

УДК 528.546
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-49-54

Российский опыт разработки, создания и применений прецизионных устройств гидростатических нивелиров на объектах научного, гражданского и промышленного назначений

И. Ю. Васютинский¹, С. И. Васютинская^{1}, С. П. Буюкян², Н. А. Кузюнов²*

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

²ООО «Монитрон», г. Москва, Российская Федерация

* e-mail: st.vass@yandex.ru

Аннотация. В хронологическом порядке рассмотрен процесс разработки и использования в стране устройств гидростатического нивелирования, обеспечивающих прецизионную точность высотного положения наблюдаемых объектов в процессе эксплуатации или строительства и дистанционность получения необходимой информации. Первые системы гидростатического нивелирования такого рода, основанные на контактном способе регистрации положения уровня жидкости в сосудах, были разработаны и установлены на объектах физики высоких энергий для наблюдения за высотным положением электромагнитов Ереванского синхротрона и Серпуховского синхрофазотрона. В дальнейшем особое внимание было уделено устройствам и системам, основанным на бесконтактном способе автоматизированного считывания и обработки информации с использованием компьютерной техники, что позволило существенно уменьшить погрешности измерений до доли миллиметра и время до единиц секунд. Рассмотрена принципиальная схема устройства видеоуровнемера, получившая последовательное развитие. Большинство разработанных устройств запатентовано. На основе новейших разработок устройств видеогидростатических нивелиров по мере совершенствования их конструкций, их характеристик выполнены работы по мониторингу высотных деформаций гражданских и строительных объектов. Рассмотренные разработки можно использовать для наблюдений за деформациями крупных строительных объектов в процессе эксплуатации, например, плотин гидроэлектростанций, при высотном строительстве (небоскребов) и др.

Ключевые слова: гидростатическое нивелирование, устройства, контактный способ, бесконтактный способ, видеоизмерения, видеоуровнемеры, параметры, научные объекты, строительные объекты, гражданские объекты

Введение

При строительстве гидротехнических и других сооружений человечество издревле использовало свойство свободной поверхности жидкости в поле земного притяжения устанавливаться горизонтально (перпендикулярно направлению силы тяжести). На этом свойстве основана работа системы сообщающихся сосудов гидростатического нивелирования, установленных в контролируемых точках сооружения. При этом изменения взаимного высотного положения точек приводят к пропорциональному изменению уровня жидкости в сосудах системы, что служит основой для измерений [1].

Методы и устройства

Одной из главных задач при создании устройств гидростатического нивелирования является выбор метода измерения уровня жидкости в сосудах. Многообразие методов приводит к многообразию устройств гидростатического нивелира. Простейшим методом, обеспечивающим погрешность измерений в единицы миллиметра, является визуальное считывание уровня жидкости с помощью прозрачного окна со шкалой, установленной на боковой стенке каждого сосуда.

Его основными недостатками являются: нечеткость границы жидкости, наблюдаемой в окне, ввиду наличия мениска, зависимость

результата измерений от угла зрения оператора, ошибки оператора, значительное время измерений, необходимость ручной записи результатов измерений в специальном журнале с их последующей камеральной обработкой.

В результате погрешность таких измерений составляет порядка 1 мм. Такая величина погрешности приемлема при некоторых строительств работ, но неприемлема для прецизионных измерений при решении специальных задач. В 60-х гг. XX в. в стране выпускали гидростатические нивелиры (УГС модель 115), работа которых была основана на контактно-механическом методе регистрации положения уровней жидкости в сосудах [1]. Точность таких устройств была достаточно высокая, но по другим характеристикам эти гидростатические нивелиры также не отвечали современным требованиям.

Преимуществами использования современных устройств гидростатического нивелирования являются, во-первых, обеспечение очень высокой точности измерений, исчисляемой единицами десятых долей миллиметра, во-вторых, получение необходимой информации дистанционно, особенно в условиях стесненности, необходимости соблюдать безопасность работы персонала, радиационных фонов и др. Поэтому разработки конструкций устройств гидростатического нивелирования были направлены на решение задач увеличения производительности, точности и безопасности в сложных условиях сооружения объектов научного, строительного и гражданского профилей.

Практически первой в нашей стране разработкой, обеспечивающей указанные преимущества, была гидростатическая система Ереванского электронного кольцевого ускорителя (ЭКУ) (1968–1969 гг.) [2, 3]. Основным разработчиком был Государственный специализированный проектный институт (ГСПИ).

Задачей было слежение положения по высоте отклоняющих магнитов в условиях повышенного фона радиации.

В 1977–1978 гг. экспериментальная гидростатическая система была испытана на синхрофазотроне мощностью 10 ГэВ Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), разработчик и изготовитель Мос-

ковский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК). На каждом квадранте ускорителя было установлено шесть сосудов гидростатического нивелирования по два на торцах квадранта и по два в его середине.

В 1986–1988 г. такая же система уже была установлена Ереванским физическим институтом на платформе с экспериментальным оборудованием восточного павильона Ереванского ЭКУ.

Подобная экспериментальная система была разработана и установлена на элементах электротехнического оборудования Серпуховского протонного ускорителя У-70, г. Протвино Московской области.

В перечисленных системах гидростатического нивелирования использовался контактный способ с фотоэлектрической регистрацией положения уровня жидкости в сосудах. Информация поступала на пульт управления. Недостатком датчиков уровня жидкости всех этих систем являлось наличие подвижных механизмов, что ограничивало долговечность их работы.

Современные методы измерения уровня жидкости в сосудах гидростатического нивелира основаны на бесконтактном способе автоматизированного считывания и обработки информации с использованием компьютерной техники и технологии, что позволяет существенно уменьшить погрешность и время измерений (десятые и сотые доли миллиметра, единицы секунд), отображать результаты измерений на мониторе компьютера в режиме реального времени и автоматически архивировать их в специальном файле в энергонезависимой памяти компьютера.

К числу современных относится метод видеоизмерений [4], основанный на компьютерной обработке изображений визирных целей (ВЦ) в видеокадре телевизионного видеосигнала (ТВ), отраженных от поверхности жидкости, уровень которой измеряется. На основе этого метода создан ряд видеуровнемеров (ВУ) [5–11], их работа поясняется рисунком, на котором изображены: сосуды С1–Сп, заполненные жидкостью, видеодатчики ВД1–ВДп, видеопроцессоры ВП1–ВПп, линия связи (ЛС) и компьютер (ПК).

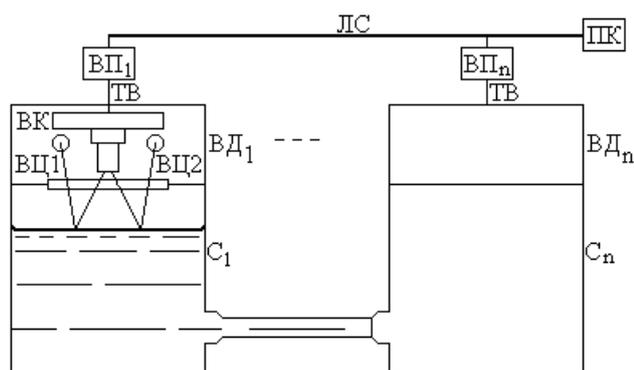


Схема видеоуровнемера гидростатического нивелира

Видеокамерой ВК в ВД формируется ТВ, в котором содержатся изображения ВЦ1-ВЦ2, отраженные от поверхности жидкости. Масштаб этих изображений пропорционален измеряемому уровню жидкости, что служит основой для измерений.

ТВ обрабатывается в ВП [12–14], в котором выделяются координаты контурных точек изображений. Эти координаты в виде массивов цифровых данных по ЛС (RS-485) передаются в ПК, обрабатываются в нем и вычисляются искомые параметры измерений.

Результаты измерений в режиме реального времени отображаются на мониторе ПК и записываются в архивном файле с именем по дате выполнения измерений.

Работа ВП осуществляется под управлением микроконтроллерной программы, записанной в энергонезависимой памяти микроконтроллера, а работа в целом гидростатического нивелира – под управлением специальной прикладной компьютерной программы, записанной в энергонезависимой памяти ПК.

Уровень жидкости в сосуде вычисляется по формуле

$$h = \frac{C}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - h_0,$$

где C – константа, определяемая на основе калибровочных измерений, мм·пиксель; X, Y – координаты центров изображений ВЦ в видеокадре ТВ, пиксель; h_0 – начальный уровень жидкости в сосуде, мм.

Основные технические параметры ВД представлены в таблице.

Основные технические параметры ВД

Параметр	Единица измерения	Значение	Примечание
Диапазон измерений, не менее	мм	100	При необходимости может быть увеличен
Среднее квадратическое отклонение результатов измерений, не более	мм	0,1	–
Максимальное число ВД, подключаемых к ЛС	шт.	256	Подключаемых к одному порту RS-485

Объекты внедрения последних запатентованных разработок

На основе новейших разработок устройств видеогидростатических нивелиров по мере совершенствования их конструкций и характеристик (с указанными ниже ссылками на литературные источники) выполнены работы по мониторингу высотных деформаций гражданских и строительных объектов (www.monitron.ru):

– здания-памятника архитектуры при проходке тоннелей по объекту: продление

линии метрополитена от ст. «Московская» до ст. «Стрелка», г. Нижний Новгород, 2016 г. [5, 12];

– фундаментов центрифуги при выполнении работ по компенсационному нагнетанию для выравнивания сооружения после тоннелепроходческих работ по объекту: ТПК ст. «Деловой центр» – ст. «Нижняя Масловка», г. Москва, октябрь 2017–18 гг. [6, 13];

– торгового центра «Драйв» при выполнении тоннелепроходческих работ по объекту: КЖЛ ст. «Авиамоторная» – ст. «Некрасовка», г. Москва, 2017 г.;

– конструкций ст. м. «Савеловская» при строительстве перегонных тоннелей по объекту: ТПК ст. «Деловой центр» – ст. «Нижняя Масловка», г. Москва, 2017 г.;

– конструкций здания родильного дома № 8 при выполнении тоннелепроходческих работ по объекту: КЖЛ ст. «Авиамоторная» – ст. «Некрасовка», г. Москва, 2017 г. [14];

– конструкций Карамышевского шлюза при проходке двух тоннелей метрополитена по объекту: Западный участок ТПК ст. «Хорошевская» – ст. «Можайская», г. Москва, 2018 г. [14];

– конструкций бизнес-центра «Рязанский» при строительстве котлована станции метрополитена по объекту: КЖЛ ст. «Авиамоторная» – ст. «Некрасовка», г. Москва, 2019 г. [7, 8];

– действующего участка Московского метрополитена ст. «Филатов луг» – ст. «Саларьево» Сокольнической линии на ПК0229+70 и ПК0229+98, г. Москва, 2020 г. [9–11].

Разработана и изготовлена аппаратура видеогидростатического нивелирования для мониторинга вертикальных деформаций комплекса промышленной гамма-установки Центра ядерных исследований и технологий (Болливия).

Рассмотренные разработки современных высокоточных устройств и систем гидростатического нивелирования с дистанционным съемом информации целесообразно и эффективно применять при наблюдениях за деформациями крупных строительных объектов в процессе эксплуатации, например, плотин гидроэлектростанций, при мониторинге конструкций в полях ветровой электрогенерации, при высотном строительстве (небоскребов) и др. [15, 16].

Разработка и производство видеогидростатического нивелирования успешно осуществляются в настоящее время в ООО «МОНИТРОН», г. Москва, www.monitron.ru.

Заключение

В хронологическом порядке рассмотрен опыт создания и использования в СССР и России метода и устройств гидростатического нивелирования на объектах научного и гражданского строительства. Основными чертами разработанных и используемых видеогидростатических нивелиров являются высокая производительность, точность, дистанционность получения информации, простота и надежность в эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васютинский И. Ю. Гидронивелирование. – М. : Недра, 1983. – 180 с.
2. Васютинский И. Ю., Буюкян С. П., Давидян Д. Б. Устройство для измерения уровня жидкости : Авт. св. СССР. № 2417,5 кл. 42 с. 6 том «открытий и изобретений». – 1969. – № 14.
3. Васютинский И. Ю., Сальман А. Г. Система дистанционного съема информации о высотном положении магнитных блоков ускорителей // Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М. : ВИНТИ, 1968. – С. 571–573.
4. Буюкян С. П. Видеоизмерение в инженерной геодезии // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 6. – С. 27–34.
5. Буюкян С. П., Рязанцев Г. Е. Отсчетное устройство гидростатического нивелира : патент на изобретение RU № 2112922. – Бюл. № 16. – 1998.
6. Буюкян С. П., Галушков В. В., Кузянов Н. А., Медведев Г. М. Способ измерения уровня жидкости в гидростатическом нивелире : патент на изобретение RU № 2693007. – Бюл. № 19. – 2018.
7. Буюкян С. П., Галушков В. В. Способ измерения уровня жидкости в сосудах гидростатического нивелира : патент на изобретение RU № 2690088. – Бюл. № 16. – 2019.
8. Буюкян С. П., Галушков В. В., Кузянов Н. А. Видеодатчик видеоизмерительной системы : патент на изобретение RU № 2691160. – Бюл. № 17. – 2019.
9. Буюкян С. П., Галушков В. В., Васютинский И. Ю. Цифровой видеогидростатический нивелир // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 503–505.
10. Буюкян С. П., Галушков В. В., Кузянов Н. А. Видеодатчик гидростатического нивелира : патент на изобретение RU № 2689282. – Бюл. № 15. – 2019.
11. Буюкян С. П. Видеодатчик для измерения уровня жидкости в сосудах гидростатического нивелира : патент на изобретение RU № 2730382. – Бюл. № 24. – 2020.

12. Буюкян С. П. Видеопроцессор для обработки видеосигнала в видеоизмерительных системах : патент на изобретение RU № 2395929. – Бюл. № 21. – 2010.
13. Буюкян С. П. Видеопроцессор для видеоизмерений : патент на изобретение RU № 2598790. – Бюл. № 27. – 2016.
14. Буюкян С. П., Кузянов Н. А., Васютинский И. Ю. Специализированный видеопроцессор для видеоизмерений при решении задач прикладной геодезии // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 136–139.
15. Жидков А. А., Васютинский И. Ю., Васютинская С. И. Современные технологии геодезического обеспечения высотного строительства // Геодезия и картография. – 2021. – № 6. – С. 10–17.
16. Васютинский И. Ю., Ознамец В. В., Буюкян С. П., Жидков А. А. Некоторые направления развития и объекты использования методов высокоточной прикладной геодезии // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 4–44.

Об авторах

Игорь Юрьевич Васютинский – доктор технических наук, профессор кафедры геодезии.

Станислава Игоревна Васютинская – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики.

Сурен Петросович Буюкян – доктор технических наук, главный специалист.

Николай Алексеевич Кузянов – инженер-программист.

Получено 05.09.2022

© И. Ю. Васютинский, С. И. Васютинская, С. П. Буюкян, Н. А. Кузянов, 2022

Russian experience in the development, creation and application of precision hydrostatic leveling devices at scientific, civil and industrial facilities

I. Y. Vasyutinskiy¹, S. I. Vasyutinskaya^{1}, S. P. Buyukyan², N. A. Kuzyanov²*

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

² Monitron LLC, Moscow, Russian Federation

* e-mail: St.vass@yandex.ru

Abstract. In chronological order, the process of developing and using hydrostatic leveling devices in the country, providing precision accuracy of the altitude position of the observed objects during operation or construction and the remoteness of obtaining the necessary information, is considered. The first hydrostatic leveling systems of this kind, based on the contact method of registering the position of the liquid level in vessels, were developed and installed at high-energy physics facilities to monitor the altitude position of the electromagnets of the Yerevan synchrotron and Serpukhov synchrotron. In the future, special attention was paid to devices and systems based on the contactless method of automated counting and processing of information using computer technology, which significantly reduced measurement errors to a fraction of a millimeter and time to units of seconds. The schematic diagram of the video level camera device, which has received consistent development, is considered. Most of the developed devices are patented. Based on the latest developments of video hydrostatic leveling devices, as their designs and characteristics are improved, work has been carried out to monitor high-altitude deformations of civil and construction facilities. The considered developments can be used to observe deformations of large construction objects during operation, for example, hydroelectric dams, during high-rise construction (skyscrapers), etc.

Keywords: hydrostatic leveling, devices, contact method, contactless method, video measurements, video level meters, parameters, scientific objects, construction objects, civil objects

REFERENCES

1. Vasyutinsky, I. Y. (1983). *Gidronivelirovanie [Gidronivelirovanie]*. Moscow: Nedra Publ., 180 p. [in Russian].
2. Vasyutinsky, I. Yu., Buyukyan, S. P., & Davidyan, D. B. (1969). Device for measuring the liquid level. Author of the Holy USSR. No. 2417,5 cl. 42 p. 6 volume "discoveries and inventions", No. 14 [in Russian].

3. Vasyutinsky, I. Yu., & Salman, A. G. (1968). System of remote removal of information on the altitude position of magnetic accelerator blocks. In *Trudy Vsesoyuznogo soveshchaniya po uskoritelyam zaryazhen-nykh chastits [Proceedings of the All-Union Conference on Accelerators of Charged Particles]* (pp. 571-57). Moscow: VINITI Publ. [in Russian].
4. Buyukyan, S. P. (2002). Video measurement in engineering geodesy. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 6, 27–34 [in Russian].
5. Buyukyan, S. P., & Ryazantsev, G. E. (1998). Hydrostatic leveling device. Patent for invention RU No. 2112922.
6. Buyukyan, S. P., Galushkov, V. V., Kuzyanov, N. A., & Medvedev, G. M. (2018). Method of measuring the level of liquid in a hydrostatic level. Patent for invention RU No. 2693007.
7. Buyukyan, S. P., & Galushkov, V. V. (2019). Method of measuring the liquid level in hydrostatic leveling vessels. Patent for invention RU No. 2690088.
8. Buyukyan, S. P., Galushkov, V. V., & Kuzyanov, N. A. (2019). Video sensor of video measuring system: Patent for invention RU No. 2691160.
9. Buyukyan, S. P., Galushkov, V. V., & Vasyutinsky, I. Yu. (2019). Digital video hydrostatic level. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 63(5), 503–505 [in Russian].
10. Buyukyan, S. P., Galushkov, V. V., & Kuzyanov, N. A. (2019). Video sensor of hydrostatic pressure. Patent for invention RU No. 2689282.
11. Buyukyan, S. P. (2020). Video sensor for measuring the level of liquid in vessels of hydrostatic leveling. Patent for invention RU No. 2730382.
12. Buyukyan, S. P. (2010). Video processor for video signal processing in video measuring systems. Patent for invention RU No. 2395929.
13. Buyukyan, S. P. (2016). Video processor for video measurements. Patent for invention RU No. 2598790.
14. Buyukyan, S. P., Kuzyanov, N. A., & Vasyutinsky, I. Yu. (2018). Specialized video processor for video measurements in solving problems of applied geodesy. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 62(2), 136–139 [in Russian].
15. Zhidkov, A. A., Vasyutinsky, I. Yu., & Vasyutinskaya, S. I. (2021). Modern technologies of geodetic support for high-rise construction. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 10–17.
16. Vasyutinsky, I. Yu., Oznamets, V. V., Buyukyan, S. P., & Zhidkov, A. A. (2019). Some directions of development and objects of using methods of high-precision applied geodesy. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 63(1), 4–44 [in Russian].

Author details

Igor Y. Vasyutinsky – D. Sc., Professor, Department of Geodesy.

Stanislava I. Vasyutynskaya – Ph. D., Associate Professor, Department of Economics.

Suren P. Buyukyan – D. Sc., Chief Specialist.

Nikolay A. Kuzyanov – Software-Engineer.

Received 05.09.2022

© I. Y. Vasyutinskiy, S. I. Vasyutinskaya, S. P. Buyukyan, N. A. Kuzyanov, 2022