



**ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ОБДЕЛКИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНОГО
МАШИННОГО ЗАЛА ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Н. М. Абдуллоев³, Д. В. Барышников¹, Л. Н. Гахова^{1,2}, А. П. Хмелинин¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СОРАН,*

E-mail: gahoval@mail.ru, Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия,

²*Саяно-Шушенский филиал СФУ, п. Черемушки 15, г. Саяногорск 665619, Россия*

³*Рогунская ГЭС, E-mail: n_abdullov@mail.ru, Республика Таджикистан*

Приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и обделки подземного машинного зала Рогунской ГЭС, размещенного в горном массиве на больших глубинах, выполненного с использованием метода граничных интегральных уравнений для модели линейно-деформируемой квазиизотропной среды. Установлен характер и особенности формирования зон неупругого деформирования вблизи контура поперечного сечения машинного зала и закономерности распределения напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и обделки.

Подземное сооружение гидротехнического комплекса, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, конвергенция

**FORMING THE STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS AND LINING
WHEN CONSTRUCTING UNDERGROUND TURBINE HALL
OF HYDROPOWER PLANT**

N. M. Abdulloev¹, D. V. Baryshnikov², L. N. Gakhova^{2,3}, and A. P. Khmelinin²

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,*

E-mail: gahoval@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia,

²*Sayano-Shushensk Branch of Siberian Federal University,*

pos. Cheremushki 15, Sayanogorsk 665619, Russia

³*Rogun Hydropower Plant, E-mail: n_abdullov@mail.ru, Republic of Tadzhikistan*

Numerical modeling was performed for stress-strain state of the rock mass and lining of underground turbine hall of Rogun hydropower plant. The hall is located in a rock mass at great depths. Numerical modeling was conducted using the method of boundary integral equations based on the model of linearly elastic quasi-isotropic medium. The character and features of forming inelastic deformation zones near the contour of turbine hall cross-section are found. The regularities of distribution of rock mass and lining stress-strain state are determined as well.

Underground structure of hydropower plant, numerical modeling, stress-strain state, convergence

При размещении сооружений гидротехнического комплекса в подземных условиях определяющим факторами устойчивости их конструкций являются действующее во вмещающем массиве напряженно-деформированное состояние (НДС), роль которого существенно возрастает на больших глубинах. Для оценки устойчивости подземных сооружений необходим учет особенностей формирования НДС в их приконтурной зоне. Надежные оценки и прогноз состояния конструктивных элементов гидротехнических сооружений как в процессе их возведения, так и в процессе эксплуатации позволяют получить методы численного моделирования НДС в комплексе с натурными исследованиями деформационных процессов в окрестности подземных сооружений [1, 2].

Подземные сооружения каменно-набросной плотины Рогунской ГЭС (рис. 1) — машинный зал и помещение трансформаторов — размещены в массиве горных пород на глубинах 350–420 м. Строительство подземных сооружений вызывает нарушение существующего в массиве горных пород равновесия, вследствие чего в окрестности обнажений происходит деформирование и разрушение пород. Устойчивость подземных сооружений может обеспечить обделка (крепление), препятствующая деформациям и обрушению пород на обнажениях. Взаимодействие обделки с массивом горных пород приводит к установлению нового состояния равновесия. Для обеспечения устойчивого состояния сооружений гидротехнического комплекса, размещенного в подземных условиях на больших глубинах, вопрос оценки напряженно-деформированного состояния элементов обделки и массива горных пород является определяющим.



Рис. 1. Рогунская ГЭС на р. Вахш

В настоящей работе на примере Рогунской ГЭС для конструктивных элементов подземных сооружений представлен анализ взаимодействия обделки и вмещающего массива для получения параметров, необходимых при оценке развития процесса сближений боковых поверхностей и обделки машинного зала. Так как расположение трансформаторов вблизи машинного зала оказывает влияние на НДС вмещающего массива, расчеты выполнялись с учетом полностью сформированного поперечного сечения помещения трансформаторов.

Анализ результатов численного моделирования НДС вмещающего массива в окрестности машинного зала Рогунской ГЭС свидетельствует об образовании вблизи его боковых поверхностей зон неупругих деформаций (рис. 2), удаленных вглубь массива даже на начальной стадии раскрытия поперечного сечения машинного зала в крепких породах до глубин 1–2.5 м, в нарушенных — до 5–6 м (рис. 2а). На завершающей стадии раскрытия поперечного сечения зоны неупругих деформаций практически смыкаются с зонами, образованными в приконтурном массиве помещения трансформаторов (рис. 2б). В этой связи необходим анализ изменений способности обделки препятствовать обрушению пород (несущей способности), которая должна сохраняться на всем протяжении эксплуатации сооружения.

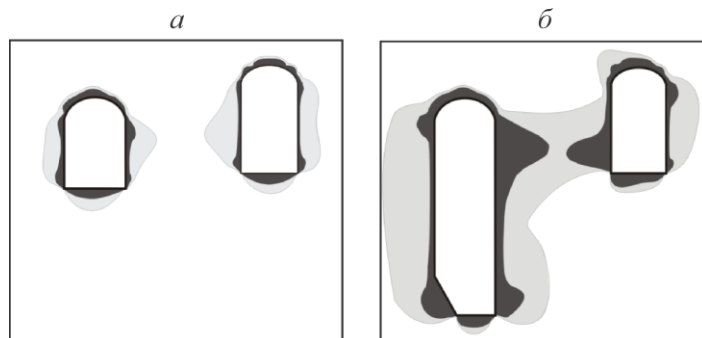


Рис. 2. Зоны неупругих деформаций в нарушенных (серый цвет) и слабо нарушенных (темный цвет) породах при раскрытии поперечного сечения машинного зала на 1/3 высоты (а) и при полном раскрытии (б)

В большинстве работ [3–8] вмещающий массив и материал обделки представляются упругими изотропными материалами. Величины возникающих на контакте обделки и вмещающего массива напряжений и деформаций зависят от технологии ее возведения, физико-механических свойств горного массива и обделки, начального напряженного состояния горных пород [4, 6, 7].

Выполнен анализ НДС вмещающего массива и элементов обделки машинного зала Рогунской ГЭС, размещенного в скальном массиве горных пород, который сложен переслаивающимися песчаниками и алевролитами, являющимися крепкими скальными породами с пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ 100–200 МПа (песчаники) и 60–80 МПа (алевролиты) [9].

В используемой модели линейно-деформируемой среды вмещающий слоистый породный массив принимается квазиизотропным [1]. Предполагается, что обделка полностью контактирует с вмещающим массивом по всему внешнему контуру (рис. 3), т. е. на линии контакта выполняется условие непрерывности векторов полных напряжений и смещений [1].

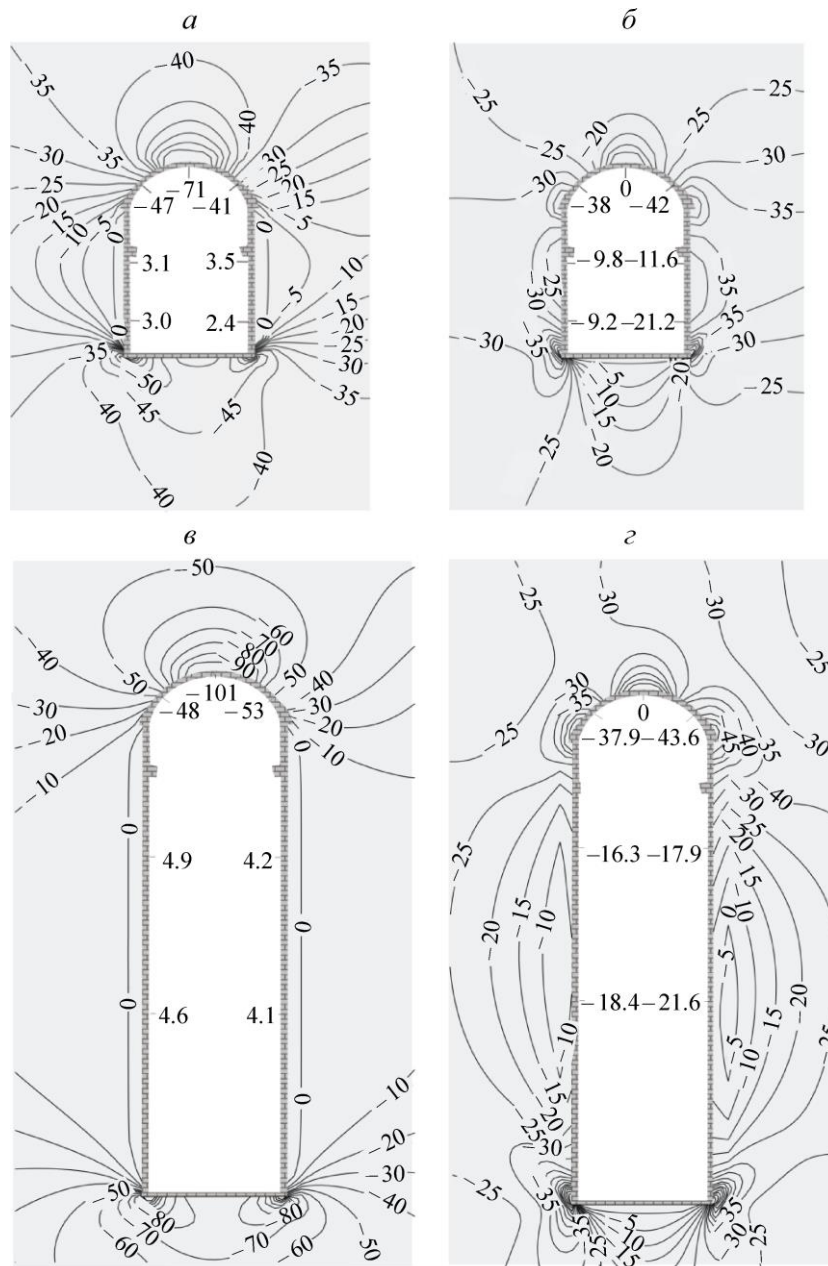


Рис. 3. Горизонтальные σ_x (а, в) и вертикальные σ_y (б, г) компоненты тензора напряжений (МПа) вмещающего массива и обделки после частичного (а, б) и полного (в, г) раскрытия поперечного сечения машинного зала

Задачи решались методом граничных интегральных уравнений для кусочно-однородных сред [1, 2, 10] в плоской постановке, так как соотношение геометрических размеров машинного зала позволяет решать задачу о НДС вмещающего массива и обделки в условиях плоской деформации. Для расчетов НДС конструктивных элементов подземных сооружений приняты [9]: коэффициент Пуассона $\nu = 0.26$, модуль деформации $E = 3.5 - 4.5 \cdot 10^4$ МПа, сцепление массива $C = 0.41 - 0.7$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 35^\circ$. Параметры естественного поля напряжений [11]: $\sigma_{x0} = -35$ МПа, $\sigma_{y0} = -26$ МПа. Толщина обделки по всей поверхности подземного сооружения принималась равной 1 м; материал обделки — бетон с коэффициентом Пуассона $\nu = 0.25$ и модулем деформации $E = 3 \cdot 10^4$ МПа. Результаты расчетов в виде численных значений компонент тензора напряжений (σ_x , σ_y , τ_{xy}) и нормальных тангенциальных напряжений σ_θ используются для анализа несущей способности обделки в нормативных документах [5, 6].

О характере формирования НДС вмещающего массива в окрестности машинного зала и обделки при частичном и полном раскрытии его поперечного сечения свидетельствуют результаты, представленные на рис. 3. Значения компонент напряжений σ_x , σ_y на поверхности обделки показаны вдоль ее внутреннего контура.

На рис. 4 приведены эпюры тангенциальных нормальных напряжений в конструктивных элементах обделки на завершающей стадии возведения машинного зала (рис. 4а, б). В кровле и почве вмещающего массива в окрестности машинного зала формируются зоны концентрации σ_x , σ_y (рис. 3). Следствием высоких горизонтальных напряжений в своде машинного зала и вертикальных напряжений в его боках являются высокие напряжения в обделке свода (до 100 МПа на завершающей стадии строительства машинного зала).

Как и во вмещающем массиве, в кровле обделки — наибольшие сжимающие σ_θ , причем на внутренней поверхности обделки в своде сжимающие σ_θ больше, чем на внешней (рис. 4). Так как предполагалось, что бетон обделки не армирован, то максимальные значения сжимающих σ_θ значительно превышают сопротивление бетона сжатию. Боковые внутренние поверхности обделки разгружены от действия σ_θ и при полном раскрытии поперечного сечения переходят в растяжение (рис. 4б).

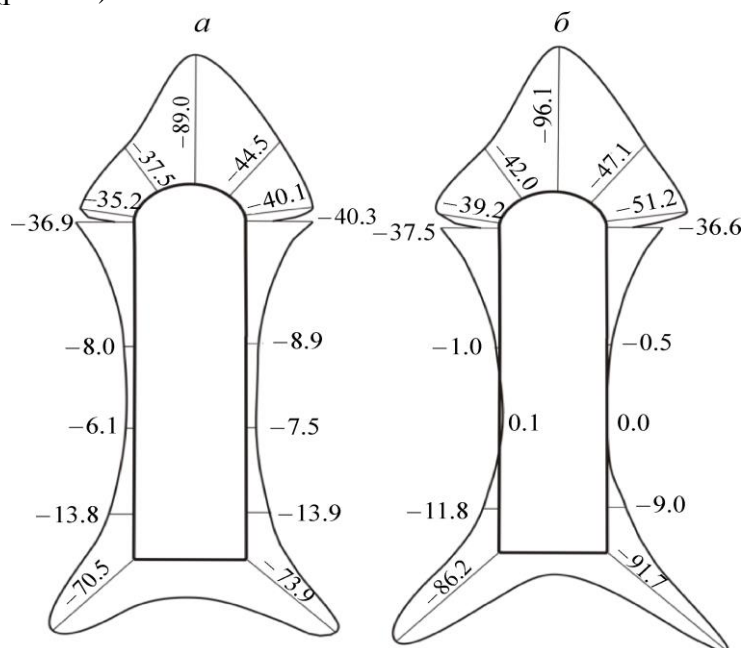


Рис. 4. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений σ_θ (МПа) на наружной (а) и внутренней (б) поверхности обделки после полного открытия поперечного сечения машинного зала

Упругая конвергенция боковых поверхностей во вмещающем массиве в окрестности машинного зала при его ширине 22 м составляет 543 мм (рис. 5), с учетом обделки при ширине машинного зала 20 м — 448 мм, при этом смещения контура боковой поверхности (U_x , мм), удаленной от помещения трансформаторов, более существенны, чем вблизи него (во вмещающем массиве 292 и 251 мм соответственно). Для сравнения, конвергенция стенок машинного зала, полученная для трансверсально-изотропной модели вмещающего массива — 435 мм (234 и 201 мм) [11].

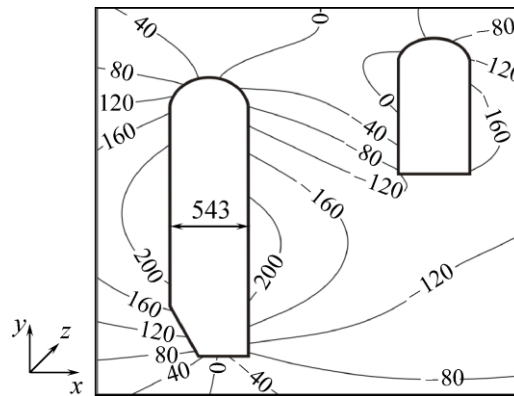


Рис. 5. Упругие смещения (мм) в горизонтальном U_x направлении после полного раскрытия поперечного сечения машинного зала

Оценка длительности периода безопасной эксплуатации подземных сооружений связана с прогнозом развития процесса конвергенции (сближения) его боковых поверхностей. С этой целью исследована функция изменения конвергенции со временем. Незатухающий процесс релаксации горного массива при неизменных внешних условиях описывается, как правило, логарифмической функцией [12]

$$y(t) = a \ln(t + b) + c, \quad (1)$$

где a , b , c — коэффициенты, определяемые в процессе интерполяции данной функцией результатов наблюдений методом наименьших квадратов. Для затухающего процесса релаксации используется экспоненциальная функция [12]

$$y(t) = a_1(1 - e^{-a_2 t}), \quad (2)$$

где a_1 , a_2 — коэффициенты, вычисляемые в процессе интерполяции результатов наблюдений экспоненциальной функцией методом наименьших квадратов.

На рис. 6 представлены результаты экстраполяции наблюдаемых приращений конвергенции в створе 4 машинного зала Рогунской ГЭС. Применение функции (1), отражающей незатухающий процесс, показало, что до 2016 г. данные наблюдений конвергенции интерполируются с точностью $\pm 3 \div \pm 6$ мм (среднеквадратическое отклонение); к концу 2018 г. ошибка интерполяции достигает 9 мм. Среднеквадратическое отклонение при интерполяции функцией (2), отражающей затухающий процесс, превосходит 16–20 мм.

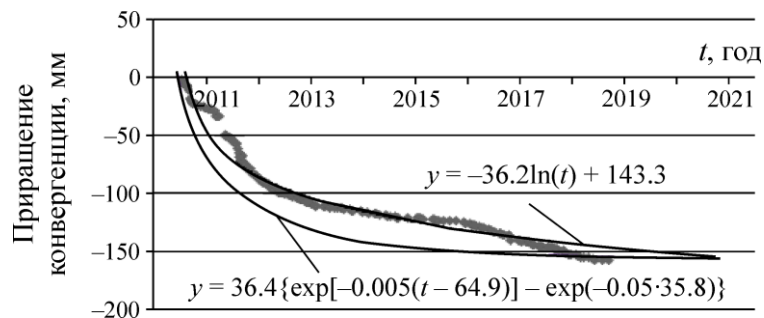


Рис. 6. Результаты экстраполяции приращений конвергенции в створе 4 затухающей и незатухающей функциями

Таким образом, по результатам экстраполяции можно говорить о незатухающем характере процесса сближения стен машинного зала в районе створа 4, что свидетельствует о проявлении реологических свойств горных пород и обделки. При отсутствии информации о реологических свойствах пород можно использовать подход, сформулированный в [6] и позволяющий с учетом полученных по СНиП [5] предельных значений напряжений определить несущую способность обделки, а по приращению конвергенции за год вычислить срок безаварийной эксплуатации подземных сооружений.

ВЫВОДЫ

Для условий подземных сооружений Рогунской ГЭС по результатам численного моделирования с помощью квазиизотропной модели массива установлены особенности распределения НДС во вмещающем массиве и обделке машинного зала. В обделке свода на его внутренней поверхности нормальные тангенциальные напряжения могут превысить предел прочности вмещающего массива на одноосное сжатие. Боковые поверхности машинного зала разгружены от действия напряжений нетронутого массива. В средней части боковых поверхностей обделки на завершающей стадии строительства машинного зала действуют горизонтальные растягивающие напряжения. Оценка приращений конвергенции боковых поверхностей машинного зала показала, что в районе створа 4 процесс сближения его боковых поверхностей на конец 2018 г. имеет незатухающий характер, что свидетельствует о проявлении реологических свойств горных пород и обделки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Gakhova L. N. and Abdulloev N. M.** Forming the stress-strain state of rock mass of Rogunskaya hydroelectric power station underground constructions, Hydroelectric power stations in XXI century, Proceedings of V All-Russian scientific and practical conference, 2018, pp. 16–23 (in Russian) [**Гахова Л. Н., Абдуллоев Н. М.** Формирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива подземных сооружений Рогунской ГЭС // Гидроэлектростанция в XXI веке: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. — 2018. — С. 16–23.]
2. **Kurlenya M. V., Baryshnikov V. D., and Gakhova L. N.** Experimental and analytical method for assessing stability of slopes, Journal of Mining Science, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 609–615. [**Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — Новосибирск. — 2012. — № 4. — С. 20–28.]
3. **Bulychev N. S.** Mechanics of Underground Structures, Moscow, Nedra. (in Russian) [**Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1989. — 270 с.]
4. **Bulychev N. S., Fotieva N. N., and Streltsov E. V.** Design and calculation of support of capital underground excavations, Moscow, Nedra, 1986. (in Russian) [**Булычев Н. С. Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В.** Проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1986. — 288 с.]
5. **Manual** in designing concrete and reinforced concrete constructions without prior armature loading, Moscow, Assotsiatsiya “Zhelezobeton”, 2005. (in Russian) [**Пособие** по проектированию бетонных и железобетонных конструкций без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). — М.: Ассоциация “Железобетон”, 2005. — 97 с.]
6. **Deev P. V., Sammal’ A. S., and Baryshnikov V. D.** Estimating remaining life of underground tunnel concrete lining by convergence measurements, Journal of Mining Science, vol. 48 no. 3, pp 440–444. [**Деев П. В., Саммаль А. С., Барышников В. Д.** Оценка остаточного ресурса бетонной обделки подземного сооружения по измеренным значениям конвергенции. // ФТПРПИ. — Новосибирск. — 2012. — № 3. — С. 49–54.]

7. **Nasonov I. D., Fedyukin V. A. and Shuplik M. N.** Technology of building underground constructions, Moscow, Nedra, 1992. (in Russian) [**Насонов И. Д., Федюкин В. А., Шуплик М. Н.** Технология строительства подземных сооружений. — М.: Недра, 1992. — 232 с.]
8. **Baklashov I. V. and Kartoziya B. A.** Mechanics of underground constructions and supports, Moscow, Nedra, 1992. (in Russian) [**Баклашов И. В., Картозия Б. А.** Механика подземных сооружений и конструкций крепей. — М.: Недра, 2012. — 543 с.]
9. **Nazirov D. A. and Davlatshoev S. K.** Laboratory-scvaie and geophysical studies of the elastic, defromational and strength characteristics of rock mass surroundinh tunnels underground rooms of the Rogun Hydropower Plant Stroit, Construction and architecture, 2017, no 4. [**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. — 2017. — № 4. — С. 34–38.]
10. **Gakhova L. N.** Solution of two-dimensional and three-dimensional elastic problems of a bedded rock mass using boundary intergal equations, Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior: XX Conference Proceedings, Novosibirsk, IGD SO RAN, 2013. (in Russian) [**Гахова Л. Н.** Решение задач теории упругости слоистого массива в плоской и трехмерной постановках методом граничных интегральных уравнений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды XX конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. — С. 185–189.]
11. **Nizomov D. N., Khodzhiboev A. A., and Khodzhiboev O. A.** Transversally isotropic model of rocks mass surrounding underground structures of the Rogun Hydropower Plant, Tajikistan Academy of Sciences: Proceedings, 2011, vol. 54, no. 5. (in Russian) [**Низомов Д. Н., Ходжибоев А. А., Ходжибоев О. А.** Трансверсально-изотропная модель массива пород подземных сооружений Рогунской ГЭС // Доклады Академии наук республики Таджикистан. — 2011. — Т. 54. — № 5. — С. 420–426.]
12. **Latyshev O. G., Matveev A. A., Synbulatov V. V., and Stroev Yu. M.** Rock mass deformation characteristics estimation to forecast the stability of underground excavations, Designing, building and exploitation of underground constructions complexes, Proceedings of III International Conference, Yekaterinburg, 2010, pp. 223–228. (in Russian) [**Латышев О. Г., Матвеев А. А., Сынбулатов В. В., Строев Ю. М.** Оценка деформационных характеристик породного массива для прогноза устойчивости горных выработок // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: труды III Междунар. конф. — Екатеринбург: УГГУ, 2010. — С. 223–228.]