



**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ ПОДЗЕМНОГО МАШИННОГО ЗАЛА  
РОГУНСКОЙ ГЭС ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ КОНВЕРГЕНЦИИ**

**Н. М. Абдуллоев<sup>1</sup>, Л. Н. Гахова<sup>2,3</sup>, Е. Ю. Затева<sup>3</sup>, А. П. Хмелинин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Рогунская ГЭС, Республика Таджикистан, E-mail: n\_abdulloev@mail.ru,*

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail:gahoval@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия,*

<sup>3</sup>*Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета,  
пгт. Черемушки 15, г. Саяногорск 655619, Республика Хакасия*

Дана оценка состояния бетонной обделки подземного машинного зала Рогунской ГЭС по результатам измерений конвергенции его боковых поверхностей. Приведены результаты экстраполяции данных натуральных наблюдений функциями, отражающими затухающий и незатухающий характер изменения конвергенции обделки машинного зала. Установлено, что при неизменных внешних условиях процесс сближения боковых поверхностей в створах машинного зала на конец 2018 г. носит незатухающий характер, что свидетельствует об имеющем место реологическом процессе во вмещающем массиве и в обделке.

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

**ASSESSMENT OF THE STATE OF CONCRETE LINING OF UNDERGROUND ENGINE ROOM  
IN ROGUNSKAYA HPP BY MEASURED CONVERGENCE VALUES**

**N. M. Abdulloev<sup>1</sup>, L. N. Gakhova<sup>1,2</sup>, E. Yu. Zateeva<sup>2</sup>, and A. P. Khmelinin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Rogunskaya HPP, Republic of Tajikistan, E-mail: n\_abdulloev@mail.ru,*

<sup>2</sup>*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail:gahoval@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia,*

<sup>3</sup>*Sayano-Shushensk Branch, Siberian Federal University,  
vill. Cheremushki 15, Sayanogorsk 655619, Republic of Khakassiya*

For the conditions of the Rogunskaya HPP, according to the measurement results of convergence of side surfaces of the engine room, an assessment of the character of their values was given. The extrapolation results of full-scale observation data by the functions reflecting the damping and continuous character of change in the convergence of engine room lining are presented. It was found that, under unchanged external conditions, the convergence of side surfaces in the sections of the engine room was continuous by the end of 2018, which indicates a rheological process taking place in the adjacent rock mass and in the lining.

*Underground structure of hydraulic-engineering system, numerical modeling, stress-strain state, convergence*

В области гидротехнического строительства при возведении подземных сооружений высокого класса, рассчитанных на продолжительный срок эксплуатации, для решения проблемы обеспечения надежности элементов конструкций наряду с оценкой их напряженно-деформированного состояния (НДС) обязательным является мониторинг состояния сооружения в целом и отдельных его элементов, который должен осуществляться на протяжении всего строительного и эксплуатационного периода. Информационная основа мониторинга обеспечивается инструментальными методами, позволяющими устанавливать изменение состояния конструкций в процессе их деформирования, вызванного природными и техногенными факторами. Для интер-

претации данных мониторинга и расчетного сопровождения натуральных наблюдений используются, как правило, детерминистические модели массива и аналитические зависимости параметров мониторинга [1–7].

В данной работе приводится анализ параметров сближения боковых поверхностей машинного зала Рогунской ГЭС, необходимых для определения периода безопасной эксплуатации сооружения. Машинный зал длиной 220 м, шириной 22 м, максимальной высотой 78 м, расположен в скальном массиве, сложенном переслаивающимися песчаниками и алевролитами на глубине 350 м [8].

Анализ результатов численного моделирования НДС вмещающего массива вблизи машинного зала Рогунской ГЭС свидетельствует о наличии в его окрестности зон неупругих деформаций [1–3], что может послужить причиной развития со временем напряжений и деформаций вблизи контура машинного зала и в его обделке вследствие проявлений реологических свойств горных пород и материала обделки. В этой связи оценке продолжительности периода безопасной эксплуатации сооружения должно быть уделено особое внимание. Одним из параметров, связанных с оценкой и прогнозом длительности периода безопасной эксплуатации машинного зала, является сближение (конвергенция) его боковых поверхностей. Учитывая характер изменения конвергенций в большинстве створов машинного зала, для прогноза использовались функции, описывающие при неизменных внешних условиях процесс релаксации массива и обделки [1, 2, 6].

Для описания затухающего реологического процесса во вмещающем массиве и в обделке использовалась экспоненциальная функция [1, 7]:

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

где  $a_1, a_2$  — коэффициенты, определяемые в процессе интерполяции результатов наблюдений экспоненциальной функцией методом наименьших квадратов. Если известна дата начала наблюдений  $t_{\text{ин}}$ , то общее выражение для функции изменения конвергенции:

$$y(t) = -a_1(e^{-a_2 \Delta t} - e^{-a_2(t - t_{\text{ин}} - \Delta t)}), \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — время отсутствия наблюдений на объекте после строительства.

Незатухающий процесс релаксации напряжений горного массива и обделки при неизменных внешних условиях описывается логарифмической функцией [1, 7]:

$$y(t) = a \ln(t + b) + C, \quad (3)$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты, определяемые в процессе интерполяции данной функцией результатов наблюдений методом наименьших квадратов.

Рассмотрим результаты обработки информации о конвергенции боковых поверхностей машинного зала на отм. 989.5 м в створах 1–13 (рис. 1). Наблюдения за изменением сближением боковых поверхностей машинного зала с применением лазерных дальномеров проводятся с 2011 г. так как время отсутствия наблюдений в каждом из створов до 2011 г. неизвестно, предполагается, что  $\Delta t = 0$ .

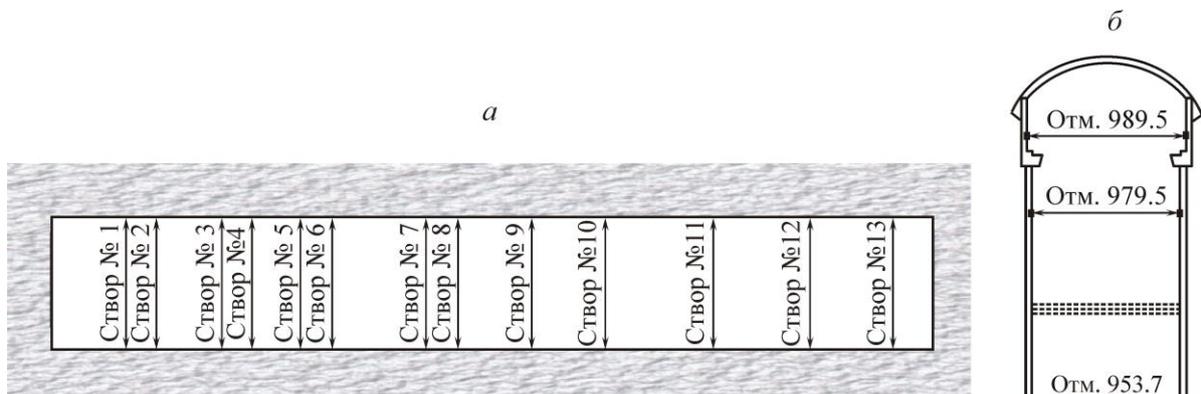


Рис. 1. Схема расположения замерных станций в машинном зале (а) и в измерительном створе (б)

В таблице приведены виды аппроксимирующих функций и достоверность аппроксимации  $R^2$  натуральных данных функциями, описывающими затухающий и незатухающий процесс релаксации горного массива и обделки в створах 1 – 13. Достоверность аппроксимации конвергенции боковых поверхностей машинного зала изменяется в пределах 0.908 – 0.980, что является достаточной степенью надежности аппроксимации исследуемого процесса линией тренда (в данном случае — релаксации массива и обделки стен машинного зала).

Вид аппроксимирующей функции и достоверность аппроксимации  $R^2$  натуральных данных

Номер створа	Экспоненциальная функция		Логарифмическая функция	
	Вид аппроксимирующей функции	$R^2$	Вид аппроксимирующей функции	$R^2$
1	$y = -207.21(1 - \exp(-0.48t))$	0.971	$y = -68.8\ln(t) + 384.0$	0.963
2	$y = -179.42(1 - \exp(-0.59t))$	0.932	$y = -60.8\ln(t) + 320.7$	0.924
3	$y = -177.31(1 - \exp(-0.58t))$	0.939	$y = -57.3\ln(t) + 300.3$	0.937
4	$y = -165.10(1 - \exp(-0.53t))$	0.944	$y = -54.5\ln(t) + 289.9$	0.948
5	$y = -133.12(1 - \exp(-0.52t))$	0.979	$y = -44.4\ln(t) + 240.6$	0.980
6	$y = -114.71(1 - \exp(-0.47t))$	0.946	$y = -37.3\ln(t) + 203.2$	0.976
7	$y = -73.20(1 - \exp(-0.46t))$	0.974	$y = -24.4\ln(t) + 135.0$	0.970
8	$y = -69.33(1 - \exp(-0.47t))$	0.957	$y = -22.9\ln(t) + 124.9$	0.973
9	$y = -99.07(1 - \exp(-0.39t))$	0.965	$y = -34.0\ln(t) + 192.8$	0.970
10	$y = -63.26(1 - \exp(-0.53t))$	0.969	$y = -21.4\ln(t) + 116.1$	0.967
11	$y = -34.05(1 - \exp(-0.39t))$	0.952	$y = -12.1\ln(t) + 69.35$	0.957
12	$y = -30.56(1 - \exp(-0.26t))$	0.921	$y = -9.19\ln(t) + 53.5$	0.918
13	$y = -19.50(1 - \exp(-0.23t))$	0.929	$y = -5.58\ln(t) + 32.9$	0.933

Экстраполяция результатов наблюдений за приращениями конвергенции в створах 1, 6, 12 функциями (1) и (3) приведена на рис. 2. Для интерпретации результатов измерений в створах 1, 6, 12, имеющих точности аппроксимации незатухающей функцией  $\pm 3 \div \pm 5$ ,  $\pm 4 \div \pm 7$ ,  $\pm 3 \div \pm 8$  мм соответственно, применена функция (3), отражающая затухающий процесс [2]. Точность аппроксимации при этом превысила  $\pm 18$ ,  $\pm 21$  и 12 мм, что подтверждает незатухающий характер процесса конвергенции в створах. В этой связи в дальнейшем будут анализироваться только результаты аппроксимации функцией, описывающей незатухающий процесс релаксации.

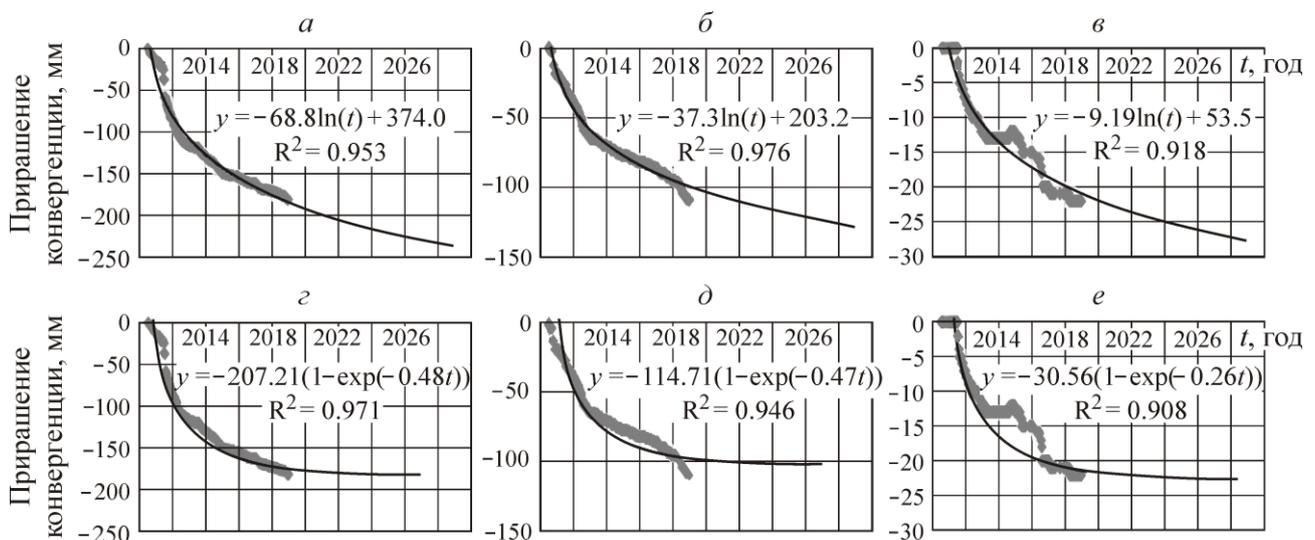


Рис.2. Результаты экстраполяции приращений конвергенции в створах 1 (а), 6 (б), 12 (в) машинного зала Рогунской ГЭС незатухающей функцией и в створах 1 (г), 6 (д), 12 (е) затухающей функцией

Применение функции (3), отражающей незатухающий процесс, показало, что до 2014 г. данные наблюдений конвергенции аппроксимируются в створах 1, 6 с точностью  $\pm 6 \div \pm 10$  мм; в 2014–2018 гг. точность в створах 1, 6 составляла  $\pm 2 \div \pm 4$  мм. В створе 12 точность аппроксимации в 2011–2013 гг. не превышала  $\pm 6$  мм, а к концу 2018 г. увеличилась до  $\pm 16 \div 20$  мм, при этом достоверность аппроксимации превысила 0.918.

Пользуясь аппроксимирующими логарифмическими функциями для створов 1–13, представленных в табл. 1, можно определить максимальные прогнозируемые значения конвергенции к концу 2025 г. при неизменной технологической ситуации: для створа 1 — 212.7 мм, для створа 6 — 120.3, для створа 12 — 26.2 мм.

Обращает на себя внимание, что несмотря на то, что замеры конвергенции во всех створах отм. 989.5 м начаты одновременно, характер изменения информации по створам со временем существенно различается. В частности, максимальные величины измеренных конвергенций за период 2011–2018 гг. в зависимости от положения створа отличаются на порядок (рис. 3). Такое различие является следствием неполного раскрытия поперечного сечения в створах — в районе створов 11–13 открыта только их верхняя часть (калота). В этой связи при интерпретации результатов наблюдений за конвергенцией боковых поверхностей объекта с позиции анализа реологических свойств вмещающего массива и обделки необходимо исследовать условия их проведения и техногенные факторы, влияющие на них (сроки полного открытия и введения в работу створов, температурные особенности, наличие гидротехнического оборудования и т. д.). Комплексный подход к анализу результатов наблюдений требует изучения и учета влияния каждого фактора и при необходимости корректировки параметров мониторинга.

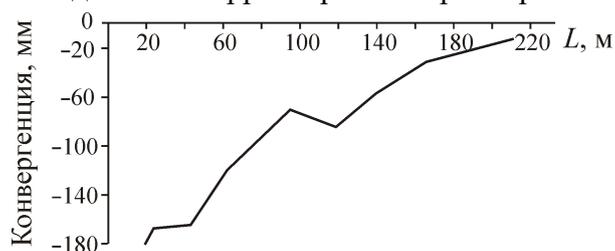


Рис. 4. Максимальные сближения боковых поверхностей машинного зала по створам на удалении  $L$  от его торца

Незатухающий характер приращения изменения конвергенции со временем может свидетельствовать о проявлении реологических свойств горных пород и обделки. При отсутствии сведений об их реологических свойствах согласно [1, 2] можно использовать подход в [2, 9], позволяющий определять напряжения конструкции в заданный момент времени  $t$  по информации об измеренной конвергенции обделки путем решения обратных задач [5] с уточнением модуля деформации обделки  $E_t$ , учет которого дает возможность вычислить напряжения  $\sigma^{(t)}$  и смещения  $U^{(t)}$ . Найденные напряжения позволяют в соответствии с нормативными документами осуществить оценку несущей способности обделки и изменения конвергенции со временем. Зная предельное значение конвергенции  $U_n$  и приращения конвергенции за год, можно вычислить срок безаварийной эксплуатации подземного сооружения.

## ВЫВОДЫ

Для условий Рогунской ГЭС выполнена оценка приращений конвергенции боковых поверхностей машинного зала на отм. 998.5 м. Установлено, что к концу 2018 г. продолжились реологические процессы во вмещающем массиве и в обделке машинного зала. Процесс сближения его боковых поверхностей описывается незатухающей логарифмической функцией, позволяющей значения конвергенции, рассчитываемой для прогноза несущей способности обделки, считать оценкой сверху, что создает определенный запас прочности при определении остаточного ресурса сооружения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Abdullov N. M., Gakhova L. N., Zateeva E. U., and Kuznecova U. A.** The question geomechanical evaluation and forecast the state of the structural elements of the machine hall of Rogun HPP, News of higher educational institutions. Construction, 2019, no. 6, pp. 93–102. [**Абдуллоев Н. М., Гахова Л. Н., Затеева Е. Ю., Кузнецова Ю. А.** К вопросу геомеханической оценки и прогнозу состояния конструктивных элементов машинного зала Рогунской ГЭС // Известия вузов. Строительство. — 2019. — № 6. — С. 93–102.]
2. **Gakhova L. N., Ssafarzade Kh. A., Abdullov N. M.** To the question of evaluation stress-strain state enclosing the array and machine hall lining of Rogun HPP, Power Technology and Engineering, 2019, no. 10, pp. 37–41. [**Гахова Л. Н., Сафарзода Х. А., Абдуллоев Н. М.** К вопросу оценки напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и обделки машинного зала Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. — 2019. — №10. — С. 37–41.]
3. **Zateeva E. U. and Gakhova L. N.** Geomechanical estimation and forecast of underground constructions lining state exemplified by Rogun HPP, Hydroelectric Power Plants and the XXI Century: materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, publishing house Sayan-Shushenskiy Branch Siberian Federal University, 2019, pp. 33–38. [**Затеева Е. Ю., Гахова Л. Н.** Геомеханическая оценка и прогноз состояния обделки подземных сооружений на примере Рогунской ГЭС // Гидроэлектростанции и XXI веке: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. — Саяногорск: Изд-во СШФ СФУ, 2019. — С. 33–38.]
4. **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. — 2012. — № 4. — С. 20–28.]
5. **Bulychev N. S., Fotieva N. N., and Streltsov E. V.** Design and calculation of support of capital underground excavations, Moscow, Nedra, 1986, 288 pp. (in Russian) [**Булычев Н. С. Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В.** Проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1986. — 288 с.]
6. **Nizomov D. N., Khodzhiboev A. A., and Khodzhiboev O. A.** 2011 Transversally isotropic model of rocks mass surrounding underground structures of the Rogun Hydropower Plant, Tajikistan Academy of Sciences: Proceedings, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 420–426. (in Russian) [**Низомов Д. Н., Ходжибоев А. А., Ходжибоев О. А.** Трансверсально-изотропная модель массива пород подземных сооружений Рогунской ГЭС // Доклады АН Таджикистана. — 2011. — Т. 54. — № 5. — С. 420–426.]
7. **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.]
8. **Nazirov D. A. and Davlatshoev S. K.** Laboratory-sevale and geophysical studies of the elastic, defromational and strength characteristics of rock mass surroundingh tunnels underground rooms of the Rogun Hydropower Plant, Building Construction and Architecture, 2017, no. 4, pp. 34–39. [**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. 34–39.]
9. **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, 2012, 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. — 2012. — № 3. — С. 49–54.]