

**АНАЛИЗ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГРЕБНЯ ПЛОТИНЫ
САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС В ПЕРИОД 2013–2016 гг.**

Наталья Николаевна Кобелева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Валерий Степанович Хорошилов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

В статье рассматриваются особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформационного процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Выполнены исследования наиболее удачно сконструированных прогнозных математических моделей для различных сочетаний входных воздействующих факторов, включающих результаты натурных наблюдений и расчетные значения температурных составляющих перемещений. На основе построенных моделей выполнено прогнозирование перемещения контролируемых точек тела плотины для различных по времени этапов ее эксплуатации.

Ключевые слова: высоконапорная плотина, геодезические данные, прогнозная математическая модель, прогнозирование, перемещения контролируемых точек, дискретность математической модели, деформации сооружения.

**ANALYSIS OF INPUT INFLUENCING FACTORS
WHEN CONSTRUCTING A FORECAST MODEL
FOR STUDYING THE PROCESS OF MOVEMENTS
OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HPS DAM FULFILLED
IN THE PERIOD OF 2013–2016**

Natalia N. Kobeleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone:(383)361-01-59, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Valery S. Khoroshilov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, St., D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)361-01-59, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

The article discusses the features of constructing predictive mathematical models for studying the deformation process of displacements of the crest of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station. Studies of the most successfully designed predictive mathematical models

for various combinations of influencing factors, including the results of field observations and the calculated values of temperature components of the displacements, were performed. Based on the constructed models, the forecasting of the controlled points of the dam body was carried out for the stages of its operation that were different in time.

Key words: high-pressure dam, geodetic data, predictive mathematical model, forecasting, movement of controlled points, discreteness of the mathematical model, deformation of the structure.

Введение

Одним из крупнейших гидротехнических сооружений является плотина, как объект, возводимый на пути водного потока для поднятия естественного уровня воды. Данный вид сооружений позволяет извлекать максимальную пользу от действия водной стихии. Современные ГЭС – это самые крупные сооружения на планете и их влияние на природу и окружающий ландшафт наиболее существенно.

Важнейшей задачей при эксплуатации высоконапорных плотин является обеспечение их надежной и безопасной работы [1, 2]. Анализ поведения подобных сооружений и их оснований в процессе функционирования по результатам проведенных натурных наблюдений выявил заметное отличие их реального состояния от расчетных значений, выполненных на стадии проектирования. Следует отметить, что заметно отличаются и сами нагрузки, существенно изменяющие эксплуатационные параметры сооружения. А учитывая тот факт, что многие из этих сооружений эксплуатируются уже продолжительное время, то вероятность возникновения и развития негативных процессов существенно повышается.

Результаты натурных геодезических измерений дают возможность оценить состояние высоконапорных плотин в процессе их эксплуатации [3–7]. Именно эти данные служат основой для построения прогнозных математических моделей в целях анализа механизма протекающих в этих сооружениях деформационных процессов [8–15].

Для контроля технического состояния тела плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) в качестве одного из диагностических показателей приняты радиальные перемещения гребня плотины ключевой секции 33, измеренные обратными отвесами, и соответствующие им значения таких параметров как: гидростатическое давление, а также температура бетона тела плотины в нижней и верхней базовых точках [16].

Методы и материалы

Влияние температуры окружающей среды на эксплуатационные показатели плотины СШГЭС является вторым по значимости после гидростатического давления. В зимнее время года в результате воздействия температуры плотина наклоняется в сторону нижнего бьефа. В летний период, за счет прогрева низовой грани, плотина наклоняется в направлении противоположном действию гидростатической нагрузки [16–18], что несет опасность для отремонтированных ранее зон плотины.

Выявить составляющие перемещений возможно расчетным путем на основе конечно-элементного анализа состояния сооружения в процессе построения температурного поля плотины [8, 19].

Последовательность выполнения оценивания параметров для строящихся математических моделей складывалась из двух основных этапов. На первом этапе оценивались параметры $\hat{\phi}, \hat{\beta}$ по математическому ожиданию, а на втором – свойства шума по остаточной дисперсии.

Результаты исследований

В работах [8, 9] были представлены наиболее удачные прогнозные математические модели в виде рекуррентных уравнений разных типов для описания поведения плотины СШГЭС после аварии 2009 года.

Для последующих исследований была выбрана динамическая модель 3-го типа (декорреляция входных факторов) с двумя входными воздействиями $\Delta x(\Delta U_k, \Delta T_k)$ с возможностью последовательного ввода основных воздействующих факторов в модель:

$$\begin{aligned}U_k &= \phi_1 U_{k-1} + \beta_1 U_k + U_0; \\x_k &= \phi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k + x_0; \\ \Delta x_k &= \phi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k + \Delta x_0 + \gamma \omega_k.\end{aligned}\tag{1}$$

В процессе выполненных исследований для построения математических моделей были использованы входные воздействия в следующих сочетаниях:

- U_k (гидростатическое давление) и $T_{k.низ}$ (температура бетона тела плотины в нижней базовой точке), как результаты натурных наблюдений;
- U_k и $\Delta T_{расч.}$ (температурная составляющая перемещений, полученная на основе конечно-элементной модели);
- $\Delta U_{расч.}$ (гидростатическая составляющая перемещений) и $\Delta T_{расч.}$, полученные на основе конечно-элементной модели.

При построении прогнозной модели для изучения процесса перемещений гребня плотины СШГЭС существенное влияние оказывает выбор входных воздействий, дискретность наблюдений и, как результат этого влияния, – это величины значений остаточных ошибок шумовой компоненты в процессе конструирования модели, по которым оценивается их разброс с использованием стандарта σ_k и строятся графики автокорреляционной функции.

Выбранный нами 2013 год для построения прогнозных математических моделей в качестве периода основания прогноза характеризуется как «средний» в температурном отношении год [18, 19].

Построенные математические модели 3-го типа с декорреляцией входных воздействий $x(U_k, T_k)$ и дискретностью наблюдений через каждые 3 дня представлены ниже:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,8974U_{k-1} + 0,1578T_{к.низ} + 52,747; \\ x_k &= 0,9342x_{k-1} + 0,1323T_{к.низ} + 6,432; \\ \Delta x_k &= 0,4210\Delta x_{k-1} + 1,2924\Delta U_k - 0,059 + 0,6197\omega_k; \\ \omega_k &= 0,1428\omega_{k-1} + 0,2383\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,8866U_{k-1} - 0,0581\Delta T_{расч.} + 61,299; \\ x_k &= 0,9142x_{k-1} - 0,0812\Delta T_{расч.} + 8,552; \\ \Delta x_k &= 0,4238\Delta x_{k-1} + 1,3320\Delta U_k - 0,087 + 0,6190\omega_k; \\ \omega_k &= 0,1421\omega_{k-1} + 0,2471\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,8822U_{k-1} - 0,1993\Delta T_{расч.} + 4,476; \\ x_k &= 0,9140x_{k-1} - 0,0808\Delta T_{расч.} + 2,553; \\ \Delta x_k &= 0,4772\Delta x_{k-1} + 0,4033\Delta U_k + 0,024 + 0,4826\omega_k; \\ \omega_k &= 0,5286\omega_{k-1} + 0,0910\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Для последующего прогнозирования поведения плотины СШГЭС на 2016 год была использована построенная прогнозная модель (3). В качестве входных воздействующих факторов были использованы: U_k – гидростатическое давление (уровень верхнего бьефа, как результаты натуральных наблюдений) и $\Delta T_{расч.}$ – температурная составляющая перемещений.

На рисунке 1 представлены графики результатов измеренных и прогнозных значений составляющих радиальных перемещений контролируемых точек плотины по модели (3) для периода эксплуатации в 2016 году. Здесь же представлен график прогнозных значений составляющих радиальных перемещений, рассчитанных по гидростатической и температурной составляющим перемещений на основе регрессионной модели [20]. Достаточно очевидно преимущество применения для целей прогнозирования построенной математической модели (3).

Вычисленная средняя квадратическая ошибка, полученная по разностям между прогнозными (по модели 3) и измеренными перемещениями контролируемых точек плотины составила величину 1,5 мм.

Выполненные ранее расчеты по прогнозированию перемещения контролируемых точек плотины СШГЭС после аварии 2009 года с применением прогнозных моделей [8, 9] позволили получить неплохие результаты прогнозирования. Однако при этом пришлось строить достаточно сложные по своей структуре математические модели.

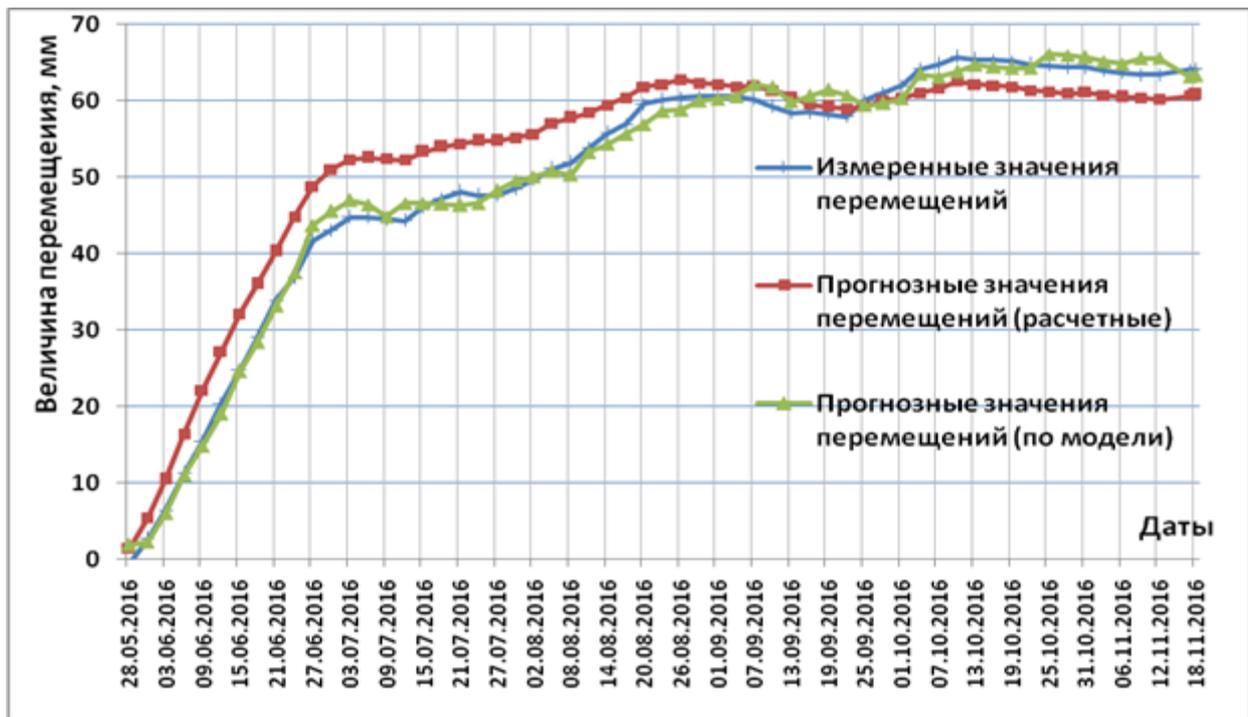


Рис. 1. График изменения измеренных составляющих перемещений и их прогнозных значений, рассчитанных для этапа эксплуатации плотины в 2016 году

В процессе выполненных исследований при выборе в качестве входных воздействий результатов натуральных наблюдений (уровень верхнего бьефа) и расчетных значений температурной составляющей перемещений ($U_k, \Delta T_{расч.}$) с дискретностью данных через каждые 3 дня позволили на данном этапе исследований построить более качественные прогнозные модели.

Выводы

1. Корректный выбор входных воздействующих факторов и типа математической модели на этапе структурной идентификации обеспечил для данной группы математических моделей возможность их применения для различных температурных условий работы сооружения (средний, теплый и холодный в температурном отношении годы).

2. Средняя квадратическая ошибка прогнозирования на 2016 год с использованием прогнозной математической модели (3) с введением транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования в сравнении с результатами измеренных радиальных перемещений составила 1,5 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading // *Engineering Structures*. – 2008. – N 30. – P. 3176–3185. doi: 10.1016/j.eng-struct.2008.04.008.
2. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00. – М. : РАО «ЕЭС России», 2001. – 22 с.
3. Гордон Л. А., Скворцова А. Е. Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2013. – № 11. – С. 22–31.
4. Гордон Л. А., Затеев В. Б., Стефаненко Н. И. Оценка безопасности плотина Саяно-Шушенской ГЭС (по данным натуральных перемещений) // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. – 2005. – Т. 244. – С. 55–64.
5. Дурчева В. Н., Пучкова С. М., Загрядский И. И. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натуральных измерений // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. – 2000. – Т. 237. – С. 45–53.
6. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.
7. Газиев Э. Г. Анализ современного напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2010. – № 9. – С. 48–57.
8. Хорошилов В. С., Мазуров Б. Т., Антонович К. М., Каленицкий А. И., Колмогоров В. Г. Prediction of the movement process of the high-head dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant during operation after the accident in 2009 // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. ISSN 0976-2612, Online ISSN 2278-599X, Vol-8, Issue-4, 2017, pp.1096-1106.
9. Хорошилов В. С. Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident // *International Journal of Engineering Research in Africa*. ISSN: 1663-4144, Vol. 39, 2018. pp 47-59. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.
10. Александров Ю.Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // *Гидротехническое строительство*. – 2008. – №11. – С. 64-69.
11. Костылев В.С. Применение математической модели «сооружение-основание» к анализу изменений в кинематических показателях бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2004-2012 гг. // *Гидротехническое строительство*. – 2013. – №4. – С. 37-46.
12. Гуляев Ю.П., Хорошилов В.С., Кобелева Н.Н. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004-2007 годы) // М.: Изв. ВУЗов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – №4. – С.16-20.
13. Хорошилов В. С., Кобелева Н. Н., Губонин П. Н. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004–2007 гг.) // *Изв. вузов. Строительство*. – 2015. – № 2 (686). – С. 49–58.
14. Кобелева Н. Н., Хорошилов В. С. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007–2009 годов) // *Вестник СГУГиТ*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – № 4 (32). – С. 5–12.
15. Кобелева Н.Н., Хорошилов В.С. Построение математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуатации 2007-2009 гг. // *Вестник СГУГиТ*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – № 2(34). – С.73-86.

16. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений) // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2012. – 204 с.

17. Александров Ю.Н. Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data // Power Technology and Engineering. 2016. Т. 50. N 2. С.130-141. doi:10.1007/s10749-016-0673-z/

18. Евстифеев А.Д., Костылев В.С., Храпков А.А. Определение прогнозных значений температур для точек наблюдения, расположенных в теле бетонной арочно-гравитационной плотины // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2012. – Т. 267. – С. 54-62.

19. Вульфович Н.А., Потехин Л.П. Влияние температурного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС на режимы наполнения водохранилища // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 9. – С.7-16.

20. Вульфович Н.А., Потехин Л.П. Об ограничениях интенсивности наполнения и опорожнения водохранилища бетонных плотин (на примере арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС) // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 12. – С.11-19.

© Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов, 2020