

## ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНТУРАХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ МАССИВАХ

Д.Н. НИЗОМОВ\*, *д-р техн. наук, профессор,*

А.А. ХОДЖИБОЕВ\*\*, *канд. техн. наук,*

О.А. ХОДЖИБОЕВ\*, *инж.*

*\*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук Республики Таджикистан*

*734029, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни 267, tiees@mail.ru*

*\*\*Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими*

*734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10, hojiboev@mail.ru*

*Решены задачи концентрации напряжений и распределения перемещений по контуру подземных сооружений, устраиваемых в анизотропных, трансверсально-изотропных и квазиизотропных горных массивов, численным моделированием на основе граничных уравнений.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** – трещиноватый горный массив – подземные сооружения – анизотропия – трансверсально-изотропный массив – квазиизотропный массив.

Рассматривая модель линейно-деформируемого породного массива, необходимо учитывать различие деформационных свойств пород для разных направлений. В механике горных пород в основном рассматриваются два частных случая анизотропии [1]. В первом случае предполагается, что через каждую точку породного массива проходит поверхность изотропии и массив является трансверсально-изотропным. Во втором случае горный массив принимается квазиизотропным. Для оценки нарушенности горных пород применяются различные методы. Наряду с такими методами, как реометрический, ультразвуковой, радиометрический, электрометрический и др., применяется и сейсмический метод, в основе которого лежат зависимости кинетических и динамических параметров упругих волн от степени трещиноватости [12].

Уравнения равновесия, неразрывности деформаций и геометрические являются общими уравнениями механики деформируемого твердого тела независимо от физико-механических свойств тела. Общих уравнений недостаточно для исследования напряженно-деформированного состояния тела. Необходимы дополнительные уравнения, связывающие деформации с напряжениями, отражающие механические свойства определенных геомеханических моделей породных массивов. К линейно-деформируемому можно отнести также трещиноватые породные массивы [2].

Физические уравнения для трансверсально-изотропной модели породного массива, когда ось  $z$  перпендикулярна к плоскости изотропии ( $a_{11} = a_{22}$ ,  $a_{23} = a_{13}$ ,  $a_{55} = a_{44}$ ), могут быть представлены в виде [7]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z, & \gamma_{yz} &= a_{44}\tau_{yz}, \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{11}\sigma_y + a_{13}\sigma_z, & \gamma_{xz} &= a_{44}\tau_{xz}, \\ \varepsilon_z &= a_{13}(\sigma_x + \sigma_y) + a_{33}\sigma_z, & \gamma_{xy} &= a_{66}\tau_{xy}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$a_{66} = 1/G_{12} = 2(1+\nu)/E = 2(1/E + \nu/E) = 2(a_{11} - a_{12}),$$

$E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии  $oxy$ .

В случае плоской деформации, когда  $\gamma_{yz} = \gamma_{xz} = \varepsilon_z = 0$ , из (1) получим

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z, \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{11}\sigma_y + a_{13}\sigma_z,\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= a_{66}\tau_{xy} = 2(a_{11} - a_{12})\tau_{xy}, \\ \tau_{yz} = \tau_{xz} &= 0, \quad \sigma_z = -a_{13} / a_{33}(\sigma_x + \sigma_y).\end{aligned}\quad (3)$$

Внося (3) в (2), получаем

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \beta_{11}\sigma_x + \beta_{12}\sigma_y, \\ \varepsilon_y = \beta_{12}\sigma_x + \beta_{11}\sigma_y, \end{cases}\quad (4)$$

$$\gamma_{xy} = \beta_{66}\tau_{xy} = a_{66}\tau_{xy} = 2(a_{11} - a_{12})\tau_{xy},$$

$$\beta_{11} = a_{11} - a_{13}^2 / a_{33}, \quad \beta_{12} = a_{12} - a_{13}^2 / a_{33}.$$

Из решения (4) находим

$$\sigma_x = b_{11}\varepsilon_x + b_{12}\varepsilon_y, \quad \sigma_y = b_{12}\varepsilon_x + b_{11}\varepsilon_y, \quad \tau_{xy} = b_{66}\gamma_{xy},\quad (5)$$

где  $b_{11} = \beta_{11} / \beta_0^2$ ,  $b_{12} = \beta_{12} / \beta_0^2$ ,  $\beta_0^2 = \beta_{11}^2 - \beta_{12}^2$ ,  $b_{66} = 1 / \beta_{66} = 1 / 2(a_{11} - a_{12})$ .

Физические уравнения (1) можно также записать в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) - \frac{\nu_1}{E_1}\sigma_z, & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_1}\tau_{yz}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) - \frac{\nu_1}{E_1}\sigma_z, & \gamma_{xz} &= \frac{1}{G_1}\tau_{xz}, \\ \varepsilon_z &= \frac{-\nu_1}{E_1}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{E_1}\sigma_z, & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy},\end{aligned}\quad (6)$$

где  $E, \nu$  – модуль деформации и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии  $oxy$ ,  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона для деформации в плоскости изотропии при сжатии в направлении, нормальном плоскости  $oxy$ ,  $E_1, G_1$  – модули деформации и сдвига для направлений, нормальных к плоскости изотропии.

В случае плоской деформации в плоскости  $oyz$ , когда  $a \rightarrow \infty$  и  $\varepsilon_x = \gamma_{xz} = \gamma_{xy} = 0$ , из (6) находим

$$\sigma_x = \nu\sigma_y + \frac{\nu_1 E}{E_1}\sigma_z,\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E}\sigma_y - \frac{\nu}{E}\left(\nu\sigma_y + \frac{\nu_1 E}{E_1}\sigma_z\right) - \frac{\nu_1}{E_1}\sigma_z = \frac{1-\nu^2}{E}\sigma_y - \left(\frac{\nu\nu_1}{E_1} + \frac{\nu_1}{E_1}\right)\sigma_z = \\ &= \frac{1-\nu^2}{E}\sigma_y - \frac{\nu_1}{E_1}(1+\nu)\sigma_z,\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= -\frac{\nu_1}{E_1}\left(\nu\sigma_y + \frac{\nu_1 E}{E_1}\sigma_z\right) - \frac{\nu_1}{E_1}\sigma_y + \frac{1}{E_1}\sigma_z = -\left(\frac{\nu\nu_1}{E_1} + \frac{\nu_1}{E_1}\right)\sigma_y - \\ &-\left(\frac{\nu_1^2 E}{E_1^2} - \frac{1}{E_1}\right)\sigma_z = \frac{1}{E_1}\left(1 - \nu_1^2 \frac{E}{E_1}\right)\sigma_z - \frac{\nu_1}{E_1}(1+\nu)\sigma_y,\end{aligned}\quad (9)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_1}\tau_{yz}.\quad (10)$$

Компоненты напряжений выражаются через функцию напряжений

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}, \quad \sigma_z = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \tau_{yz} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z}. \quad (11)$$

Дважды продифференцировав (8) – (10), учитывая (11), из уравнения неразрывности деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}, \quad (12)$$

получим

$$\frac{1-\nu^2}{E} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial z^4} + \frac{1}{E_1} \left(1 - \nu_1^2 \frac{E}{E_1}\right) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} - \left[2 \frac{\nu_1}{E_1} (1+\nu) - \frac{1}{G_1}\right] \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^2 \partial z^2} = 0. \quad (13)$$

Полагая, что модуль деформации в плоскости изотропии больше, чем в перпендикулярных ей плоскостях ( $E_y > E_z$ ), характеристические уравнения для (13) представим в виде

$$\mu^4 + \frac{2b_{12} + b_{66}}{b_{22}} \mu^2 + \frac{b_{11}}{b_{22}} = 0 \quad (14)$$

здесь  $b_{11} = \frac{1-\nu^2}{E}$ ,  $b_{12} = -\frac{\nu_1}{E_1} (1+\nu)$ ,  $b_{22} = \frac{1}{E_1} \left(1 - \nu_1^2 \frac{E}{E_1}\right)$ ,  $b_{66} = \frac{1}{G_1}$ ,

откуда следует, что для решения (14) необходимы упругие постоянные  $E$ ,  $E_1$ ,  $G_1$ ,  $\nu$ , и  $\nu_1$ , т.е. всего пять параметров геомеханической модели породного массива. Предполагая, что корни (14) являются мнимыми, причем попарно сопряженными, примем  $\gamma = i\mu$  и уравнение (14) представим в виде

$$\gamma^4 - \frac{2b_{12} + b_{66}}{b_{22}} \gamma^2 + \frac{b_{11}}{b_{22}} = 0, \quad (15)$$

$$\gamma_{1,2} = \sqrt{\frac{2b_{12} + b_{66}}{b_{22}} \pm \sqrt{\left(\frac{2b_{12} + b_{66}}{b_{22}}\right)^2 - 4b_{11}/b_{22}}} / \sqrt{2}. \quad (16)$$

Модуль деформации в произвольной точке плоскости  $oyz$  выражается формулой [7]

$$E_\theta = \left[ \frac{\sin^4 \theta}{E_z} + \left( \frac{1}{G_1} - \frac{2\mu_{yz}}{E_z} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_y} \right]^{-1}, \quad \mu_{yz} = \frac{\nu_1 E}{E_1 (1-\nu)}, \quad (17)$$

где  $\theta$  – полярный угол, отсчитываемый от горизонтальной оси  $z$  в направлении против движения часовой стрелки. Корни  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  уравнения (15) имеют фундаментальное значение в решении задачи упругого пространства, находящегося в плоском деформированном состоянии, от действия единичных сил. Такие решения позволяют построить разрешающие граничные интегральные уравнения.

Пусть в неограниченном упругом теле действуют массовые силы  $X_i(x)$ , распределенные в ограниченной области  $\Omega_1$ . Действие этих сил вызывает де-

формацию тела, убывающую по мере удаления от области  $\Omega_1$  и принимающую в бесконечности нулевое значение. Система уравнений равновесия в плоскости  $oyz$  трансверсально-изотропного тела представляется в виде

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0. \quad (18)$$

Записав закон Гука в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= -\frac{\mu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z = \frac{1}{E_z} \sigma_z - \frac{\mu_{yz}}{E_y} \sigma_y, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_y} (\sigma_y - \mu_{yz} \sigma_z) = -\frac{\mu_{yz}}{E_y} \sigma_z + \frac{1}{E_y} \sigma_y, \end{aligned} \quad (19)$$

получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E_z}{1 - \bar{\mu}_{yz}^2} \varepsilon_z + \mu_{yz} \frac{E_z}{1 - \mu_{yz}^2} \varepsilon_y, \\ \sigma_y &= \mu_{yz} \frac{E_z}{1 - \bar{\mu}_{yz}^2} \varepsilon_z + \frac{E_y}{1 - \bar{\mu}_{yz}^2} \varepsilon_y, \end{aligned} \right\} \tau_{yz} = G_1 \gamma_{yz}, \quad (20)$$

$$\bar{\mu}_{yz}^2 = \mu_{yz}^2 \frac{E_z}{E_y}.$$

Геометрические уравнения записываются так:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}. \quad (21)$$

Представив (20) в (18), с учетом (21) получим

$$\left. \begin{aligned} b_{11} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + b_{12} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} + G_1 \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} + G_1 \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + X &= 0, \\ G_1 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + G_1 \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} + b_{12} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} + b_{22} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + Y &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где  $b_{11} = E_z / (1 - \bar{\mu}_{yz}^2)$ ,  $b_{12} = \mu_{yz} E_z / (1 - \bar{\mu}_{yz}^2)$ ,  $b_{22} = E_y / (1 - \bar{\mu}_{yz}^2)$ ,  $\bar{\mu}_{yz}^2 = \mu_{yz}^2 \frac{E_z}{E_y}$ .

В работе [3] решением Кельвина для плоской деформации получены фундаментальные решения, соответствующие частному решению (22). Используя эти фундаментальные решения, получим граничные интегральные уравнения для численного анализа плоской задачи теории упругости анизотропного тела. Проведя сплайновую аппроксимацию граничных параметров, систему интегральных уравнений преобразуем в систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij}^* u_j + \sum_{j=1}^n b_{ij} u_{yj} &= \sum_{j=1}^n e_{ij} P_{xj} + \sum_{j=1}^n f_{ij} P_{yj}, \\ \sum_{j=1}^n c_{ij} u_{xj} + \sum_{j=1}^n d_{ij}^* u_{yj} &= \sum_{j=1}^n g_{ij} P_{xj} + \sum_{j=1}^n h_{ij} P_{yj}. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь  $u_x, u_y$  – компоненты искомым перемещений на контуре отверстия;  $P_x, P_y$  – поверхностные напряжения;  $n$  – число граничных элементов. Коэффициенты при неизвестных и коэффициенты в правой части (23) выражаются в интегральной форме:

$$\begin{aligned}
 a_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) P_{xx}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, & b_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) P_{xy}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, \\
 c_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) P_{yx}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, & d_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) P_{yy}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, \\
 e_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) u_{xx}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, & f_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) u_{xy}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, \\
 g_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) u_{yx}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, & h_{ij} &= \int_{\xi_i} B_j(\xi) u_{yy}^*(\xi_i, \xi) J(\xi) d\xi, \\
 a_{ij}^* &= a_{ij} + c_{ij}^* \delta_{ij}, & d_{ij}^* &= d_{ij} + c_{ij}^* \delta_{ij},
 \end{aligned} \tag{24}$$

где  $B(\xi)$  – базисный  $B$  – сплайн;  $J(\xi)$  – якобиан параметрического представления. Коэффициенты (24) определяются численным интегрированием в пределах носителя базисного сплайна. Входящие в (24) функции  $P^*(\xi_i, \xi)$  и  $u(\xi_i, \xi)$  являются фундаментальными напряжениями и перемещениями. При заданных напряжениях на поверхности из решения (23) определяется вектор перемещений на контуре полости в анизотропной среде в условиях плоской деформации. Затем, используя геометрические уравнения, вычисляются относительные деформации, и на последнем этапе определяется вектор тангенциальных напряжений.

На основе предлагаемого алгоритма разработана программа и получены результаты концентрации напряжений в подземных сооружениях Рогунской ГЭС. Геометрия выработок подземных сооружений (машзал и помещение трансформаторов) приведена на рис. 1. Дискретная модель подземных сооружений состоит из 126 граничных элементов нулевого порядка. Инженерно-геологические условия участка гидроузла: грунты сложены песчаниками и алевролитами, слои которых наклонены под углом  $70-75^\circ$  от горизонта по часовой стрелке [4,11,6].

Для площадки строительства Рогунской ГЭС основанием и средой почти всех сооружений гидроузла являются песчаники и алевролиты с  $E = 2,6 \cdot 10^4 - 3,8 \cdot 10^4$  МПа [5]. Для трещиноватого горного массива механические характеристики определяются по методике [9]:

$$\begin{aligned}
 E_2 &= E_1 / (1 + \eta), & \eta &= \delta / h\xi, & G_{12} &= E_1 / 2(1 + \nu_1 + \eta), & E_3 &= E_1, \\
 \nu_{12} &= \nu_1 / (1 + \eta), & \nu_{32} &= \nu_{12}, & \nu_{23} &= (E_2 / E_3) \nu_{32}, & \nu_{31} &= (E_3 / E_1) \nu_{13} = \nu_{13},
 \end{aligned} \tag{25}$$

здесь  $E_1, \nu_1$  – модуль деформации и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии,  $h$  – расстояние между трещинами,  $\delta$  – ширина раскрытия трещины,  $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$  – постоянная величина. При заданных  $E_1, \nu_1, h, \delta$  из (25) получаем остальные параметры  $E_2, E_3 = E_1, G_{12}, \nu_{12} = 0.057, \nu_{13} = 0.2, \nu_{32}, \nu_{23}, \nu_{31} = \nu_{13}$ , которые необходимы для решения задачи в условиях плоской деформации.

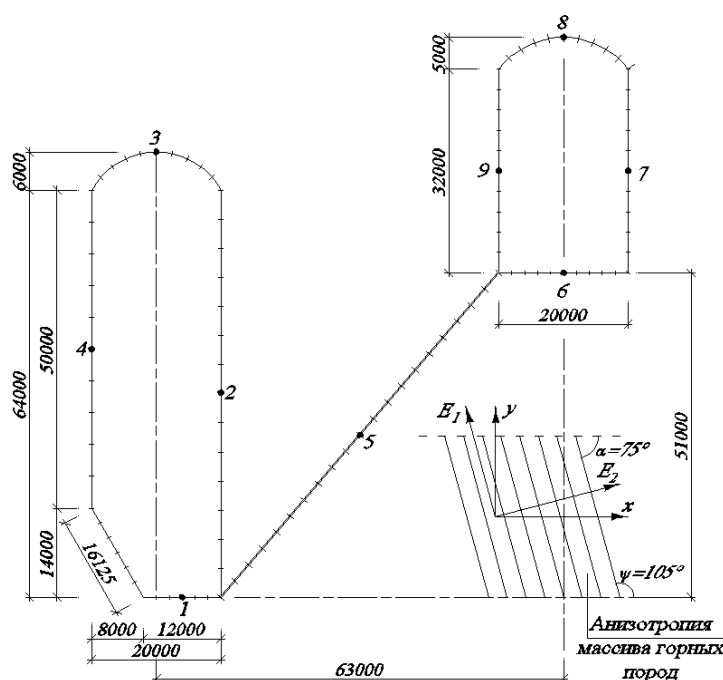


Рис. 1. Геометрия и схема разбивки контура подземных сооружений Рогунской ГЭС. Нумерация контрольных точек. Анизотропия массива горных пород.

Согласно [10], машзал и помещение трансформаторов располагаются в едином тектоническом блоке, где сжимающие горизонтальные и вертикальные напряжения соответственно равны  $\sigma_x^0 = -35$  МПа,  $\sigma_y^0 = -26$  МПа. На рис. 2 и 3 показаны эпюры нормальных перемещений ( $U_n$  считается положительным, если его направление совпадает с направлением внутренней нормали) и тангенциальных напряжений (растягивающее  $\sigma_s$  считается положительным) на контуре подземных сооружений.

Для сравнения результатов напряженно-деформированного состояния контуров подземных сооружений Рогунской ГЭС при различных расположениях пластов горных пород и для изотропной модели в таблице приведены значения тангенциальных напряжений и нормальных перемещений контрольных точек. В таблице приведены значения напряжений и перемещений только для контрольных точек и эти значения могут не совпадать с экспериментальными значениями, которые получены при вычислениях и далее приведены для сравнения. Нумерация контрольных точек согласно рис. 1.

В таблице приведены значения тангенциальных напряжений  $\sigma_s$  в [МПа] и нормальные перемещения  $U_n$  в [см] контрольных точек контуров подземных сооружений Рогунской ГЭС, при следующих данных:  $E = 3.8 \cdot 10^4$  МПа-модуль деформации материала среды в направлении напластования;  $\nu_1 = 0,3$  - коэффициент поперечной деформации материала среды в направлении напластования;  $h = 40$  см-толщина ненарушенного слоя;  $\delta = 0,03$  см-ширина раскрытия трещин ( $h$  и  $\delta$ -параметры трещин). Остальные необходимые параметры определяются по формуле (25).

Для случая квазиизотропной модели геосреды с модулем деформации  $E = 9000$  МПа,  $\nu = 0,3$  от действия тектонических напряжений  $\sigma_x^0 = -35$  МПа,  $\sigma_y^0 = -26$  МПа эпюры  $U_n$  и  $\sigma_s$  приведены на рис. 2 и 3.

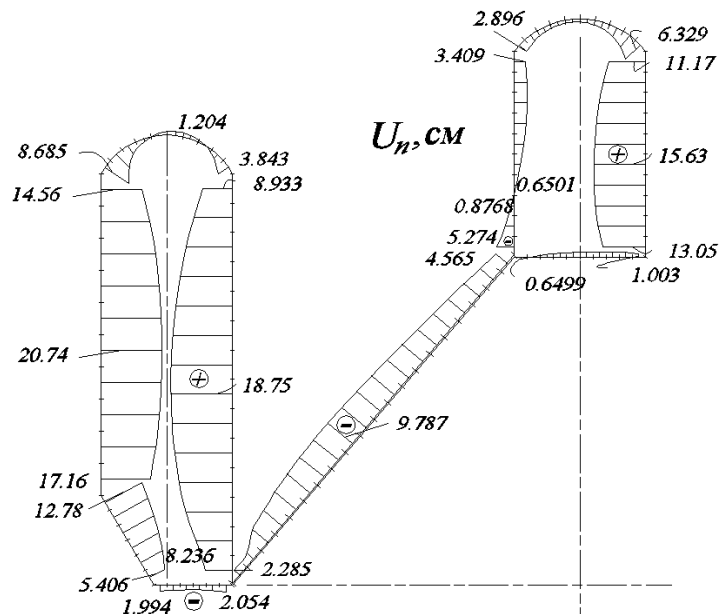


Рис. 2. Эпюра нормальных перемещений при расположении пластов под углом  $75^\circ$  от горизонтали по ходу часовой стрелки

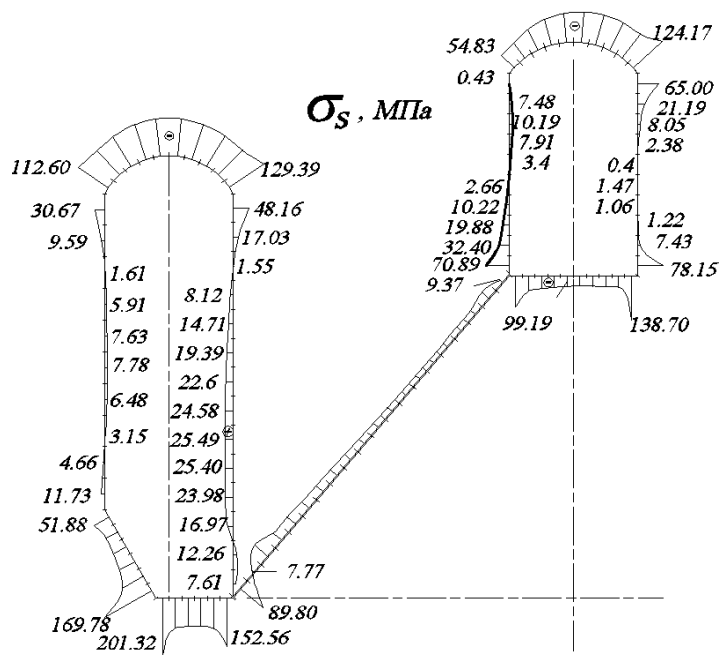


Рис. 3. Эпюра тангенциальных напряжений при расположении пластов под углом  $75^\circ$  от горизонтали по ходу часовой стрелки

Сравнение результатов показывает, что максимальное нормальное перемещение  $U_n = 26,93$  см возникает в случае квазиизотропной среды примерно в середине левой стены машзала. Из трех рассмотренных случаев анизотропии наибольшее значение нормальных перемещений соответствует вертикальному расположению пластов, где  $U_n = 22,05$  см возникает также в середине левой стены машзала.

Таблица

Тангенциальные напряжения  $\sigma_s$  и нормальные перемещения  $U_n$  контрольных точек контуров подземных сооружений Рогунской ГЭС.

Напряжение и перемещение	Контрольные точки	Расположение пластов горных пород			Квази-изотропия
		$\psi = 0^\circ$	$\psi = 90^\circ$	$\psi = 105^\circ$	
$\sigma_s$ , МПа	1	-82.7	-93.75	-86.9	-77.93
	2	-12.7	31.75	23.66	7.8
	3	-156	-128.3	-118.99	-117.83
	4	-20.5	12.3	-7.8	-2.03
	5	-29.27	-23.35	-24.62	-21.72
	6	-9.4	-37.69	-32.94	-21.25
	7	-24.5	5.26	0.4	-7.5
	8	-14.92	-104.8	-94.03	-94.87
	9	-19.7	5.08	0.8	-5.4
$U_n$ , см	1	1.48	-1.55	-1.4	0.9
	2	9.477	19.89	18.75	19.6
	3	1.9	-1.2	-1.2	1.3
	4	9.5	22.05	18.47	19.67
	5	-4.56	-9.96	-9.78	-14.99
	6	4.04	1.33	1.55	4.47
	7	7.46	16.7	15.55	20.57
	8	2.7	0.5	0.9	4.59
	9	1.43	2.69	2.45	2.99

Следует отметить, что изменение нормальных перемещений по высоте левой стены помещения трансформаторов имеет знакопеременный характер. Конвергенция стен машзала имеет максимальное значение более 51 см при квазиизотропной модели массива (рис. 2). Знакопеременный характер изменения нормальных перемещений также наблюдается на подошве помещения трансформаторов при вертикальном и наклонном расположении пластов, а также при квазиизотропии.

Знакопеременный характер изменения  $U_n$  также наблюдается на кровле машзала при вертикальном и наклонном расположении пластов.

Анализ результатов концентрации тангенциальных напряжений показывает, что максимальное растягивающее напряжение возникает примерно в середине правой стены машзала ( $\sigma_s = 33$  МПа), а при наклонном расположении пластов -  $\sigma_s = 25$  МПа.

Концентрация напряжений наблюдается в угловых зонах, где резко возрастают значения тангенциальных напряжений, что свидетельствует об особенностях прямого угла. В угловых точках напряжения  $\sigma_s$  стремится к бесконечности



[8], а максимальные сжимающие напряжения возникают в ключевой точке арки машзала при горизонтальном расположении пластов ( $\sigma_s = -150$  МПа).

При наклонном расположении пластов в середине кровли машзала  $\sigma_s = -118$  МПа.

Из анализа результатов, приведенных в таблице, следует, что наибольшие напряжения возникают в точках 3 и 8, соответствующих середине кровли машзала и помещения трансформаторов.

Из таблицы следует, что анизотропия механических характеристик горных пород значительно влияют на напряженно-деформированное состояние контуров подземных сооружений.

При горизонтальном расположении пластов горных пород нормальные перемещения точек стен более два раза уменьшаются чем, при их вертикальном расположении.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 272 с.
2. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механические процессы в породных массивах. М.: Недра, 1986. – 272 с.
3. *Бреббия К., Телес Ж., Врубел Л.* Методы граничных элементов. – М.: «Мир», 1987. – 524 с.
4. *Гуртовик Ф.И., Золотов О.Н., Куперман В.Л., Мостков В.М., Осадчий Л.Г.* Оценка современного состояния строящегося подземного машинного зала Рогунской ГЭС// Гидротехническое строительство. – 1992, №3, с. 22-26.
5. *Количко А.В.* Инженерно-геологические условия строительства плотины Рогунской ГЭС// Гидротехническое строительство. – 1981, №10, с. 11-15.
6. *Количко А.В.* Современное состояние подземного машзала Рогунской ГЭС// Гидротехническое строительство. – 2002, №4, с. 35-39.
7. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1974, 415 с.
8. *Низомов Д.Н.* Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 282 с.
9. *Руппенейт К.В.* Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: «Недра», 1975. – 223 с.
10. *Семенов И.В., Горбов В.А.* Исследование подземных выработок напорно-стационарного узла Рогунской ГЭС на сейсмические воздействия// ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Л., 1982.
11. *Сироджеев Б.С., Петров В.И., Старков В.И., Ицук А.Р., Шварц А.В.* Землетрясение 15 июня 1995 г. в районе строительства Рогунской ГЭС. – Душанбе, «Дониш», 1997. – 54 с.
12. *Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах.* – Л.: Наука, 1978. – 229 с.

#### **DISPLACEMENTS AND STRAINS OF COUNTOURS OF THE UNDERGROUND STRUCTURES IN CRACKED ROCK MASSIF**

J.N. Nizomov, A.A. Hojiboev, O.A. Hojiboev

Problems of strain concentration and distribution of displacements around the contour of underground structures which are located in anisotropic and transverse isotropic rock massif are solved with numerical solution based on boundary integral equations.

KEY WORDS: fissured massif, underground structures, anisotropy, transversely isotropic massif, quasi-isotropic massif.