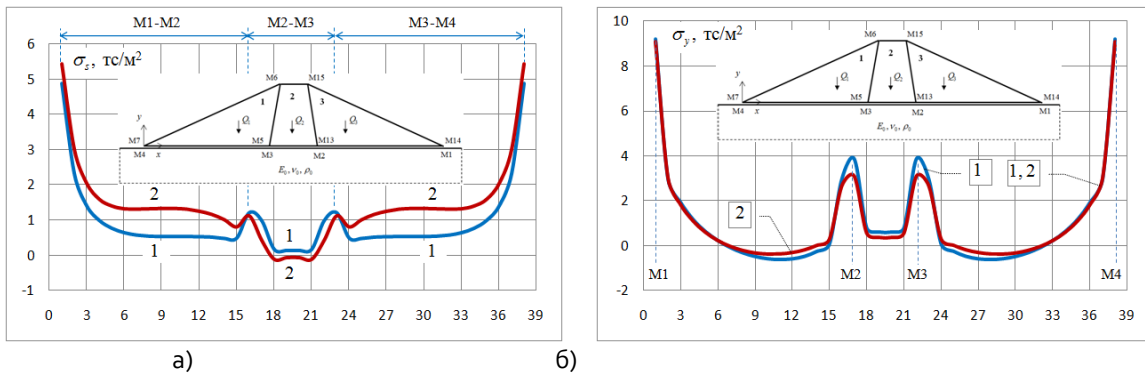


Рис. 3. Распределение напряжений на контуре полуплоскости а) тангенциальные б) нормальные

Из анализа графиков распределения тангенциальных и нормальных напряжений (рис.3 а и б) выходит, что от действия собственного веса плотины концентрация напряжений происходит по краям, что следовало ожидать.

**6. Напряженно-деформированное состояние плотины от совместного действия собственного веса, гидростатического давления, фильтрационного противодавления и сейсмической нагрузки**

На рис. 4 приведены графики изменения напряжений на контурах системы «основание-сооружение» при следующих данных:  $1- E_0 = 2,4 \cdot 10^4; E_1 = E_3 = 1,2 \cdot 10^4; E_2 = 0,6 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>;  $2- E_0 = E_1 = E_2 = E_3 = 2,4 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>;  $3- E_0 = 1,2 \cdot 10^4; E_1 = E_3 = 1,2 \cdot 10^4; E_2 = 2,4 \cdot 10^4$  тс/м<sup>2</sup>.

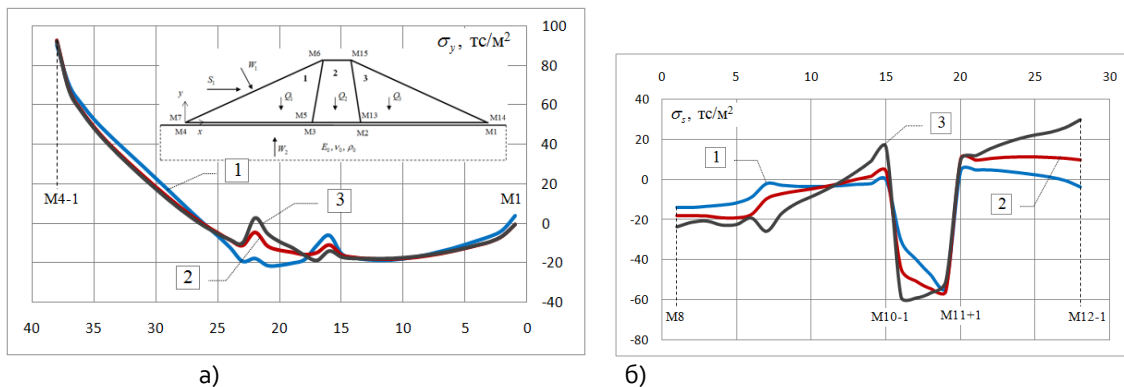


Рис. 4. Распределение напряжений а) нормальных, на поверхности основания б) тангенциальных, на контуре ядра плотины

Из рис. 4 видно, что концентрация напряжений происходит в угловых зонах, и поэтому на этот факт следует обратить внимание, при проектировании грунтовых плотин.

Таким образом, разработаны математическая модель, алгоритм расчёта и компьютерная программа для определения напряжённо-деформированного состояния неоднородной грунтовой плотины от различных воздействий, в том числе от сейсмических.

**Выводы:** на основе полученных результатов методом граничных уравнений по определению напряжённо-деформированного состояния неоднородной грунтовой плотины от различных воздействий следует, что концентрация нормальных и тангенциальных напряжений происходят в угловых зонах. Значения наибольших нормальных и тангенциальных напряжений также зависят от механических характеристик (модуль деформаций и коэффициента поперечной деформации) грунтов и горных пород, составляющих тело плотины и грунтов основания, залегающих под плотиной. Отсюда следует, что при проектировании грунтовых плотин особое внимание надо уделить усилению краёв и мест соприкосновения различных блоков тела плотины.

#### Литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование - М.: Наука, 2002. -320 с.
2. Низомов Д.Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики -М.: Изд-во АСВ, 2000. -282 с.
3. Гришин М.М., Розанов Н.П., Белый Л.Д. и др. Бетонные плотины (на скальных основаниях)-М.: Стройиздат, 1975. -352 с.
4. Сеницын А.П. Современное состояние и направление исследований методами волновой динамики сейсмического воздействия на гидротехнические сооружения.- Труды координационных совещаний по гидротехнике-Л.: Энергия.- вып. 47, 1969.- С.109-122
5. Корчинский И.Л., Гриль А.А. Расчет всяких покрытий на динамические воздействия-М.: Стройиздат, 1978.- 220 с.
6. Можевитинов А.Л. Формулы для деформаций основания арочных плотин при симметричной и антисимметричной нагрузке-«Труды Ленгидропроекта», №5, 1967
7. СНиП 2.02.02-85\* Основания гидротехнических сооружений- М., 2004
8. СНиП 2.06.05-84\* Плотины из грунтовых материалов- М., 1991
9. СНиП 22.07.2007 Сейсмостойкое строительство-Душанбе, 2008
10. Низомов Д.Н., Ходжибоев А.А., Ходжибоев О.А. Программа численного решения на ЭВМ статической задачи плотины на основе неоднородной модели с учётом податливости основания. Министерство экономического развития и торговли Республики Таджикистан. Государственное учреждение Национальный патентно-информационный центр. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса. № государственной регистрации №1671200241

#### АННОТАЦИЯ

#### ТАДҚИҚИ ҲОЛАТИ ШИДДАТНОҚИ-ШАКЛИВАЗКУНИИ САРБАНДИ НБО ШҶРОБ ДАР АСОСИ АМСИЛАИ ГУНОГУНТАРКИБ БО БАҲИСОБИРИИ АСОСИ ЧАНДИР

Дар мақола сарбанди хокии аз якчанд блокҳо иборатбудаи дар ҳолати шиддатнокии ҳамвор қарордошта, ки дар зери таъсири қувваҳои гуногун мебошад, баррасӣ мешавад. Барои муайян намудани ҳолати шиддатноқ-шакливазкунии сарбанди хокӣ, ки бо асоси чандир ҳамкорӣ мекунад, методи муодилаҳои канорӣ истифода мешаванд.

#### ANNOTATION

#### RESEARCH OF THE STRESSED-DEFORMED CONDITION OF THE DAM OF THE SHURAB HPP BASED ON AN INHOMOGENEOUS MODEL TAKING INTO ACCOUNT THE FLEXIBILITY OF THE FOUNDATION

The article considers a soil dam consisting of several blocks under the influence of various forces, under conditions of plane deformation. To determine the stress-strain state of a soil dam interacting with an elastic base, the method of boundary equations is used.

**Key words:** soil dam, stress-strain state, seismic impact, method of boundary equations, core, foundation.