

Рациональное размещение прямых отвесов в бетонных плотинах

Г.А. Шаинян

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проектирование и строительство высоких гидроэнергетических сооружений тесно связано с натурными наблюдениями и исследованиями их состояния и работы, являющимися наиболее надежным и эффективным средством проверки достоверности расчетных методов и принятых проектных решений. По результатам проведенных натурных наблюдений и исследований в период строительства и эксплуатации на плотинах, для контроля их состояния с помощью измерительных систем (ИС), лабораторных испытаний и расчетных методов, могут быть разработаны единые методы оснащения сооружений приборами по единому принципу. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт разработки и применения методов натурных исследований. Созданы приборы нового типа для измерения перемещений, напряжений в бетоне, фильтрационных расходов, пьезометрических уровней. Установлены автоматизированные системы контроля за поведением гидротехнических сооружений в период строительства, наполнения водохранилища и эксплуатации. Применяются современные спутниковые системы «Глонасс» и GPS.

Материалы и методы. Исследования проведены на арочной плотине Ингурской ГЭС с помощью 2177 ИС, из которых 46 — прямые и обратные отвесы. Тело плотины имеет три створа прямых отвесов и по одному — в скальных примыканиях берегов. Перемещения относительно отвесов измерялись оптическим координатометром. Для обработки данных измерений применялись статистические методы анализа.

Результаты. Отработана методика рационального размещения прямых отвесов в бетонных плотинах с применением статистических методов анализа и математической модели Барлоу – Хантера – Прошана, исходя из современного опыта проведения натурных наблюдений и исследований. Вид закона распределения горизонтальных перемещений плотины установлен путем анализа гистограмм измеренных показателей статического состояния сооружения. Уточнено необходимое количество отвесов для ключевой консоли Ингурской арочной плотины. На практике данная методика использовалась при проектировании высоких бетонных плотин.

Выводы. Многолетний опыт исследований и эксплуатации арочной плотины Ингурской ГЭС позволил оценить соответствие установленных ИС требованиям специального контроля и выделить необходимое их количество для наблюдений за прочностью и устойчивостью сооружения. Предложенные методы анализа данных натурных исследований, основанные на теории вероятностей, статистике и надежности были использованы при проектировании плотины Худони ГЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: измерительные системы, прямые отвесы, ключевая консоль, математическая модель Барлоу – Хантера – Прошана, плотность вероятности, нормальный закон распределения, функция Лапласа

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шаинян Г.А. Рациональное размещение прямых отвесов в бетонных плотинах // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 6. С. 713–721. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.713-721

Rational arrangement of direct plummets in concrete dams

Georgy A. Shainyan

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The design and construction of high hydroelectric installations are closely related to in-situ observations and studies over their condition and operation, which are the most reliable and effective means of verifying the reliability of calculation methods and design solutions. According to the results of the in-situ observations and studies during the construction and operation of dams, to monitor their condition by means of measurement systems, laboratory tests and calculation methods, unified methods can be developed for equipping the installations with devices on a unified principle. Currently, there is quite a lot of experience in the development and application of methods of in-situ research. New-type devices for measuring displacements, stresses in concrete, filtration flows and piezometric levels are developed. Automated systems for monitoring the behavior of hydraulic structures during the construction, filling of the reservoir and operation are installed. Modern satellite systems GLONASS and GPS are used.

Materials and methods. The research was carried out on the arch dam of Inguri HEPS by means of 2177 measuring systems, 46 of which are direct and opposite plummets. The body of the dam has three direct plummets and one in each of the rocky bank abutments. Displacements relative to the plummets were measured with an optical coordinate-measuring apparatus. Statistical analysis methods were used to process the measurement data.

Results. A technique of rational direct plummet arrangement in concrete dams was fine-tuned using statistical analysis methods and Barlow-Hunter-Proshan mathematical model based on the modern experience of in-situ observations and research. The type of distribution law of dam horizontal displacements was determined by means of analyzing the histograms of the measured indicators of the static state of the installation. The required number of plummets for the key console of the Inguri arch dam was specified. This technique was used in practice for designing high concrete dams.

Conclusions. Multi-year experience in the research and operation of the Inguri HEPS arch dam allowed assessing the compliance of the mounted measuring systems with special control requirements and allocating the necessary amount of them for monitoring the strength and stability of the installation. The proposed methods of in-situ research data analysis based on the theory of probability, statistics and reliability were used in the design of the Hudoni HEPS dam.

KEYWORDS: measuring systems, direct plummets, key console, Barlow-Hunter-Proshan mathematical model, probability density, normal distribution law, Laplace function

FOR CITATION: Shainyan G.A. Rational arrangement of direct plummets in concrete dams. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(6):713-721. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.713-721

ВВЕДЕНИЕ

При разработке проекта строительства гидротехнических сооружений предусматриваются натурные наблюдения [1–3]. Впервые в мире натурные наблюдения были поставлены на научную основу на строительстве Нижне-Свирской ГЭС. В результате регулярных наблюдений геодезическими методами за сооружением была доказана возможность возведения подобных плотин на сжимаемых грунтах, обеспечено их безупречное строительство и функционирование.

Первый опыт натурных наблюдений показал необходимость высококвалифицированного их проведения на строящихся объектах и оснащения последних измерительными системами (ИС). На принципиально новую основу поставили отечественную науку в области натурных исследований ученые АО «Институт Гидропроект», ВНИИГ, ГрузНИИЭГС [4–6].

В мировой практике на гидротехнических сооружениях эти инженерные системы безопасности начали внедряться с конца 80-х годов прошлого столетия. Во многом это было связано с актуализацией вопроса безопасности плотин в деятельности международной комиссии по большим плотинам ICOLD (International Commission on Large Dams). Ускорением развития стал состоявшийся в июле 1998 г. в Барселоне Международный симпозиум по новым трендам и методическим рекомендациям по безопасности [7]. В докладах VI Международной научной конференции, прошедшей в ноябре 2018 г.

в Москве в МИСИ–МГСУ, было уделено большое внимание необходимости оснащения современными ИС контроля за поведением гидротехнических сооружений от нагрузок и внешних воздействий. Для этого разработана система мониторинга Monitoring System (MS–). Это группа физических инструментов, объединенная в систему для определения основных контролируемых параметров технического состояния сооружения таких как: осадки, плановые перемещения и наклоны, фильтрационные показатели, деформации, напряжения и температура [4].

Накопленный опыт наблюдений за общими деформациями высоких плотин: Ингурская (Грузия), Вайонт (Италия), Мовуазен (Швейцария), Куробе 4 (Япония), Чиркейская (Россия), Саяно-Шушенская (Россия), Гувера (США), Шуйбуй (Китай) позволяет достаточно точно и надежно оценить статическую работу сооружения как в период наполнения водохранилища, так и во время эксплуатации [8–11].

Размещение ИС в бетонных плотинах определяется их типом, размерами и топографическими показателями створа [12].

Горизонтальные перемещения арочных плотин позволяют изучать поведение сооружения по всей его высоте. Наблюдения за ними ведутся с помощью отвесов, которые устанавливаются в ключевом сечении и в сечениях с максимальными прогибами [13]. Из-за конструктивных особенностей высоких плотин не всегда представляется возможность устанавливать отвесы на одной линии. Поэтому их располагают группами в вертикальных створах, проходящих через смотровые галереи и штольни

с шагом 30–50 м. По данным этих групп отвесов фиксируются горизонтальные перемещения консолей и строятся соответствующие эпюры. Выбор указанного шага определяется опытом проектировщика и в значительной степени носит волевой характер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Натурные наблюдения и исследования проводились на арочной плотине Ингурской ГЭС, высота которой 271,5 м, длина по гребню 758 м, в том числе устоев 118 м, толщина в ключевом сечении на гребне 10 м, на контакте плотины с основанием 90 м. Тело плотины разрезано на 39 секций геликоидальными межсекционными швами, нормальными в любом горизонтальном сечении к оси соответствующей арки и оснащено 46 прямыми и обратными отвесами. Это центральная консоль секции 18 и консоли с максимальными прогибами: секции 7, 12, 26, 32 (рис. 1).

Применялись статистические методы анализа результатов натурных исследований, диагностики и надежности [14–17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения показали, что горизонтальные перемещения носят закономерный характер, увязывающийся с ростом напора и изменением температуры. Максимальные радиальные перемещения на гребне ключевого сечения достигли 54–56 мм, в четвертях арки — 41–48 мм. Сезонный размах прогибов гребня — 26 мм.

Основным фактором, определяющим изменение горизонтальных перемещений, является изменение гидростатической нагрузки. Температурная составляющая наиболее ощутима у гребня плотины, где размах ее колебаний больше, чем у составляющей от изменения напора.

Для решения задачи рационального размещения отвесов был применен опыт наблюдений за перемещениями Ингурской арочной плотины и статистический метод анализа с применением математической модели Барлоу – Хантера – Прошана. По показаниям отвесов (рис. 2) фиксировали частоты изменения горизонтальных перемещений ключевой консоли не менее, чем на 2 мм за трехлетний период и сводили в табл. 1 по признаку удаления от уровня 240 м к основанию плотины.

После этого строили соответствующие частотные кривые распределения (экспериментальная и теоретическая) результатов измерений, для чего определяли частоты изменения горизонтальных перемещений на участках десятиметровой длины

$$v_k = \frac{n_k}{0,1 \cdot L_k} \quad (k = 1, N; N = 6), \quad (1)$$

где n_k — абсолютная частота измерения перемещений; L_k — текущая координата консоли, отсчитываемая от уровня 240 м.

Затем устанавливали экспериментальные относительные частоты на тех же участках

$$P_k = \frac{v_k}{\sum_{i=1}^N v_i}. \quad (2)$$

Дисперсию находили по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^N P_j \tilde{L}_j^2}, \quad (3)$$

где P_j — относительные частоты измерения перемещений; \tilde{L}_j — координата середины j -го участка,

$$\tilde{L}_j = \frac{1}{2}(L_j + L_{j+1}).$$

По данным вычислений была построена частотная кривая экспериментального распределения скачков перемещений и сопоставлена с кривой одностроннего нормального закона распределения [3–5].

Табл. 1. Частоты изменения горизонтальных перемещений ключевой консоли

Table 1. Variation frequencies of key console horizontal displacements

Проектный номер отвеса / Design plummet number	Уровень, м / Level, m	Абсолютная частота измерения перемещений n_k / Absolute displacement measuring frequency, n_k	Текущая координата консоли L_k , м / Current console coordinate L_k , m
18 ПОТ-5 / 18 POT-5	240	157	0
18 ПОТ-4 / 18 POT-4	210	159	30
18 ПОТ-3 / 18 POT-3	162	138	48
18 ПОТ-2 / 18 POT-2	120	96	42
18 ПОТ-1 / 18 POT-1	75	49	45
СГС-2 / SGS-2	25	10	50

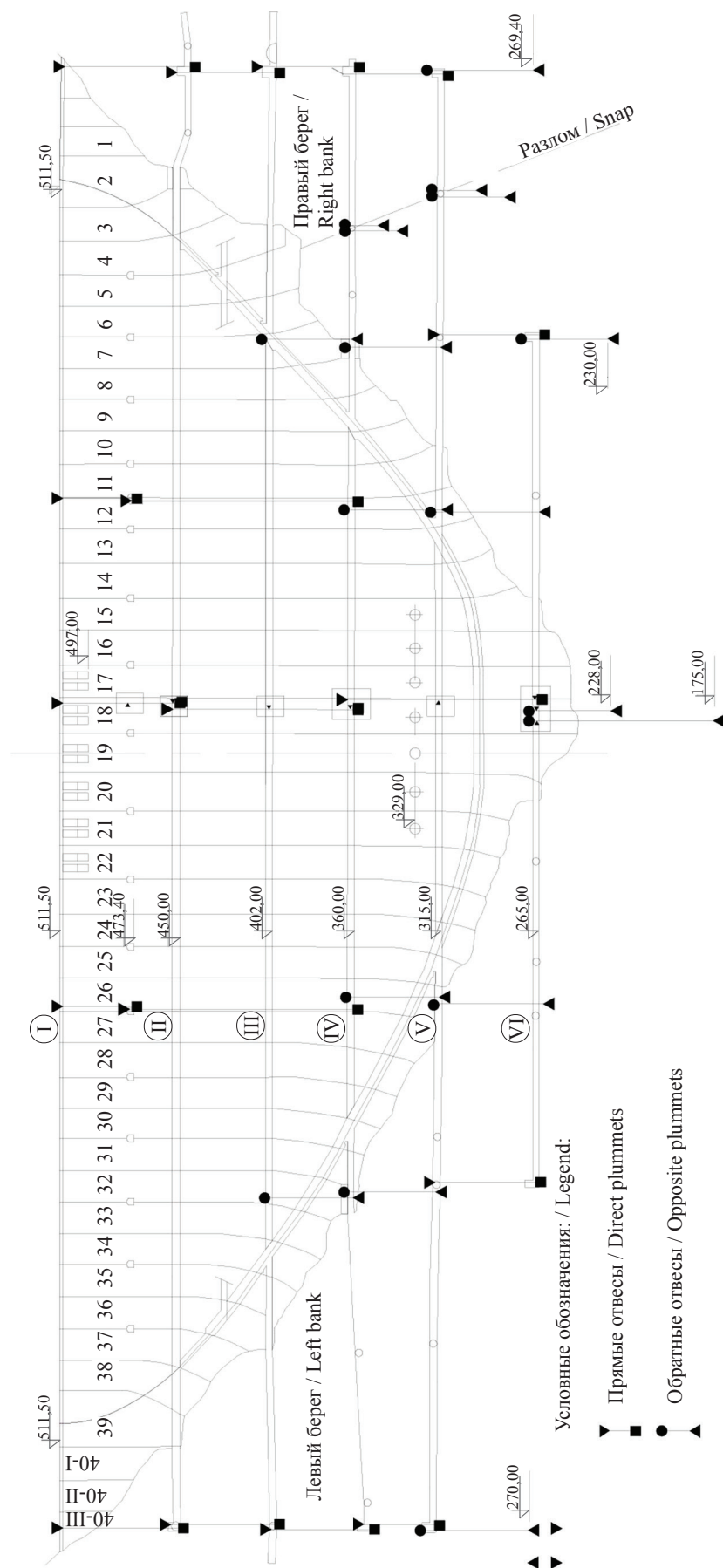


Рис. 1. Схема размещения прямых и обратных отвесов на арочной плотине Ингурской ГЭС

Fig. 1. Diagram of arrangement of direct and opposite plummets at Inguri HEPS arch dam

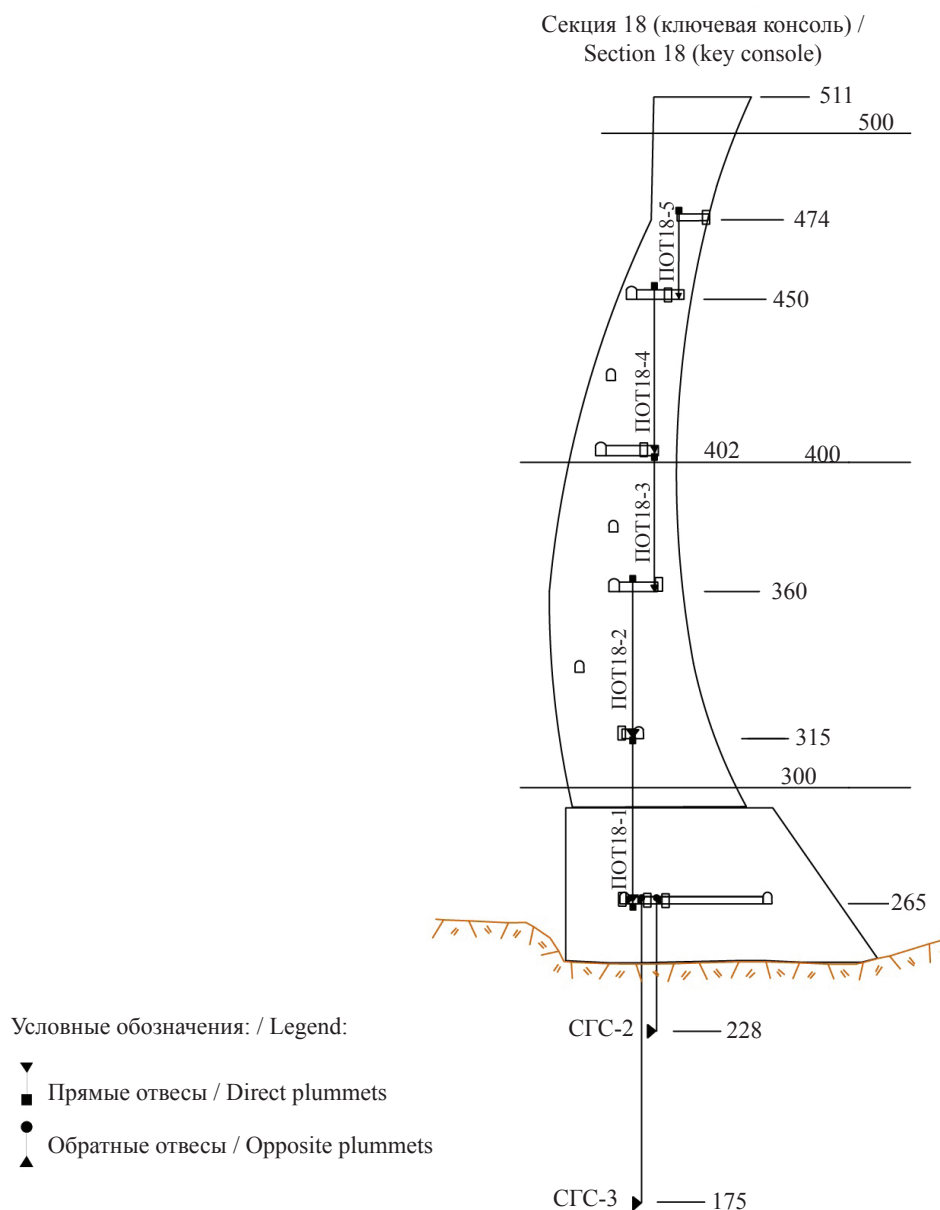


Рис. 2. Схема размещения отвесов в сечении ключевой консоли арочной плотины Ингурской ГЭС

Fig. 2. Diagram of arrangement of plummets in key console section of Inguri HEPS arch dam

Кривая одностороннего нормального закона распределения может быть представлена формулой плотности распределения:

$$f(\tilde{L}_j) = \sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} e^{-\frac{\tilde{L}_j^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Зная величины \tilde{L}_j и σ , вычисляли плотность распределения $f(\tilde{L}_j)$ а затем из соотношения

$$\tilde{P}_j = \frac{f(\tilde{L}_j)}{\sum_{j=1}^N f(\tilde{L}_j)} \quad (5)$$

— теоретические относительные частотные скачки перемещений P_j .

Полученные таким образом экспериментальные P_j и теоретические \tilde{P}_j относительные частоты для скачков горизонтальных перемещений, выраженные в процентах, приведены в табл. 2.

По оси ординат откладывали относительные частоты скачков перемещений в процентах, а по оси абсцисс — расстояния L_j в метрах и, пользуясь данными приведенными выше, наносили на график точки экспериментальной (---) и теоретической (—) частотной кривой (рис. 2). Построенные кривые наглядно показывают близость экспериментальной и теоретической частотной характеристик для скачков перемещений.

Табл. 2. Частоты скачков горизонтальных перемещений

Table 2. Horizontal displacement jump frequencies

$P_j, \%$	8,6	5,4	5,3	3,5	1,6	0,6
$\tilde{P}_j, \%$	7,4	6,6	5,1	3,5	1,6	0,75

Таким образом, частоты скачков горизонтальных перемещений по высоте плотины можно аппроксимировать односторонним законом распределения.

Теперь, когда установлен закон распределения, можно решить задачу о рациональном размещении отвесов в сооружении. Математическая модель Барлоу – Хантера – Прошана позволяет использовать экономический критерий на базе частотных характеристик безаварийной работы сооружения и получить рекуррентные соотношения для последовательности вертикальных координат отвесов, фиксирующих их размещение:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{F(x_k) - F(x_{k-1})}{f(x_k)} - \frac{C_1}{C_2}, \quad (6)$$

где C_1 — стоимость установки одной ИС (отвеса); C_2 — стоимость необнаружения отказа работы плотины, приходящаяся на 1 м погонной длины; $F(x)$ — функция распределения безаварийной работы плотины; $f(x)$ — вероятность безаварийной работы плотины, получаемая путем интерполяции частотной гистограммы измерения горизонтальных перемещений; x_k — текущая координата размещения отвесов.

Практическое использование формулы (6) предполагает предварительный подбор координат x_0 и x_1 на основе соображений физического характера. Последовательность же x_k определяется рекуррентно $\frac{C_1}{C_2} \approx 0$, так как $C_1 \ll C_2$.

Поскольку плотность вероятности $f(x)$ достаточно хорошо интерполируется односторонним нормальным законом распределения, функцию $F(x)$ можно выразить через функцию Лапласа $\Phi(x)$. Приняв $\frac{C_1}{C_2} \approx 0$, формулу (6) после математических преобразований запишем в виде

$$x_{k+1} = x_k + \frac{\sigma}{2} + \frac{\Phi(z_k) - \Phi(z_{k-1})}{f(y_k)}, \quad (7)$$

где $y_k = \frac{x_k}{\sigma}$ и $z_k = \frac{y_k}{\sqrt{2}}$.

Как уже было отмечено, для пользования рекуррентной формулой (6) необходимы два начальных условия. В качестве этих условий зададимся координатами x_0 и x_1 . $x_0 = 0$, а x_1 выбираем поначалу произвольно; в конечном счете остановимся на таком значении x_1 , при котором «функция» $\Delta x(k)$ достаточно быстро приобретает стационарный характер (т.е. перестает зависеть от k).

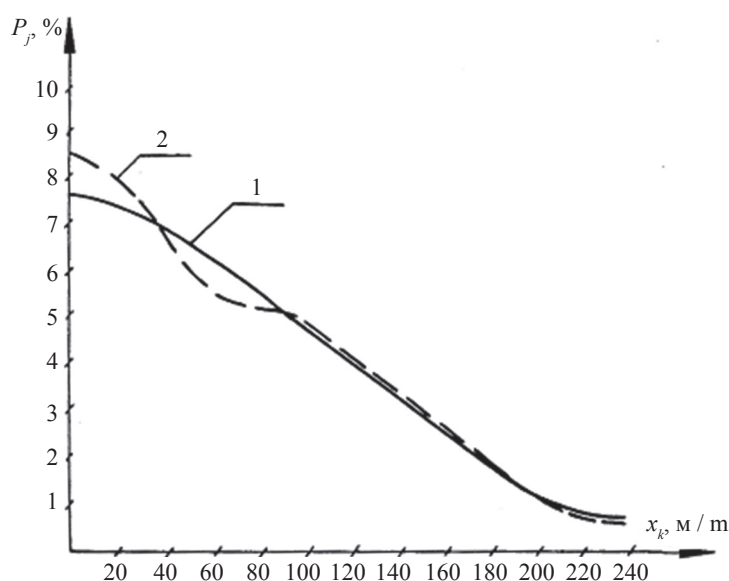


Рис. 3. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые распределения результатов измеренных горизонтальных перемещений ключевой консоли

Fig. 3. Theoretical (1) and experimental (2) curves of result distribution for measured horizontal displacements of key console

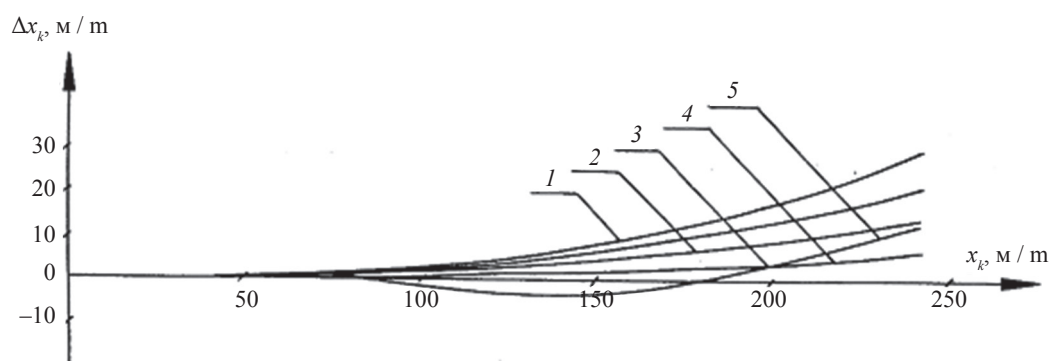


Рис. 4. Графики зависимости рационального размещения отвесов для различных значений x_k : 1 — $x_1 = 65$ м; 2 — $x_2 = 60$ м; 3 — $x_3 = 55$ м; 4 — $x_4 = 50$ м; 5 — $x_5 = 45$ м

Fig. 4. Plumbet rational arrangement curves for various x_k : 1 — $x_1 = 65$ м; 2 — $x_2 = 60$ м; 3 — $x_3 = 55$ м; 4 — $x_4 = 50$ м; 5 — $x_5 = 45$ м

Табл. 3. Прямые отвесы в ключевой консоли при рациональном размещении

Table 3. Direct plumbets in key console under conditions of rational arrangement

Участок консоли / Console segment	x_k , м / x_k , m	y_k	z_k	$f(y_k)$	$\Phi(z_k)$	$L_k = x_{k+1} - x_k$
1	50,0	0,46	0,33	0,38	0,37	51,8
2	101,8	0,95	0,67	0,29	0,67	56,0
3	157,8	1,42	1,01	0,15	0,84	60,8
4	218,6					

На рис. 3 изображено семейство кривых $\Delta x(k)$, определяемых параметром x_1 .

Наилучшим образом указанному условию удовлетворяет значение $x_1 = 50$ м. Именно это значение и было использовано в формуле (7), с помощью которой составлена табл. 3. В эту таблицу сведены результаты вычислений рационального размещения отвесов в ключевой консоли арочной плотины.

Если перейти от координат x_k к уровням, получим, что прямые отвесы в теле плотины следует располагать на уровнях: 24, 190, 138,2 и 11,4 м. Всего потребуется четыре отвеса, т.е. на единицу меньше, чем в ключевой консоли. Следует пояснить, что обратный отвес, относительно которого ведутся наблюдения, устанавливается в скважине на глубине до 50 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения проектных решений по оснащению Ингурской арочной плотины ИС, натурных наблюдений и теоретических исследований статистическими методами анализа и математической модели Барлоу – Хантера – Прошана, установлен вид закона распределения горизонтальных перемещений, позволяющий определять необходимое количество отвесов в теле бетонных плотин. Разработанный метод может быть использован для рационального размещения и других видов ИС, применяемых для контроля технического состояния сооружений [19–21], а также тензометрических розеток, предназначенных для наблюдений за напряженно-деформированным состоянием бетонных плотин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляпичев Ю.П. Проектирование и строительство современных высоких плотин. М. : РУДН, 2004. 275 с.
2. Asnake A., Cagiano A., Ferraro B., Zoppis E. Managing unprecedented RCC challenges at Gibe III dam, Ethiopia // Water Storage & Hydropower Development for Africa. 2015. Pp. 58–63.

3. Escobar C.M., Posada A.M. Recent experience on design, construction and performance of CFRD dams // 6 th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2008. Pp. 1–9.
4. Чоговадзе Г.И., Мгебришвили И.М., Ломов И.Е. Ингурская гидроэлектростанция. М. : Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

5. Марчук А.Н. Некоторые уроки натурных наблюдений на высоких бетонных плотинах // Гидротехническое строительство. 2018. № 4. С. 2–12.

6. Нониев И.К., Шаинян Г.А. Системы инженерной безопасности гидротехнических сооружений // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. VI Междунар. науч. конф., Москва, 14–16 ноября 2018. М. : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2018. С. 217–220.

7. Berga L. Dam Safety // Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona, Spain, 17–19 June. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1998, 1998. Vol. I, II.

8. Затеева Е.Ю. Опыт создания банков данных для контроля состояния крупных ГТС // Гидротехническое строительство. 2015. № 7. С. 42–45.

9. Ye Zhu, Lu Lu. Nonlinear static analysis of Shuibuya dam in China — World's Highest CFRD // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 21. Bund 04. Pp. 1527–1537.

10. Johannesson P., Tohlang S.L. Lessons learned from Mohale // International Water Power & Dam Construction. 2007. Vol. 59. Issue 8. Pp. 16–25.

11. Ma H., Fudong Chi F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // Engineering. 2016. Vol. 2. Issue 3. Pp. 332–339. DOI: 10.1016/j.eng.2016.03.010

12. Wang L.-B., Yan Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. DOI: 10.1109/aprec.2010.5448667

13. Кузнецов Г.И. Результаты геодезических измерений на строящейся Ингурской арочной плотине // Гидротехническое строительство. 1983. № 3. С. 34–38.

14. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rock-fill dams based on case histories // Geotechnique. 2018. Vol. 68. Issue 9. Pp. 749–771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095

15. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М. : Высшая школа, 1979. 400 с.

16. Marques Filho P., De Pinto N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // International Journal on Hydropower and Dams. 2005. No. 12 (1). Pp. 72–76.

17. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.-P. Statistical modelling of thermal displacements for concrete dams: Influence of water temperature profile and dam thickness profile // Engineering Structures. 2018. Vol. 165. Pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.010

18. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.-P. Thermal displacements of concrete dams: Accounting for water temperature in statistical models // Engineering Structures. 2015. Vol. 91. Pp. 26–39. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.047

19. Кафтан В.И., Устинов А.В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 11–19.

20. Устинов А.В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2014. № 6. С. 39–43.

21. Устинов А.В., Кафтан В.И. Технология мониторинга перемещений гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания // Гидротехническое строительство. 2019. № 1. С. 2–7.

Поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 14 марта 2019 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: Шаинян Георгий Артемович — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, sotae@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Lyapichev Yu. P. *Design and construction of modern high dams*. Moscow, RUDN Publ., 2004; 275. (rus.).

2. Asnake A., Cagiano A., Ferraro B., Zoppis E. Managing unprecedented challenges at Gibe III dam, Ethiopia. *Water Storage & Hydropower Development for Africa*. 2015; 58–63.

3. Escobar C.M., Posada A.M. Recent experience on design, construction and performance of CFRD dams. *6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2008; 1–9.

4. Chogovadze G.I., Mghebrishvili I.M., Lomov I.E. *Enguri hydro power plant*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987; 200. (rus.).

5. Marchuk A.N. Some lessons of field observations on high concrete dams. *Hydrotechnical construction*. 2018; 4:2-12. (rus.).
6. Nonjew I.K., Shahinyan G.A. System engineering of safety of hydraulic structures. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : Proceedings of the VI International Scientific Conference, Moscow, 14–16 November 2018*. Moscow, MISI-MGSU Publishing house, 2018; 217-220. (rus.).
7. Berga L. Dam Safety. *Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barselona, Spain, 17–19 June*. A.A. Balke-ma/Rotter-dam/Brookfield/1998, 1998; I-II.
8. Zateeva E.Y. The experience of creating data banks to monitor the status of large HPP. *Hydrotechnical construction*. 2005; 7:42-45. (rus.).
9. Ye Zhu, Lu Lu. Nonlinear static analysis of Shuibuya dam in China — World's Highest CFRD. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2016; 21(04):1527-1537.
10. Johannesson P., Tohlang S.L. Lessons learned from Mohale. *International Water Power & Dam Construction*. 2007; 59(8):16-25.
11. Ma H., Fudong Chi F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams. *Engineering*. 2016; 2(3):332-339. DOI: 10.1016/j.eng.2016.03.010
12. Wang L.-B., Yan Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010. DOI: 10.1109/ap-pec.2010.5448667
13. Kuznetsov G.I. Results of geodetic measurements on the Ingur arch dam under construction. *Hydraulic engineering*. 1983; 3:34-38. (rus.).
14. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rock-fill dams based on case histories. *Geotechnique*. 2018; 68(9):749-771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095
15. Gurman V.E. Guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics. Moscow, Higher school Publ., 1979; 400. (rus.).
16. Marques Filho P., De Pinto N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2005; 12(1):72-76.
17. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.-P. Statistical modelling of thermal displacements for concrete dams: Influence of water temperature profile and dam thickness profile. *Engineering Structures*. 2018; 165:63-75. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.010
18. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.-P. Thermal displacements of concrete dams: Accounting for water temperature in statistical models. *Engineering Structures*. 2015; 91:26-39. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.047
19. Kaftan V.I., Ustinov A.V. Application of global navigation satellite systems for monitoring deformations of hydraulic structures. *Hydrotechnical construction*. 2012; 12:11-19. (rus.).
20. Ustinov A.V. Technology of satellite geodetic monitoring of hydraulic structures. *Hydrotechnical construction*. 2014; 6:39-43. (rus.).
21. Ustinov A.V., Kaftan V.I. Technology of monitoring the movements of hydraulic structures in the process of compensation injection. *Hydrotechnical construction*. 2019; 1:2-7. (rus.).

Received February 19, 2019

Adopted in a modified form March 14, 2019

Approved for publication May 28, 2019

BIONOTES: **Georgy A. Shainyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, sotae@mgsu.ru.