

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ПРОЦЕССЕ ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ

Лидия Николаевна Гахова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: gahoval@mail.ru

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния вмещающего массива в окрестности машинного зала и помещения трансформаторов Рогунской ГЭС, выполненного с использованием метода граничных интегральных уравнений для модели линейно-деформируемой квазиизотропной среды слоистого породного массива, установлены характер, закономерности и особенности распределения напряженно-деформированного состояния вмещающего массива. Дана оценка влияния поэтапного раскрытия полного поперечного сечения машинного зала на изменение упругой конвергенции «дно машинного зала – свод» и формирование зон неупругого деформирования вблизи его контура.

Ключевые слова: численное моделирование, напряженное состояние, смещения, неупругое деформирование.

SPECIFICS OF FORMING OF STRESS BEHAVIOR OF CONTAINING BLOCK OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS OF HYDROTECHNICAL COMPLEX IN PROCESS OF ITS ERACTION

Lidiya N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Senior Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, e-mail: gahoval@mail.ru

On the results of numerical simulation of stress-strain behavior of containing block near machinery hall and transformer room of Rogunskaya Hydro Power Plant carried out using method of finite integral equations for model of linear deformable quasi-isotropic surrounding of laminated rock solid the character, regularities and specifics of stress behavior distribution of containing block are established. The estimation of impact of gradual revelation of full cross section of machinery hall on changing of elastic convergence “machinery hall bottom – cope” and forming of nonelastic deformation zones near its contour is given.

Key words: numerical simulation, stress behavior, displacements, nonelastic deformation.

Один из основных факторов, влияющих на устойчивость подземных сооружений гидротехнических комплексов – последовательность формирования выработанного пространства во вмещающем массиве, определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в окрестности сооружений. Роль напряженного состояния массива существенно возрастает при размещении подземных сооружений на больших глубинах, когда величины напряжений сопоставимы или превышают прочность горных пород. В таких условиях при-

менение классификационных систем оценки состояния сооружений [1–3], основанных на анализе механических свойств горного массива, может оказаться неэффективным. В этой связи для решения вопросов об устойчивости подземных сооружений широкое развитие получили численные и экспериментально-аналитические методы исследований [3–5], позволяющие учитывать изменение НДС в окрестности сооружений в процессе поэтапного их возведения. Надежную оценку и более достоверный прогноз устойчивости конструктивных элементов подземных сооружений позволяют получить методы численного моделирования НДС массива горных пород в комплексе с результатами натуральных наблюдений за деформированием приконтурного массива [5].

В настоящей работе приводятся результаты анализа изменения геомеханической ситуации в окрестности машинного зала (длиной 220 м, шириной 22 м, высотой 78 м) в условиях Рогунской ГЭС при поэтапном раскрытии его поперечного сечения. Подземный машинный зал размещается в горном массиве на глубине 350 м в левом берегу реки Вахш [6, 7]. Предполагается, что на первом этапе сформирован свод и открыта 1/3 часть поперечного сечения машинного зала; второй этап – 2/3 поперечного сечения; третий этап – сечение открыто полностью. Предполагается, что поперечное сечение помещения трансформаторов, размещение которого оказывает влияние на НДС массива, вмещающего машинный зал, полностью сформировано.

Грунты на участке здания ГЭС сложены переслаивающимися песчаниками и алевролитами. По данным [7] слои горного массива наклонены под углом 70–75° к горизонту. Песчаники и алевролиты являются крепкими скальными породами: предел прочности на одноосное сжатие песчаников $\sigma_{сж}$ 100–200 МПа; алевролитов – 60–80 МПа [6].

В модели линейно-деформируемой среды для слоистых пород массив принимается квазиизотропным; на границах слоев отсутствует проскальзывание и имеет место жесткое сцепление. В [8] было показано, что характер распределения тангенциальных напряжений на контуре машинного зала, вычисленных в предположении, что массив квазиизотропен, аналогичен результатами, полученными с использованием трансверсально-изотропной моделью массива [6].

Задачи решались методом граничных интегральных уравнений [4, 8]. Соотношение геометрических размеров машинного зала позволяет решать задачу о НДС вмещающего массива в плоской постановке.

Для численных расчетов НДС конструктивных элементов машинного зала согласно [7] приняты: модуль упругости $E = 3.5 - 4.5 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.26$; сцепление $C = 0.41 - 0.7$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 35^\circ$. Параметры естественного поля напряжений согласно [6]: $\sigma_x^0 = -35$ МПа, $\sigma_y^0 = -26$ МПа. Интерпретация результатов расчетов проводится по численным значениям компонент тензора напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) и напряжений σ_s , позволяющих для определения потенциальных зон запредельного деформирования горных пород воспользоваться критерием разрушения Кулона-Мора [3, 4]:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ – главные напряжения; φ – угол внутреннего трения.

Рис. 1 отражает формирование горизонтальных σ_x (рис. 1, а) и вертикальных σ_y (рис. 1, б) напряжений на первом этапе раскрытия поперечного сечения машинного зала. В таблице – максимальные и минимальные значения σ_x и σ_y на контуре отработанного пространства в кровле, днище и на боковых поверхностях помещения машинного зала на трех этапах его формирования. Характер упругих смещений при полном раскрытии поперечного сечения на этапе III представлен на рис. 2. На рис. 3 – развитие зон неупругих деформаций во вмещающем массиве в процессе раскрытия поперечного сечения машинного зала: темный цвет – в относительно крепких породах; серый цвет – в слабо нарушенных породах.

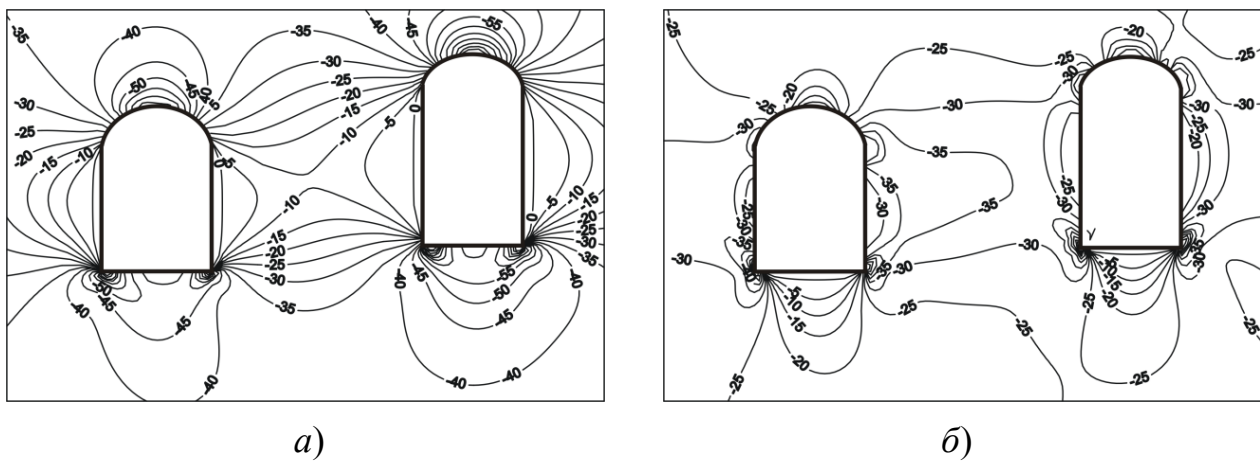


Рис. 1

Напряженное состояние вмещающего массива на контуре машинного зала

Этап отработки	Конструктивный элемент	σ_x , МПа	σ_y , МПа
I	Дно машинного зала	-40	0
	Правая боковая поверхность	0	-25
	Свод машинного зала	-88	0
	Левая боковая поверхность	0	-27
II	Дно машинного зала	-62	0
	Правая боковая поверхность	0	-16
	Свод машинного зала	-108	0
	Левая боковая поверхность	0	-12
III	Дно машинного зала	-105	0
	Правая боковая поверхность	0	3,5
	Свод машинного зала	-126	0
	Левая боковая поверхность	0	-5

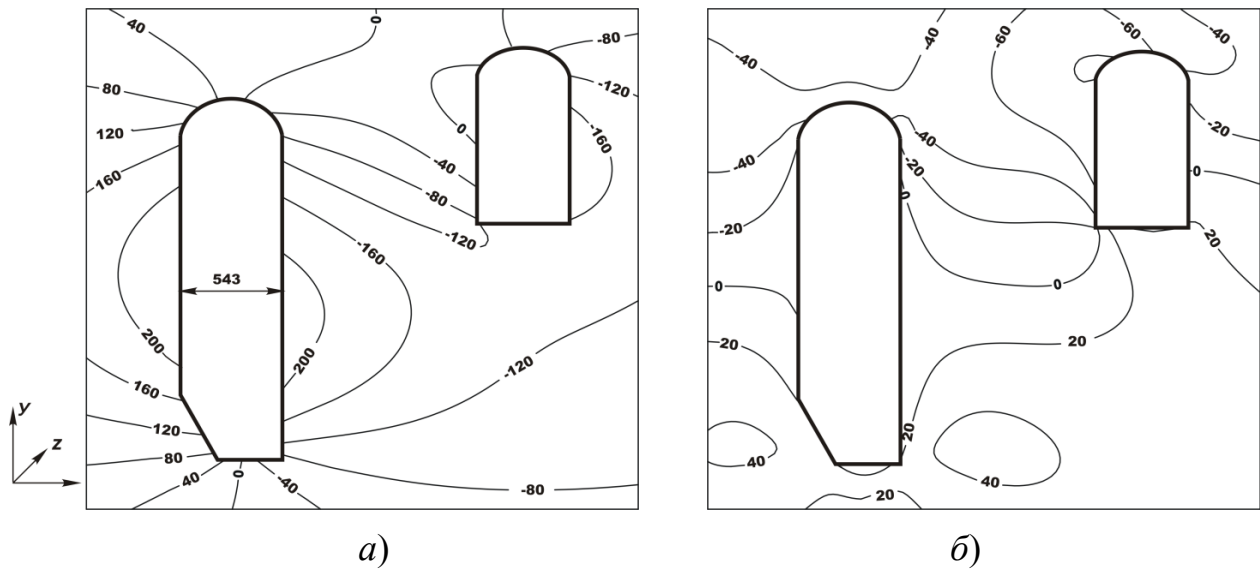


Рис. 2

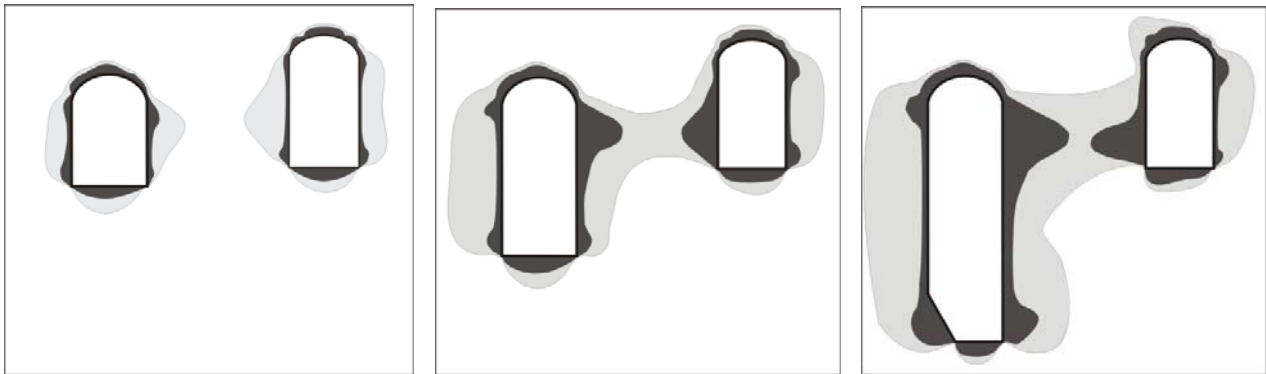


Рис. 3

Приведенные результаты свидетельствуют о следующем:

- напряженное состояние вмещающего массива в окрестности машинного зала характеризуется концентрацией сжимающих горизонтальных напряжений σ_x в кровле и подошве (рис. 2, а), а также концентрацией вертикальных напряжений σ_y в угловых зонах приконтурного массива. На I этапе раскрытия поперечного сечения машинного зала в зонах концентрации напряжения сопоставимы с пределом прочности горных пород на одноосное сжатие (рис. 1); на III этапе σ_x и σ_y превышают $\sigma_{с.ж}$ на 30 – 50% (таблица);

- боковые поверхности машинного зала разгружены от действия напряжений нетронутого массива (рис. 1, таблица): на правой боковой поверхности (со стороны помещения трансформаторов) на третьем этапе вертикальные напряжения переходят в растягивающие (до 3, 5 МПа). Сжимающие σ_y изменяются на левой боковой поверхности от -27 (на I этапе) до -5 МПа на завершающем этапе (таблица);

- упругая конвергенция боковых поверхностей машинного зала возрастают в процессе раскрытия полного поперечного сечения с 280 мм до 543 мм – на (рис. 2); упругая конвергенция «дно машинного зала – свод» не превышает 50 мм;

- зоны неупругих деформаций на первом этапе раскрытия поперечного сечения в крепких породах удалены вглубь массива на 1–2,5 м, в нарушенных массивах – до 5–6 м (рис. 3). Дальнейшее раскрытие поперечного сечения машинного зала приводит к формированию в целике между машинным залом и трансформаторным помещением зон неупругих деформаций, практически смыкающихся в верхней части вмещающего машинный зал массива с зонами σ_s , формирующимися в нижней части массива, вмещающего помещение трансформаторов. Вблизи боковых поверхностей области неупругих деформаций удалены вглубь массива в крепких породах – до 1,5–3 м; в кровле по мере раскрытия поперечного сечения машинного зала σ_s изменяются незначительно.

Заключение

Установлены особенности распределения напряжений во вмещающем машинный зал и помещение трансформаторов массиве: вблизи боковых поверхностей машинного зала приконтурный массив разгружен от действия напряжений нетронутого массива. На завершающем этапе формирования поперечного сечения в зонах концентрации напряжения σ_x и σ_y превышают $\sigma_{сж}$ на 30 – 50%. С использованием критерия Кулона-Мора определены параметры зон неупругого деформирования на трех этапах раскрытия поперечного сечения машинного зала. Максимальные упругие смещения контура машинного зала – на боковых поверхностях (конвергенция на III этапе достигает 543 мм).

Результаты расчетов, выполненных с использованием МГИУ для кусочно-однородных областей, свидетельствуют о возможности его привлечения в качестве расчетного аппарата при оценке НДС вмещающего массива подземных сооружений Рогунской ГЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barton N. Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses. Workshop on Norwegian Method of Tunneling. – New Delhi, 1993. – pp. 66–84.
2. Mathews K.N., Hoek E., Wyllie D.C. and Stewart S.B.V. (1980). Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1,000 meters in hard rock. Golder Associates Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CAANMET), Department of Energy and Resources, Ottawa, Canada.
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Недра. – М. – 1989.
4. Гахова Л.Н. Решение задач теории упругости слоистого массива в плоской и трехмерной постановках методом граничных интегральных уравнений / Труды XX конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли»: Новосибирск, ИГД СО РАН, 2013.
5. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. – Новосибирск. – 2012. – № 4.

6. Назиров Д.А., Давлатшоев С.К. Исследование упругих, деформационных и прочностных характеристик вмещающего массива камерных выработок Рогунской ГЭС лабораторными и геофизическими методами // Строительство и архитектура. – М. – 2017. – № 4.

7. Низомов Д.Н., Ходжибоев А.А., Ходжибоев О.А. Трансверсально-изотропная модель массива пород подземных сооружений Рогунской ГЭС // Доклады Академии наук республики Таджикистан. – Душанбе. – 2011. – том 54, № 5.

8. Гахова Л.Н. К вопросу формирования напряженно-деформированного состояния вмещающего массива подземных сооружений гидротехнического комплекса // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2018. – №5 – Т.2. – С. 30–34.

© Л. Н. Гахова, 2019