

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

*Антон Викторович Никонов*

АО «Сибтехэнерго», 630032, Россия, г. Новосибирск, ул. Планировочная, 18/1, ведущий инженер; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела e-mail: sibte@bk.ru

*Виктор Александрович Скрипников*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (382)343-29-55, e-mail: v.a.skripnikov@ssga.ru

*Маргарита Александровна Скрипникова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (382)343-29-55, e-mail: m.a.skripnikova@ssga.ru

В статье предлагается при определении деформаций гидротехнических сооружений применять высокоточное тригонометрическое нивелирование. Необходимая точность может быть обеспечена при измерении превышений автоматизированными высокоточными тахеометрами и соблюдении ряда условий. Даются рекомендации по модернизации одного из створов на Новосибирской ГЭС. Приводятся результаты полевых исследований по определению геодезическим методом коэффициента рефракции при моделировании натуральных наблюдений на створе Новосибирской ГЭС. В течение летнего дня (с 10 до 18 часов) зафиксировано изменение коэффициента рефракции в пределах от -0,14 до +0,81, что заметно отличается от стандартного значения +0,13. Поэтому при измерении вертикальных перемещений деформационных марок, расположенных на створе, предлагается периодически выполнять определение коэффициента рефракции и при необходимости вводить в результаты измерений соответствующие поправки.

**Ключевые слова:** тригонометрическое нивелирование, вертикальная рефракция, коэффициент рефракции, гидротехнические сооружения, мониторинг, высокоточный тахеометр

## **APPLICATION OF HIGH-PRECISION TRIGONOMETRIC LEVELING IN DEFORMATION MONITORING OF HYDRAULIC STRUCTURES**

*Anton V. Nikonov*

Sibtechenergo, 18/1, Planirovochnaja St., Novosibirsk, 630032, Russia, Leading Engineer; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, e-mail: sibte@bk.ru

*Victor A. Skripnikov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: v.a.skripnikov@ssga.ru

*Margarita A. Skripnikova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: m.a.skripnikova@ssga.ru

The article proposes to use high-precision trigonometric leveling when determining the deformations of hydraulic structures. The required accuracy can be ensured by measuring the excess with automated high-precision total station and observing a number of conditions. Recommendations are given for the modernization of one of the sections at the Novosibirsk hydroelectric power station. The results of field studies on the determination of the refraction coefficient by the geodetic method are presented. During a summer day (from 10 to 18 hours), a change in the coefficient of refraction was recorded in the range from -0.14 to +0.81, which significantly differs from the standard value of +0.13. Therefore, when measuring the vertical displacements of deformation marks located on the alignment, it is proposed to periodically determine the coefficient of refraction and, if necessary, introduce appropriate corrections into the measurement results.

**Keywords:** trigonometric leveling, vertical refraction, coefficient of refraction, hydraulic structures, monitoring, high-precision total station

### *Введение*

На сегодняшний день при проведении геодезического мониторинга гидротехнических сооружений применяются весьма разнообразные методы и средства измерений. Для контроля плановых смещений успешно применяются ГНСС-приемники, электронные тахеометры, обратные отвесы, датчики углов наклона и др. [1–6]. Причем контроль может производиться как дискретно, путем проведения циклов геодезических измерений с установленной периодичностью [1, 4], так и непрерывно, путем использования разного рода датчиков и систем на основе автоматизированных тахеометров или спутниковой аппаратуры [5–15].

При контроле вертикальных перемещений сооружений традиционно применяется геометрическое нивелирование. Следует отметить, что на действующих промышленных предприятиях, из-за влияния ряда факторов понижения точности измерений, применение цифровых нивелиров или нивелиров с компенсатором при геометрическом нивелировании не всегда обеспечивает необходимую точность измерений. Методики измерений, учитывающие влияние факторов понижения точности, как правило, значительно увеличивают время выполнения работ [3].

К основным факторам понижения точности применительно к условиям измерений на гидротехнических сооружениях (ГТС) можно отнести:

- вибрацию от работающих гидроагрегатов и потока воды [16];
- электромагнитные поля от работающих гидроагрегатов и ЛЭП высокого напряжения [17];
- турбулентность воздуха из-за работающего оборудования и особенностей конструкций ГТС [18, 19].

Альтернативой геометрическому нивелированию может выступить тригонометрическое с применением высокоточных автоматизированных тахеометров. Выбор данного метода может быть обусловлен возможностью установки элек-

тронного тахеометра в месте, обеспечивающем минимизацию воздействия факторов понижения точности. Это достигается за счет увеличения расстояния от прибора до деформационных марок до 200–300 м. На таких расстояниях применение тахеометров со средней квадратической ошибкой измерения вертикальных углов (СКО) не более 1" за счет многократных измерений позволяет получать СКО определения превышений до 0,3–0,5 мм.

Обеспечение заданной точности контроля вертикальных деформаций методом тригонометрического нивелирования при длине визирного луча до 250 м требует соблюдения ряда методических условий:

- минимальное отклонение визирной линии тахеометра от горизонтального положения;
- выполнение повторных измерений в условиях, максимально одинаковых с предыдущими циклами измерений;
- определение отметок деформационных марок дважды, при установке тахеометра сначала на одном, а затем на противоположном конце створа;
- контроль стабильности коэффициента рефракции по измеряемым направлениям.

В любом случае, решение о применении тригонометрического нивелирования при мониторинге ГТС необходимо принимать только после всестороннего анализа условий измерений и оценки возможностей имеющихся тахеометров.

### *Методы и материалы*

Рассмотрим использование метода тригонометрического нивелирования применительно к наблюдениям за осадкой марок, расположенных на наружных створах бетонных ГТС Новосибирской гидроэлектростанции. Оба створа находятся в зоне влияния вибрации от работающих гидроагрегатов и потока воды (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид места расположения створа на трансформаторной площадке ГЭС

Первый створ расположен на трансформаторной площадке здания ГЭС, второй – на бычках водосливной плотины. Длина каждого створа равна 200 м.

Наиболее сложные условия измерений, связанные с вибрационным воздействием, наблюдаются на створе, расположенном на трансформаторной площадке. Схема створа приведена на рис. 2. Опорные пункты створа А и Б находятся в зоне вибрации. Контрольные пункты створа от I до XII располагаются попарно по краям блоков плотины. Расстояние между парами пунктов составляет 24 м.

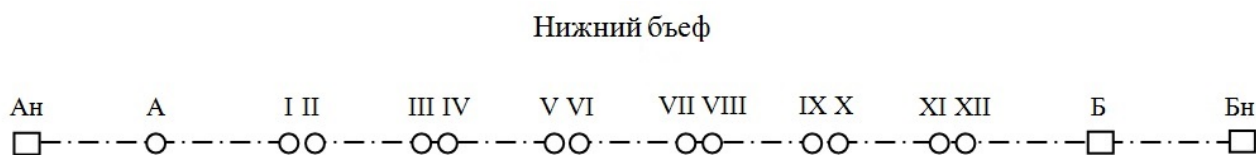


Рис. 2. Схема створа на трансформаторной площадке

Для уменьшения влияния вибрации на тахеометр предлагается расположить дополнительный пункт «Ан» вне бетонной части ГЭС, что значительно уменьшит амплитуду вибрации. Второй опорный пункт «Бн» будет располагаться на бычке водосливной плотины.

Для контроля значения вертикальной рефракции предлагается выполнять измерения по определению ее значения в процессе измерений. Отметки пунктов «Ан» и «Бн» предполагается определять методом геометрического нивелирования I класса от исходных реперов, расположенных на территории ГЭС. Тогда базис Ан–Бн может использоваться для периодического определения коэффициента рефракции по формуле:

$$k = 1 - \frac{2R}{S^2}(h - S \operatorname{tg} \alpha), \quad (1)$$

где  $R$  – радиус Земли (6371 км);

$h$  – превышение между концами базиса из геометрического нивелирования;

$S$  – длина базиса;

$\alpha$  – измеренный угол наклона.

Для проверки точности измерений вертикального угла автоматизированным тахеометром Leica TCR 1201+ и исследования влияния вертикальной рефракции на результаты измерений были выполнены полевые исследования. Условия проведения эксперимента были максимально приближены к условиям циклических измерений на створе: визирный луч проходил над асфальтированной поверхностью, подстилающая поверхность не подвергалась прямому солнечному нагреву. Длина базиса была выбрана 260 м, концы базиса закреплялись штативами. Эталонное превышение  $h_{\Gamma}=5056,75$  мм было получено методом геометрического ни-

вেলіроваўня с іспользаўаннем высокаточнага дыфравогана нівеліра DiNi 0.3 і камплекта інварных реек (табліца).

### Результаты геометрического нивелирования

Направление хода	Время	Число штативов	Превышение, мм	Среднее, мм
Прямо	8:30	7	+5057,0	+5056,75
Обратно	19:30	8	-5056,5	

Нівелірны́ ход для кантраля ўстойчывасці штатываў пракладываўся дважды – да і пасле асновай часты эксперыменту. Как відно із табл. 1, разнасць прывышэнняў із прамогана і абратнога ходаў саставіла 0,5 мм, што сагласуецца с тачнасцю прымянаемага камплекта нівеліра і свідетельсваует о неподвжнана штатываў на канцах базыса.

В процесе ісследованія тахеометр устанавліваўся на адном канце базыса, а отражатель – на другом. В течение дня (с 10 ч до 18 ч) с периодичностью 30 минут выполнялись серии наблюдений на отражатель. Длительность серии наблюдений составляла три минуты. Температура воздуха при выполнении измерений возрастала от плюс 23 °С (10 ч утра) до плюс 28 °С (18 ч дня).

Наведение тахеометра на отражатель осуществлялось в автоматическом режиме. В каждой серии выполнялось по 16 приемов измерений при двух кругах тахеометра. Средние квадратические ошибки (СКО) измерения угла наклона, вычисляемые для каждой серии наблюдений по формуле Бесселя, колеблются в пределах от 0,56" до 1,77". Среднее значение СКО по всем сериям составило 1,06". Данные результаты хорошо согласуются с паспортной точностью автоматической системы наведения тахеометра, составляющей 2".

По формуле (1) с использованием средних значений углов наклона  $\alpha$  по сериям измерений вычислялись значения коэффициента рефракции. На рис. 3 показан график изменения коэффициента рефракции с течением времени.

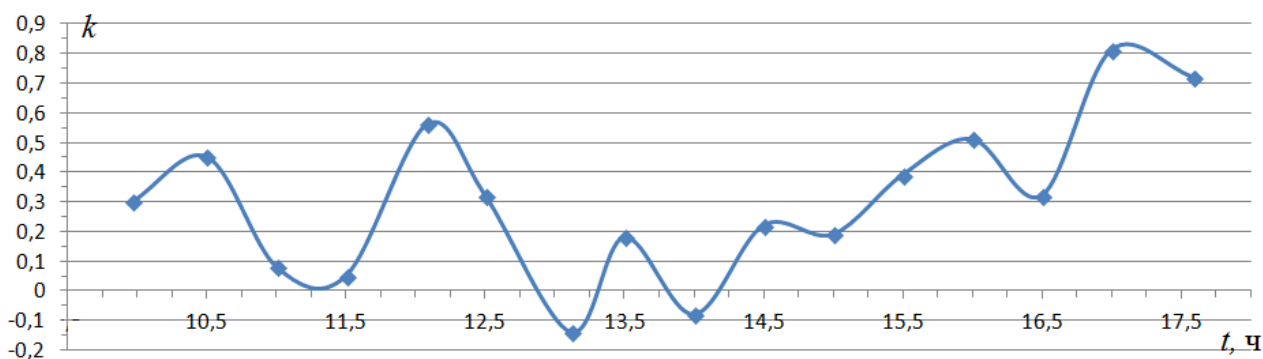


Рис. 3. График изменения коэффициента рефракции в течение дня

Теоретическое значение угла наклона вычислялось с использованием формулы [20]:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{S} - \frac{S}{2R}. \quad (2)$$

Средние по серии значения углов наклона уклонялись от теоретического значения от минус 0,58" до 3,41". На графике после установления с 13 ч небольшого температурного градиента можно отметить устойчивый тренд на повышение коэффициента рефракции.

### *Обсуждение*

Известно, что в приземных слоях атмосферы, особенно при высоте визирного луча до 2 м, коэффициент рефракции в течение дня может изменяться в значительных пределах: от минус 2,0 до плюс 4,0 [19–21], а в отдельных случаях и превосходить эти значения [21]. Наибольшие коэффициенты рефракции характерны для направлений с подстилающей поверхностью в виде пашни, асфальта, интенсивно нагреваемой солнечной энергией. Измерения, проводимые на Новосибирской ГЭС, отличаются тем, что большую часть дня створ с деформационными марками находится в тени от здания машинного зала, следовательно, будут ожидать небольшие по величине и сравнительно стабильные во времени коэффициенты рефракции. В проведенном эксперименте коэффициент рефракции колеблется в пределах от минус 0,14 до плюс 0,81, что является для данных условий наблюдений и точности применяемого тахеометра вполне ожидаемым. Общий тренд, заключающийся в увеличении коэффициента рефракции в течение светового дня, является характерным явлением при выполнении геодезических измерений [21].

### *Заключение*

Опираясь на результаты проведенных исследований, сформулируем основные выводы:

– при наблюдениях за вертикальными деформациями ГТС замена геометрического нивелирования тригонометрическим нивелированием в ряде случаев позволяет ослабить факторы понижения точности измерений;

– при наблюдениях за деформациями ГТС рекомендуется применять высокоточные (СКО измерения углов <1") автоматизированные тахеометры;

– при выполнении тригонометрического нивелирования целесообразно периодически определять коэффициент вертикальной рефракции и вносить в результаты измерений соответствующие поправки.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Никонов А. В., Чешева И. Н., Рябова Н. М. Разработка программы геодезического мониторинга деформаций гидротехнического сооружения ГРЭС – двухступенчатого перепада //

Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Т. 1 – С. 3–12.

2. Скрипников В. А., Скрипникова М. А. Геодезические наблюдения за горизонтальными смещениями плотин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 9–12.

3. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып.4 (24). – С. 12–18.

4. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.

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

6. Скрипникова М. А., Ашраф А. Бешр, Рябова Н. М. Разработка методики определения горизонтальных смещений стенок шлюза // Геодезия и картография. – 2010. – № 6. – С. 17–21.

7. Хиллер Бернд, Сухов И. В., Ли В. Т. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехника. – 2015. – № 2. – С. 12–15.

8. Хиллер Бернд, Ямбаев Х. К. Исследование автоматизированной системы деформационного мониторинга шлюзовых камер // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 3. – С. 33–38.

9. Хиллер Бернд, Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.

10. Скрипникова М. А. Возможности применения автоматизированных высокоточных электронных тахеометров при измерении деформаций инженерных сооружений // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 1. – С. 131–134.

11. Сальников В. Г., Скрипников В. А., Скрипникова М. А., Хлебникова Т. А. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Том 23, № 3. – С. 108–124.

12. Козлов Р.В., Ли В, Моргунов К.П. Использование современных средств измерения деформаций при исследовании сооружений Волгоградского гидроузла // Вестник гос. унив-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. № 1. – С. 95–110.

13. Скрипников В. А., Скрипникова М. А. Совершенствование схем планового обоснования для определения горизонтальных смещений гидротехнических сооружений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 97–100.

14. Резник Б. Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений // Геопрофи. – 2008. – № 4. – С. 4–10.

15. Резник Б. Е. Методика контроля фундаментов ВЭУ при непрерывном мониторинге // Геопрофи. – 2016. – № 6. – С. 40–47.

16. Кирьянов Ю. В. Анализ влияния вибрации на точность визирования при высокоточном геометрическом нивелировании // Геодезия и картография. – 1990. – № 3. – С. 12–16.

17. Кметко И. Н., Пандул И. С., Литинский В. О. Влияние электромагнитного поля ЛЭП на результаты геометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 1984. – №1. – С. 27–29.

18. Скрипников В. А., М. А. Скрипникова М. А. Исследование влияния турбулентности на погрешность визирования для автоматизированного тахеометра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т.1, № 1. – С. 217–222.

19. Никонов А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – №1. – С.28–34.

20. Дрок М. К. Исследование влияния вертикальной рефракции при одностороннем геодезическом нивелировании через водные пространства // Научные записки Львовского политех. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1961. – № 6. – С. 154–182.

21. Hirt C., Guillaume S., Wisbar A., Bürki B. and Sternberg H. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements // Journal of Geophysical Research (JGR).–2010.–115, D21102.

22. Determination of refraction coefficient by geodetic method on the short basis in winter condition // G. A. Ustavich, A. V. Nikonov, V. A. Skripnikov, M. A. Skripnikova. Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112081X (18 December 2019); doi: 10.1117/12.2540634.

© А. В. Никонов, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, 2021