

УДК 001.891.573:528.482:626

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-53-62

АНАЛИЗ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ВЫБОР ТИПА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ЭТАПАХ ИХ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС В ПЕРИОД 2013–2016 ГОДОВ

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

Оценка эксплуатационного состояния гидротехнического сооружения и его техническая безопасность должны выполняться путем сопоставления полученных количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями. С этой целью должны быть разработаны прогнозные математические модели поведения сооружения, которые рекомендуется откалибровать по данным натурных наблюдений. В статье рассматриваются особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформационного процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Для различных сочетаний входных воздействующих факторов, включающих результаты натурных наблюдений и расчетные значения составляющих перемещений, проведены исследования наиболее удачно сконструированных прогнозных математических моделей, на основе которых выполнено прогнозирование контролируемых точек тела плотины для различных временных этапов ее эксплуатации. Представлены преимущества применения построенных прогнозных моделей для различных температурных условий работы сооружения (средний, теплый и холодный в температурном отношении года).

Ключевые слова: высоконапорная плотина, геодезические данные, прогнозная математическая модель, структурная и параметрическая идентификация, прогнозирование, перемещение контролируемых точек, дискретность математической модели, деформация сооружения.

Введение

Одной из важнейших задач при эксплуатации высоконапорных плотин является обеспечение их надежной и безопасной работы [1, 2], а учитывая тот факт, что многие из этих сооружений эксплуатируются уже продолжительное время, то вероятность возникновения и развития негативных процессов существенно повышается.

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 [3].

Натурные геодезические наблюдения являются одними из наиболее важных и незаменимых при изучении состояния высоконапорных плотин в процессе их эксплуатации [4–8]. Именно эти данные служат основой для построения прогнозных математических моделей в целях анализа механизма протекающих в этих сооружениях деформационных процессов [9–16].

Методы исследований

В процессе эксплуатации плотины СШГЭС воздействие температурного фактора является

ся вторым по значимости после гидростатического давления. Так, в зимнее время года в результате этого воздействия плотина наклоняется в сторону нижнего бьефа, т. е. в ту же сторону, что и от воздействия гидростатической нагрузки. Вследствие зимней сработки водохранилища [3, 17, 18] это воздействие не ведет к ухудшению напряженного состояния тела плотины. В то же время, в летний период, за счет прогрева низовой грани плотина наклоняется в направлении, противоположном действию гидростатической нагрузки. А это уже несет опасность для отремонтированных зон плотины за счет нарушения установленного определенного баланса между значениями температурной и гидростатической составляющими перемещений в периоды заполнения водохранилища (май – сентябрь) и его начальной сработки (вторая половина сентября-октября).

Выявить эти составляющие перемещений возможно расчетным путем на основе конечно-элементного анализа состояния сооружения в процессе построения температурного поля плотины. Так, в работе [19] на основе подобного анализа за периоды работы плотины с 2004 по 2015 г. были выделены: благоприятный (теплый) в температурном отношении год; средний и неблагоприятный (холодный) годы. Ранее в работе [9] мы интерпретировали данное обстоятельство как работу сооружения в штатном (средний в температурном отношении год) и нештатном режимах работы (теплый и холодный годы). При прогнозировании перемещений тела плотины это позволяло вводить поправку в виде транспортного запаздывания в конечные результаты прогнозирования.

С целью устранения угрозы нарушения целостности отремонтированных зон тела плотины следует снижать уровень гидростатического напора в зимний период и допускать его повышение в летний период работы сооружения. Подобные рекомендации были положены в основу регулирования диспетчерского графика работы водохранилища при разработке правил использования водных ресурсов (ПВР) Саяно-Шушенской ГЭС [19]. Данные рекомендации по скорости

наполнения водохранилища в период эксплуатации 2013–2016 гг. показали их эффективность с точки зрения обеспечения безопасной работы сооружения.

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

Ранее в [9, 10] были представлены различные прогнозные математические модели в виде рекуррентных уравнений различных типов для описания поведения плотины СШГЭС после аварии 2009 г. При построении моделей были использованы следующие входные воздействующие факторы: U_k – гидростатическое давление (уровень верхнего бьефа); $T_{k.низ}$ и $T_{k.верх}$ – температура бетона тела плотины в нижней и верхней базовых точках. Дискретность исходных данных составляла 15 и 30 дней.

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 коррелирующих факторов в модель:

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

Отметим, что на этапе структурной идентификации модели существенное влияние оказывает выбор входных воздействий, дискретность наблюдений и, как результат этого влияния, – 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.

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 натуральных 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.

Выбранный нами 2013 г. для построения прогнозных математических моделей в качестве периода основания прогноза характеризуется как «средний» в температурном отношении год.

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

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

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

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

Порядок модели авторегрессии для описания шумовой компоненты был определен на основе анализа построенных графиков автокорреляционных функций по остаточным ошибкам (рис. 1) для всех строящихся моделей [20, 21].

Представленные на рис. 1 графики свидетельствуют о том, что описание процесса шума следует производить моделями авторегрессии 2-го порядка вида:

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (5)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

Для данной группы математических моделей можно констатировать следующее.

Качество структурной идентификации для всех трех математических моделей сле-

дует признать высоким, о чем свидетельствует вид их автокорреляционных функций, построенных по остаточным ошибкам моделирования (см. рис. 1).

На наш взгляд, это вызвано тем, что на этапах структурной и параметрической идентификации моделей осуществлен корректный выбор типа математической модели, входных воздействующих факторов и дискретности результатов наблюдений через каждые 3 дня. Данное обстоятельство дает возможность использования математической модели (2) для прогнозирования радиальных перемещений тела плотины по результатам натуральных наблюдений при штатных ситуациях работы плотины (средний в температурном отношении год).

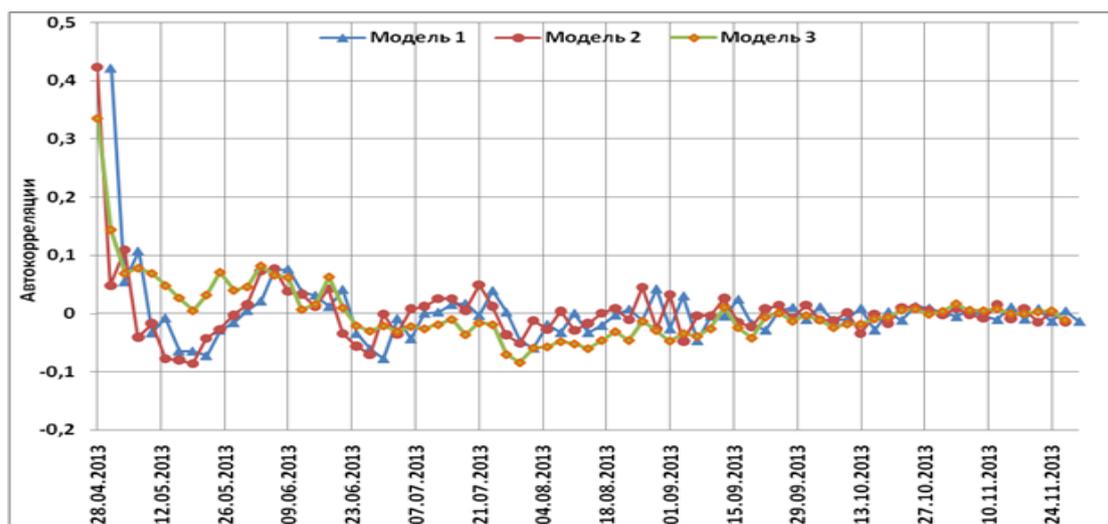


Рис. 1. Вид автокорреляционных функций для данной группы моделей (декорреляция входных воздействий)

Также имеется возможность применения прогнозной модели (3) для прогнозирования радиальных перемещений при нештатных ситуациях (холодный и теплый годы) с использованием результатов натурных наблюдений и расчетных значений составляющих перемещений или же модели (4) с использованием расчетных значений составляющих перемещений

(гидростатической и температурной).

Для последующего прогнозирования поведения плотины СШГЭС на 2016 г. была использована построенная прогнозная модель (3) с декорреляцией входных воздействий путем их последовательного ввода в модель с дискретностью наблюдений через каждые 3 дня, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U_k &= 0,8866U_{k-1} - 0,0581\Delta T_{\text{расч.}} + 61,299; \\
 x_k &= 0,9142x_{k-1} - 0,0812\Delta T_{\text{расч.}} + 8,552; \\
 \Delta x_k &= 0,4238\Delta x_{k-1} + 1,3320\Delta U_k - 0,087 + 0,6190\omega_k; \\
 \omega_k &= 0,1421\omega_{k-1} + 0,2471\omega_{k-2} + \xi_k.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В качестве входных воздействующих факторов были использованы: U_k – гидростатическое давление (уровень верхнего бьефа как результаты натурных наблюдений) и $\Delta T_{\text{расч.}}$ – температурная составляющая перемещений (полученная на основе конечно-элементной модели).

На рис. 2, 3 представлены графики изменения воздействующих факторов: изменения верхнего бьефа и температурной составляющей перемещений за 2013 г. (период основания прогноза, на котором строилась прогнозная модель), на которые наложены изменения этих же факторов за 2016 г.

(период для прогнозирования) по данным из работы [22].

На рис. 4 представлены графики результатов измеренных и прогнозных значений составляющих радиальных перемещений контролируемых точек плотины по модели (3) для периода эксплуатации в 2016 г. Здесь же представлен график прогнозных значений составляющих радиальных перемещений, рассчитанных по гидростатической и температурной составляющим перемещений в результате построения конечно-элементной модели [22]. Достаточно очевидно преимущество применения для целей прогнозирования построенной математической модели (3).

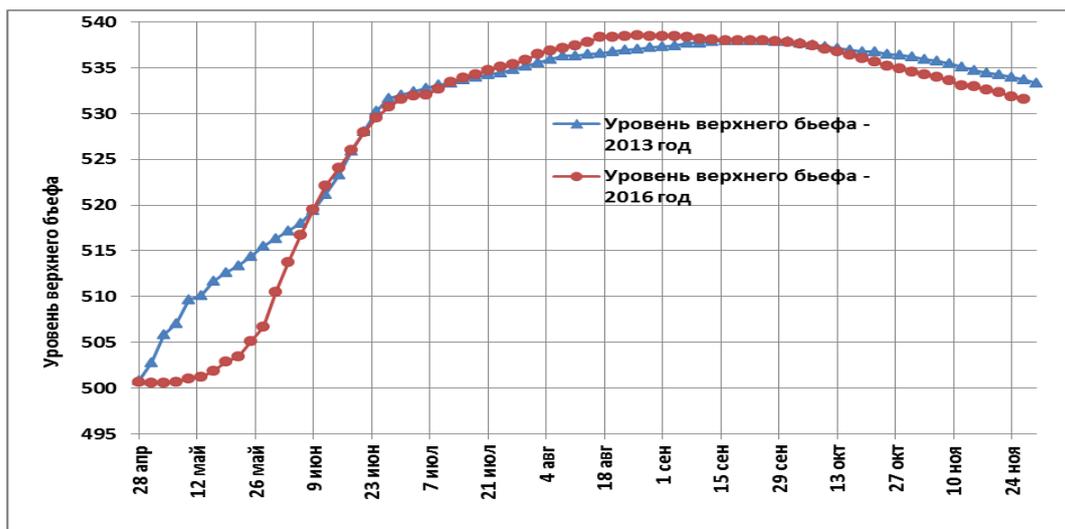


Рис. 2. Графики изменения уровня верхнего бьефа за 2013 и 2016 гг.

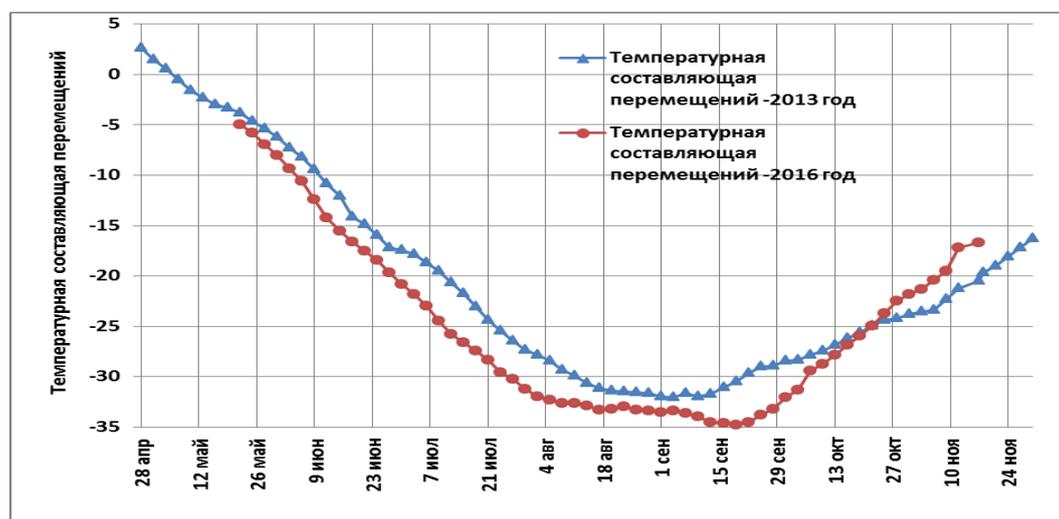


Рис. 3. Графики изменения температурной составляющей перемещений за 2013 и 2016 гг.

Вычисленная средняя квадратическая ошибка, полученная по разностям между прогнозными (модель 3) и измеренными перемещениями контролируемых точек плотины для этапа эксплуатации 2016 г., составила величину 1,5 мм. Выполненные ранее расчеты по прогнозированию перемещения контролируемых точек плотины СШГЭС после аварии 2009 г. с применением прогнозных моделей [9, 10] позволили получить неплохие результаты прогнозирования. Однако при этом пришлось строить достаточно сложные по своей структуре математические модели.

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.

Стоит особо отметить, что выполненное по ним прогнозирование по данным предыдущих исследований при изучении поведения плотины после аварии 2009 г. обеспечило получение равнозначных точных результатов прогнозирования, что и показано на графиках (рис. 5).

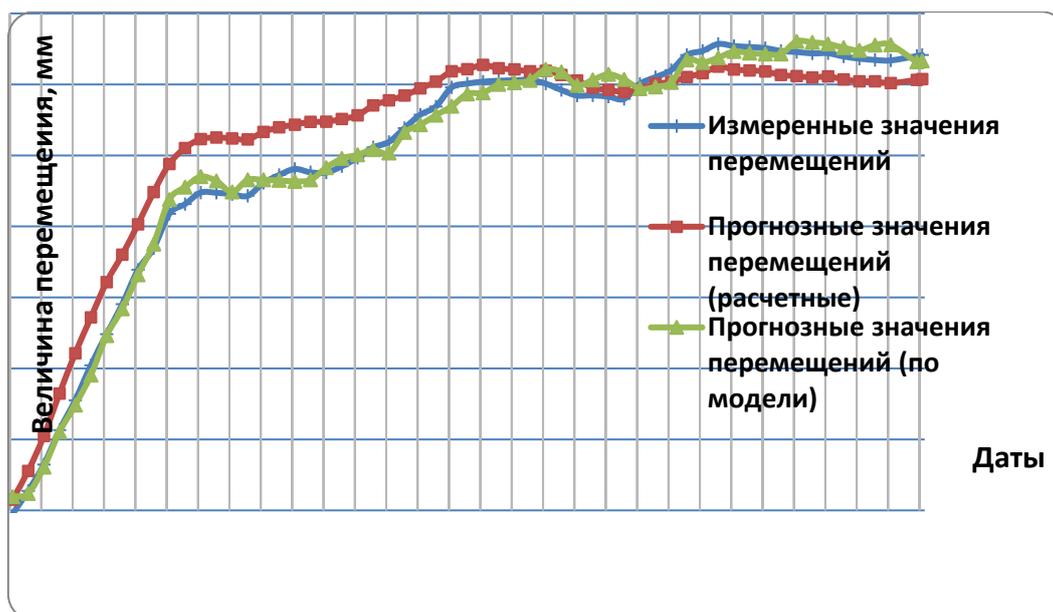


Рис. 4. График изменения измеренных составляющих перемещений и их прогнозных значений, рассчитанных для этапа эксплуатации плотины в 2016 г.

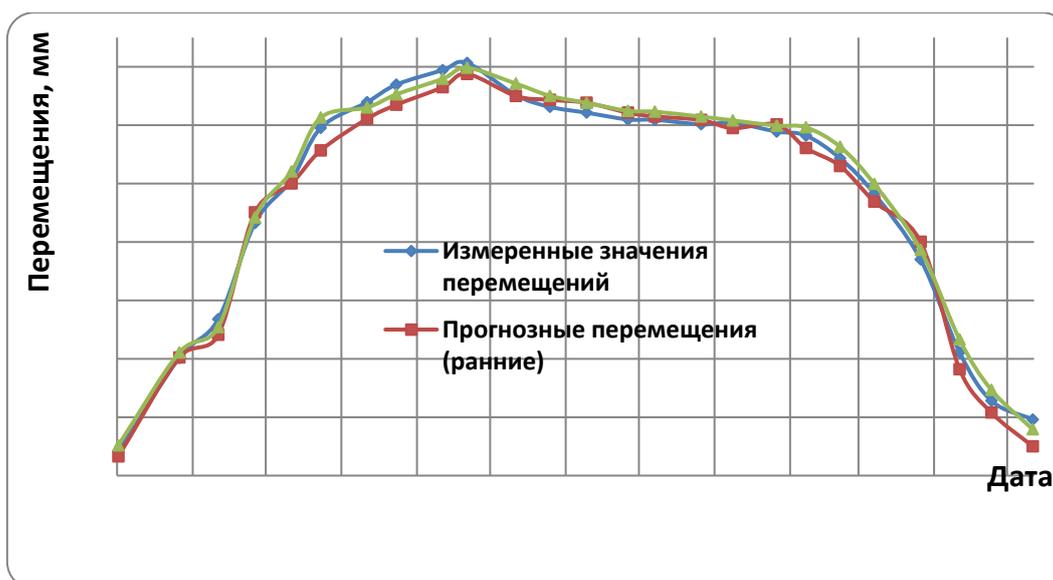


Рис. 5. График изменения радиальных перемещений и их прогнозных значений по модели (3) и ранее известных результатов прогнозирования из работ [3, 4] для ранних этапов эксплуатации плотины за 2009–2010 гг.

Это свидетельствует о том, что для выбранных входных воздействующих факторов построенные прогнозные модели с декорреляцией входных воздействий путем их последовательного ввода в модель возможно применять для прогнозирования практически всех возможных состояний плотины, т. е. для большинства штатных и нештатных ситуа-

ций (теплого, среднего и холодного годов). Очевидно, это объясняется тем, что входное воздействие в виде расчетных значений температурной составляющей перемещений в достаточно полной мере отражает изменение температуры по всему телу плотины, включая и ее изменения в нижней и верхней базовых точках. А применение такого мето-

дического приема, как введение транспортного запаздывания [9] в окончательные результаты прогнозирования, позволило получить качественные результаты.

Отметим также, что такой важный параметр, как дискретность математической модели через каждые 3 дня, который характеризует цикличность натуральных наблюдений при условии охвата основных закономерностей развития исследуемого процесса деформации плотины и изменений основных воздействующих факторов, позволил построить достаточно корректные с точки зрения структурной идентификации прогнозные математические модели.

Выводы

1. Корректный выбор входных воздействующих факторов и типа математической модели на этапах структурной и параметрической идентификации обеспечил для дан-

ной группы математических моделей возможность их применения для различных температурных условий работы сооружения (средний, теплый и холодный в температурном отношении года).

2. Средняя квадратическая ошибка прогнозирования на 2016 г. 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.

3. Выполненное прогнозирование с помощью модели (3) с использованием ранее известных данных о воздействующих факторах за 2009 г. позволило осуществить прогнозирование на этот год и сравнить полученные результаты с результатами ранее выполненного прогнозирования. В итоге результаты раннего и вновь выполненного прогнозирования оказались примерно равнозначными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading // *Engineering Structures*. – 2008. – No. 30. – P. 3176–3185. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.04.008.

2. РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. – М. : РАО «ЕЭС России», 2001. – 22 с.

3. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натуральных наблюдений). – СПб. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2012. – 204 с.

4. Гордон Л. А., Скворцова А. Е. Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2013. – № 11. – С. 22–31.

5. Гордон Л. А., Затеев В. Б., Стефаненко Н. И. Оценка безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС (по данным натуральных перемещений) // *Изв. Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. – 2005. – Т. 244. – С. 55–64.

6. Дурчева В. Н., Пучкова С. М., Загрядский И. И. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных

натурных измерений // *Изв. Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. – 2000. – Т. 237. – С. 45–53.

7. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.

8. Газиев Э. Г. Анализ современного напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2010. – № 9. – С. 48–57.

9. Prediction of the movement process of the high-head dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant during operation after the accident in 2009 / V. S. Khoroshilov, B. T. Mazurov, K. M. Antonovich, A. I. Kalenitskiy, V. G. Kolmogorov // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. – 2017. – Vol. 8, Issue 4. – P. 1096–1106.

10. Khoroshilov V. S. Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident // *International Journal of Engineering Research in Africa*. – 2018. – Vol. 39. – P. 47–59. doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.

11. Александров Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС

для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 64–69.

12. 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.

13. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С., Кобелева Н. Н. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004–2007 годы) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 16–20.

14. 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.

15. 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. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 5–12.

16. Кобелева Н. Н., Хорошилов В. С. Построение математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуата-

ции 2007–2009 гг. // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 73–86.

17. Aleksandrov Yu. N. Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data // Power Technology and Engineering. – 2016. – Vol. 50, No. 2. – P. 130–141. doi: 10.1007/s10749-016-0673-z/.

18. Евстифеев А. Д., Костылев В. С., Храпов А. А. Определение прогнозных значений температур для точек наблюдения, расположенных в теле бетонной арочно-гравитационной плотины // Изв. 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. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. – М.: Мир, 1974. – 405 с.

21. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 2. – М.: Мир, 1974. – 197 с.

22. 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.

Получено 15.04.2020

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

ANALYSIS OF INPUT INFLUENCING FACTORS AND SELECTION OF THE TYPE OF A MATHEMATICAL MODEL AT THE STAGES OF THEIR STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION FOR STUDYING DEFORMATION STATE OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP DAM IN 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., Ph. D., Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)361-01-59, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

Assessment of the operational state of a hydraulic structure and its technical safety should be carried out by comparing the obtained quantitative and qualitative diagnostic indicators with their criteria values. For this purpose, predictive mathematical models of the structure's behavior should be developed, which are recommended to be calibrated according to field observations. The article considers features of constructing

predictive mathematical models for studying deformation process of displacements of the dam crest of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant. For various combinations of input influencing factors, including the results of field observations and calculated values of component displacements, the most successfully designed predictive mathematical models were studied, on the basis of which the dam body points were forecasted for stages of its operation in different times. The advantages of using the created forecast models for various temperature conditions of the structure (medium, warm and cold temperatures of year) are presented.

Key words: high-pressure dam, geodetic data, forecast mathematical model, structural and parametric identification, forecasting, movements of controlled points, discreteness of the mathematical model, deformations of a construction.

REFERENCES

1. Ardito, R., Maier, G., & Massalongo, G. (2008). Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading. *Engineering Structures*, 30, 3176–3185. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.04.008 [in Russian].
2. Ruling Document RD 153-34.2-21.342-00. (2001). Method of determining criteria of safety of hydraulic installations. Moscow: RAO "EES Rossii", 22 p. [in Russian].
3. Vul'fovich, N. A., Gordon, L. A., & Stefanenko, N. I. (2012). Arch-gravity dam Sayano-Shushenskaya HPP (assessment of technical condition according to field observations). *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering. B. E. Vedeneeva]*, 204 p. [in Russian].
4. Gordon, L. A., & Skvortsova, A. E. (2013). Updating security criteria for essential diagnostic indicators dam Sayano-Shushenskaya HPP. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 11, 22–31 [in Russian].
5. Gordon, L. A., Zateev, V. B., & Stefanenko, N. I. (2005). Safety assessment of dam Sayano-Shushenskaya HPP (according to natural movements). *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Bulletin of the B. E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering]*, 244, 55–64 [in Russian].
6. Durcheva, V. N., Puchkova, S. M., & Zagryadskiy, I. I. (2008). Treatment of seasonal changes in schemes of work concrete plotin when analyzing data in situ measurements. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Bulletin of the B. E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering]*, 237, 45–53 [in Russian].
7. Gulyaev, Yu. P. (2008). *Prognozirovaniye deformatsii sooruzheniy na osnove rezul'tatov geodezicheskikh nablyudeniy [Prediction of deformation of the structures on the basis of the results of geodetic observations]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 256 p. [in Russian].
8. Gaziev, E. G. (2010). Analysis of stress-strain State of arch-gravity dam Sayano-Shushenskaya HPP. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 9, 48–57 [in Russian].
9. Khoroshilov, V. S., Mazurov, B. T., Antonovich, K. M., Kalentsky, A. I., & Kolmogorov, V. G. (2017). 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)*, 8(4), 1096–1106.
10. Khoroshilov, V. S. (2018). Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 39, 47–59. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.
11. Aleksandrov, Yu. N. (2008). Use the design model of the dam Sayano-Shushenskaya HPP for assessing and predicting its State. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 11, 64–69 [in Russian].
12. Kostylev, V. S. (2013). Application of mathematical construction model-base "to analyse changes in kinematic indicators concrete arch-gravity dam Sayano-Shushenskaya HPP for 2004-2012 biennium. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 4, 37–46 [in Russian].
13. Gulyaev, Yu. P., Khoroshilov, V. S., & Kobeleva, N. N. (2015). Build predictive mathematical model of process of displacement of the dam Sayano-Shushenskaya HPP (2004–2007). *Izvestia Vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 16–20 [in Russian].
14. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., & Gubonin, P. N. (2015). Mathematical modeling of deformation process to study the movements of Sa-

yano-Shushenskaya HPP dam based on dynamic models (2004–2007). *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*, 2(686), 49–58 [in Russian].

15. Kobeleva, N. N., & Khoroshilov, V. S. (2015). Building on geodetic data forecast model process moves Crest Sayano-Shushenskaya HPP (during the operational phase 2007–2009). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 5–12 [in Russian].

16. Kobeleva, N. N., & Khoroshilov, V. S. (2016). Construction of mathematical models for predicting the horizontal displacement of the dam Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant for operation period of the 2007-2009 biennium. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 73–86 [in Russian].

17. Aleksandrov, Yu. N. (2016). Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data. *Power Technology and Engineering*, 50(2), 130–141. doi:10.1007/s10749-016-0673-z/.

18. Evstifeev, A. D., Kostylev, V. S., & Khrapkov, A. A. (2012) Definition of forecast temperature values for points in the body of a concrete arch-gravity dam. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E.*

Vedeneeva [Bulletin of the B. E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering], 267, 54–62 [in Russian].

19. Vul'fovich, N. A., & Potekhin L. P. (2016). The influence of the temperature state of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station on the filling regimes of the reservoir. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 9, 7–16 [in Russian].

20. Boxing, J., & Jenkins, G. (1974). *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie: Vyp. 1 [Time Series Analysis. Forecast and management: Issue 1]*. Moscow: Mir Publ., 405 p. [in Russian]. Issue 2. 197 s.

21. Boxing, J., & Jenkins, G. (1974). *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie: Vyp. 2 [Time Series Analysis. Forecast and management: Issue 2]*. Moscow: Mir Publ., 197 p. [in Russian].

22. Vul'fovich, N. A., & Potekhin L. P. (2017). On the restrictions on the intensity of filling and emptying of the reservoir of concrete dams (on the example of the arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station). *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 12, 11–19 [in Russian].

Received 15.04.2020

© N. N. Kobeleva, V. S. Khoroshilov, 2020