



# ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный  
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ПАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

АО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 5

май

2021

## Содержание

### Проектирование, строительство, эксплуатация

- Волынчиков А. Н.** Перспективы увеличения мощности Богучанской ГЭС . . . . . 2
- Александров А. В.** Эксплуатационная безопасность Загорской ГАЭС-2 при выравнивании здания станции . . . . . 8
- Симутин А. Н., Дейнеко А. В., Зерцалов М. Г.** Опыт использования отечественной автоматизированной системы гидростатического нивелирования “Монитрон” при мониторинге гидротехнических сооружений . . . . . 14
- Кузьменко А. П., Сабуров С. В., Короленко Л. А., Шутко В. П.** Результаты обработки данных автоматизированной системы сейсмометрического контроля Зейской ГЭС . . . . . 20
- Сидоров А. А., Аболмасов В. И., Косолапов К. О., Кузнецов А. В., Архипов М. А.** Многофункциональное противоразгонное устройство . . 28

### Расчёты, исследования, эксперименты

- Гурьев А. П., Ханов Н. В., Верхоглядова А. С., Козлов Д. В., Абидов М. М.** Факторы, определяющие достоверность результатов модельных исследований местных размывов отброшенной струёй . . . . . 33
- Гусев А. А.** Общее и особенное в формировании волны прорыва и течения за ее фронтом для разных случаев разрушения плотины . . . . . 41
- Вербицкий В. С., Ходзинская А. Г.** Гидравлическая модель атмосферной турбулентности . . . . 45
- На обложке – Новосибирская ГЭС

## Опыт использования отечественной автоматизированной системы гидростатического нивелирования “Монитрон” при мониторинге гидротехнических сооружений

Симутин А. Н.<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, генеральный директор,  
 Дейнеко А. В.<sup>2</sup>, кандидат техн. наук, начальник отдела  
 расчётных обоснований (ООО “Сигма Тау”),  
 Зерцалов М. Г.<sup>3</sup>, доктор техн. наук, профессор (НИУ МГСУ)

В статье обсуждается вопрос мониторинга гидротехнических сооружений (ГТС), относящихся к объектам повышенной опасности. Учитывая это, мониторинг должен обеспечивать надёжность и работоспособность гидросооружения в течение всего срока его эксплуатации. Особое внимание необходимо уделять контролю осадок ГТС, являющихся одной из основных причин возникновения аварийных ситуаций, приводящих к потере сооружением работоспособности, а в отдельных случаях, к его полному разрушению. Сравниваются различные системы наблюдения за осадками ГТС. Отмечается, что в последнее время во всём мире широко используются автоматизированные системы гидростатического нивелирования, характеризующиеся высокими эксплуатационными качествами и позволяющие в режиме реального времени получать результаты наблюдений. В качестве примера рассмотрен опыт применения отечественной автоматизированной системы гидростатического нивелирования “Монитрон”, показавшей эффективность и надёжность при мониторинге осадок различных инженерных сооружений.

**Ключевые слова:** автоматизированный мониторинг, гидростатическое нивелирование.

## Experience of using the domestically manufactured Monitron automated hydrostatic leveling system when monitoring hydraulic structures

Simutin A. N.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, General Director,  
 Deineko A. V.<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
 Head of Computational Analysis Department (Sigma Tau LLC),  
 Zertsalov M. G.<sup>3</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
 (National Research Moscow State University of Civil Engineering)

The article discusses the issue of monitoring hydraulic structures related to high-risk facilities. Taking this into account, monitoring should ensure the reliability and operability of the hydraulic structure during the entire period of its operation. Particular attention should be paid to the control of the hydraulic structure settlements, which are one of the main causes of accidents. They lead to the loss of the performance of the structure and in some cases to its total destruction. Various settlement monitoring systems for hydraulic structures are compared. It is noted that recently automated hydrostatic leveling systems are widely used all over the world. They are characterized by high performance and allow obtaining observation data in real-time. By way of an example, the experience of using a domestically manufactured Monitron automated hydrostatic leveling system is considered. The system has shown efficiency and reliability in monitoring the settlement of various engineering structures.

**Keywords:** automated monitoring, hydrostatic leveling.

Особенностью эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС), законодательно относящихся к объектам повышенной опасности [1 – 3], является требование к организации мониторинга (регулярных контрольных натурных наблюдений, инструментальных и визуальных) в течение всего периода эксплуатации. При этом следует обязательно учитывать возрастание рисков возникновения нештатных ситуаций и аварий по мере выработки нормативных эксплуатационных ресурсов ГТС. Принимая во внимание продолжительность жизненного

цикла гидротехнического сооружения и учитывая масштаб последствий при его разрушении, *эффективность* и *надёжность* мониторинга ГТС как в период строительства, так и в период эксплуатации должны быть обеспечены, отвечая самым высоким требованиям.

*Под эффективностью мониторинга* понимается его способность вовремя обнаруживать нарушение условий эксплуатации ГТС и, как следствие, возрастание рисков нештатных ситуаций и аварий, что позволит заблаговременно разработать и осуществить меры по их предотвращению.

*Под надёжностью* понимается бесперебойное функционирование системы мониторинга незави-

<sup>1</sup> simutin@sigma-tau.xyz

<sup>2</sup> deyneko@sigma-tau.xyz

<sup>3</sup> mzertsalov@mgsu.ru

симо от технических, природно-климатических и организационных факторов.

Инструментальные измерения могут проводиться как в автоматизированном, так и в ручном режиме. Снятие и обработка результатов измерений в ручном режиме требуют больших временных затрат, что не позволяет осуществлять постоянный контроль диагностических показателей, характеризующих работоспособность и безопасность ГТС. Учитывая это, необходимо разрабатывать системы мониторинга, основанные на полной автоматизации процесса снятия показаний и их обработки, что позволяет проводить мониторинг состояния ГТС в режиме реального времени. Это достигается путём разработки и внедрения автоматизированной системы диагностического контроля (АСДК), в свою очередь, состоящей из автоматизированной системы опроса контрольно-измерительной аппаратуры (АСО КИА) и информационно-диагностической системы (ИДС).

Следует отметить, что в настоящее время системы мониторинга, применяемые на отечественных ГТС, во многих случаях не отвечают изложенным выше требованиям, поскольку часть входящих в них подсистем ещё не автоматизированы и проводимые с их помощью инструментальные измерения выполняются в ручном режиме.

Одним из важнейших диагностических показателей, по которому оценивается безопасность ГТС, являются перемещения, вызываемые осадкой основания (рис. 1).

Статистика показывает, что большинство аварий бетонных ГТС различных типов, например: плотин Сент-Френсис (США) и Мальпассе (Франция), здания Загорской ГАЭС-2 (Россия) — произошло из-за сверхнормативных осадок, вызванных разрушением оснований [4–5]. Разрушение основания, как правило, обусловлено непредусмотренными проектом фильтрационными расходами, приводящими к неконтролируемым процессам суффозии. Исследования показывают, что указанные процессы развиваются постепенно до тех пор, пока объём вымытого грунта не достигнет критического

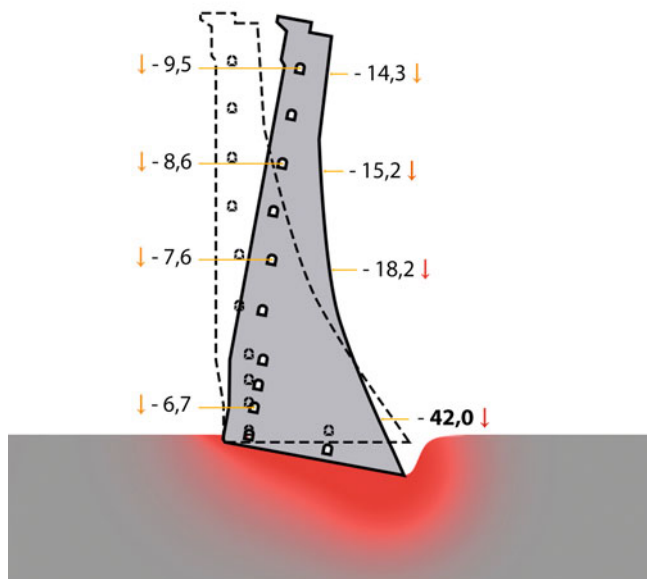


Рис. 1. Характер перемещений высокой бетонной плотины при деформациях основания

значения. Последующее ускорение развития деструктивных процессов с трудом поддаётся прогнозированию. Для предотвращения подобной аварийной ситуации требуется постоянное (в режиме реального времени) наблюдение за осадками сооружения.

Очень важно в период эксплуатации ГТС наблюдать также за перемещениями высоких бетонных плотин во время наполнения и опорожнения водохранилища, что вызывает знакопеременные нагрузки на основание и отрицательно влияет на его напряжённо-деформированное состояние.

В настоящее время в отечественной практике мониторинг осадок ГТС проводится в основном в ручном режиме методом оптического нивелирования с периодичностью 1 раз в месяц и реже. Стоит отметить, что вне сооружения на открытой местности атмосферные условия часто затрудняют оптическое нивелирование, а в отдельных случаях полностью исключают его использование.

Альтернативным методом измерения осадок различного типа сооружений, получившим распро-

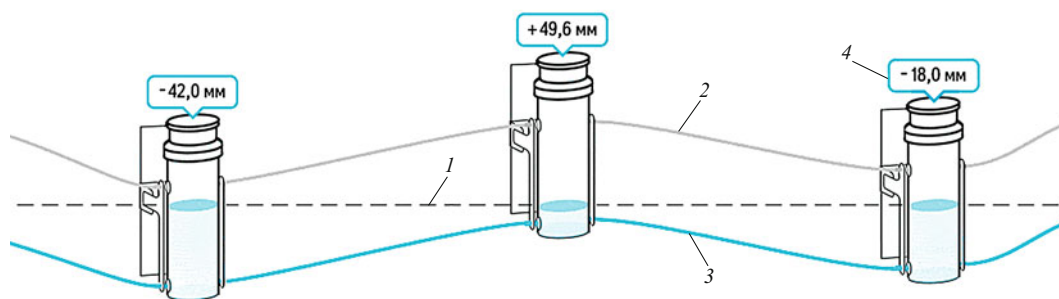
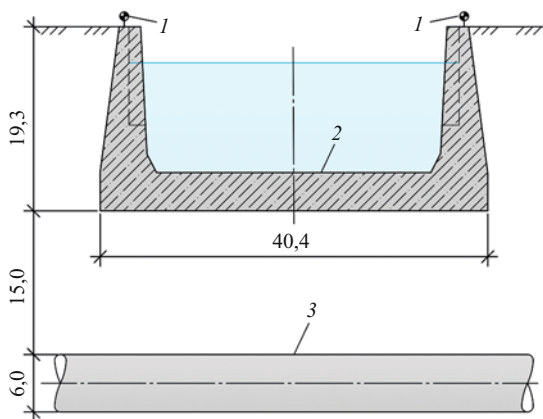


Рис. 2. Принцип работы системы гидростатического нивелирования (ГН): 1 — уровень рабочей жидкости в гидравлической системе; 2 — шланг воздушной трассы; 3 — шланг гидравлической трассы; 4 — изменение высотного положения измерительного сосуда от первоначального



**Рис. 3.** Схема совместного размещения автоматизированных гидростатических нивелиров и деформационных марок тахеометра (1) на шлюзе № 9 Карамышевского гидроузла (2) при проходке перегонных тоннелей (3)

странение в зарубежной практике, является гидростатическое нивелирование (ГН). Оно основано на создании системы сообщающихся измерительных сосудов, внутри которых уровень жидкости занимает равную высотную отметку (рис. 2).

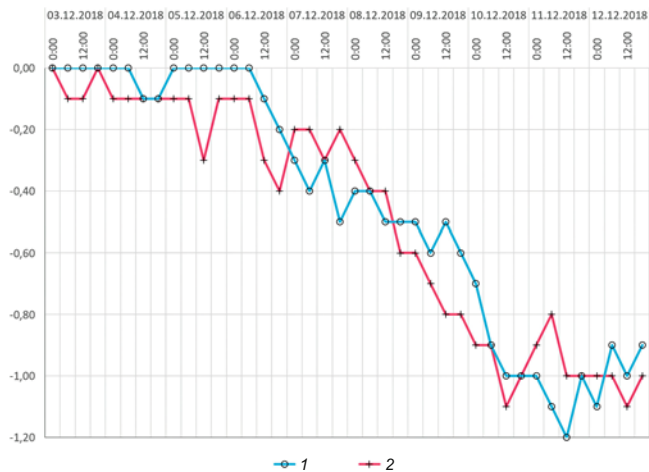
Мировой опыт показывает исключительную универсальность этого метода, эффективного для измерений с любой необходимой точностью, при любой, определяемой размером сооружения базе нивелирования [6 – 8].

За рубежом системы ГН начали разрабатывать ещё в середине прошлого столетия. Например, в 1960-х гг. была разработана автоматизированная жидкометаллическая (наполненная ртутью) система ГН, предназначенная для установки магнитов протонного синхрофазотрона, обеспечивающая точность нивелирования  $\pm 0,025$  мм на диаметре объекта 1,6 км [7].

Методика ГН отработана в теоретическом и практическом отношении. Хорошо изучены механизмы возникновения погрешностей и методы их компенсации. Это позволяет конструировать системы ГН необходимого масштаба с необходимыми показателями точности нивелирования.

Сложность и стоимость системы ГН во многом определяется системой фиксации уровня жидкости в измерительном приборе. На нивелирах зарубежного производства, предназначенных для мониторинга ГТС и других строительных сооружений, обычно применяется высокоточный преобразователь давления, обеспечивающий измерение уровня жидкости с точностью  $\pm 0,1$  мм. При этом в качестве жидкости обычно применяется антифриз.

Несмотря на очевидные преимущества ГН, подобные системы мониторинга ГТС в нашей стране ранее широко не использовались. Однако в последнее время применение ГН в отечественной практике получает всё большее распространение.

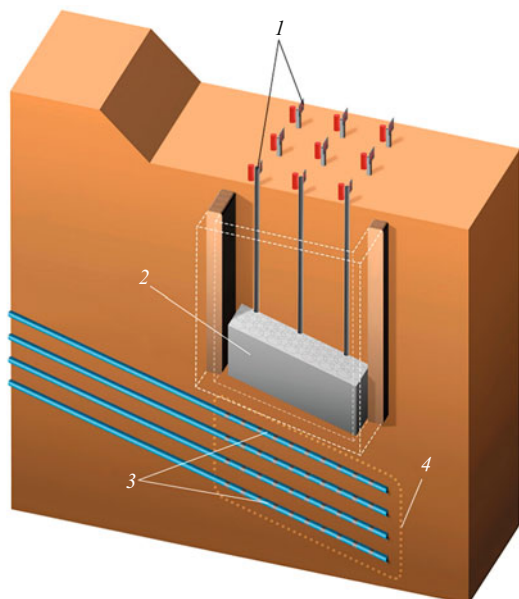


**Рис. 4.** Сопоставление фрагмента данных гидростатического нивелира (1) и электронного тахеометра (2) при мониторинге шлюза № 9 Карамышевского гидроузла за период с 03.12.2018 по 12.12.2018

Примером может служить применение системы гидростатического нивелирования “Монитрон” российского производства на шлюзе № 9 Карамышевского гидроузла канала им. Москвы при проходке и строительстве в его основании двух перегонных тоннелей диаметром 6,0 м, на участке между станциями “Хорошевская” и “Можайская” Московского метрополитена. Минимальное расстояние между перегонными тоннелями и подошвой камеры шлюза составило около 15 м при общей длине камеры шлюза 300 м и размере поперечного сечения  $30 \times 12,5$  м<sup>2</sup>. Для обеспечения эксплуатационной надёжности при проходке перегонных тоннелей камера шлюза была оборудована системой мониторинга, включавшей в себя тахеометрическую съёмку одним переносным электронным тахеометром с точностью измерения углов  $0,5''$ , и объединённых в единую систему 24 гидростатических нивелиров ДГЦ-18 с точностью измерения  $\pm 0,1$  мм, установленных на стенках шлюза (рис. 3).

Сопоставление результатов тахеометрической съёмки с результатами гидростатического нивелирования показало максимальную разницу результатов в 0,3 мм (рис. 4), при этом данные с гидростатических нивелиров поступали каждую минуту (1440 раз в сутки), в то время как съёмка тахеометром выполнялась 4 раза в сутки с интервалом каждые 6 ч.

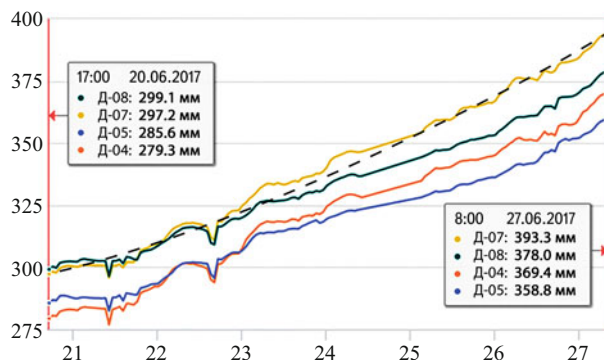
Особый интерес представляет применение системы “Монитрон” в рамках начавшихся работ по подъёму и выравниванию здания Загорской ГАЭС-2 методом управляемого компенсационного нагнетания. Проектом предусмотрено автоматизированное измерение вертикальных перемещений внутри и снаружи здания ГАЭС в процессе восстановительных работ. В настоящее время реализован проект оснащения гидростатическими нивелирами ДГЦ-17 модели фундаментной плиты здания ГАЭС



**Рис. 5.** Схема размещения нивелиров на модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2: 1 — грунтовые реперы длиной от 18 до 22 м с гидростатическими нивелирами; 2 — модель фундаментной плиты 10 × 10 × 6 м; 3 — манжетные колонны длиной от 70 до 90 м; 4 — контур зоны компенсационного нагнетания

при её подъёме на опытном участке № 3 (рис. 5). Применяемые на опытном участке гидростатические нивелиры ежеминутно передавали данные в облачную ИДС <https://monitron.ru>. Это давало возможность удалённого доступа к результатам измерения натуральных перемещений и их анализу за любой период времени наблюдений в сопоставлении с расчётными данными. В качестве примера приведён график вертикальных перемещений (рис. 6), построенный по данным гидростатических нивелиров за период с 20.06.2017 по 27.06.2017 (использованы результаты 7632 измерений). Для сравнения, на графике для одной из точек измерения (Д-07) приведена пунктирная кривая, построенная по результатам численного моделирования управляемого компенсационного нагнетания при подъёме модели фундаментной плиты. Благодаря тому, что измерение перемещений осуществлялось в режиме реального времени, сопоставление расчётных и наблюдаемых результатов подъёма проводилось для всех точек измерения на каждом этапе нагнетания, на основании чего определялись манжетные иньекторы, через которые требовалось нагнетание дополнительных объёмов компенсационного раствора [9 – 10].

Принятые в международной практике технические характеристики и требования к изготовлению систем ГН полностью соблюдены при разработке и организации производства отечественной системы мониторинга “Монитрон”. В процессе её создания разработана принципиально новая система снятия показаний оптико-электронного типа. Эта техноло-



**Рис. 6.** Фрагмент графика фактических (цветом) и расчётных (пунктиром) вертикальных перемещений при подъёме модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2 по данным облачной ИДС <https://monitron.ru> за период с 20.06.2017 по 27.06.2017

гия обеспечивает аналогичную точность при значительном уменьшении (до 10 раз) общей стоимости измерительной аппаратуры по сравнению с зарубежными аналогами.

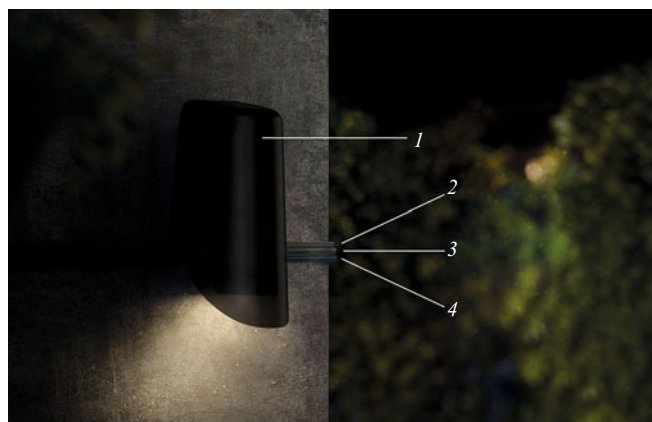
Основным элементом системы ГН являются измерительные приборы — цифровые гидростатические нивелиры ДГЦ-21 (рис. 7), имеющие следующие характеристики:

- точность снятия показаний  $\pm 0,05$  мм;
- диапазон измерений 100 мм;
- частота измерений 1 раз в минуту;
- температурный диапазон эксплуатации от минус 65 °С (датчик оборудован внутренним обогревом электроники) до плюс 50 °С;
- степень защиты IP 66 (пыленепроницаем и защищен от сильного воздействия струй жидкости);
- срок службы не менее 15 лет.

Указанные нивелиры применялись на нескольких десятках объектов в России, в частности при строительстве московского метро, а также за рубежом для наблюдения за осадками фундаментов башен ветрогенераторов.

Следует отметить важное преимущество использования гидростатических нивелиров — возможность несложного объединения их в единую систему, независимо от количества и места размещения, в закрытых помещениях или на открытом воздухе, что важно, учитывая размеры ГТС. Для сравнения стоит отметить, что применение методов автоматизированного оптического нивелирования с использованием роботизированных тахеометров в аналогичных условиях является очень затратным, поскольку требует при объединении в систему большого количества тахеометров.

Для системы “Монитрон” разработано программное обеспечение класса АСО КИА + ИДС со встроенным модулем рассылки оповещений, что позволяет развернуть систему на объекте и приступить к наблюдениям в течение короткого промежутка времени.

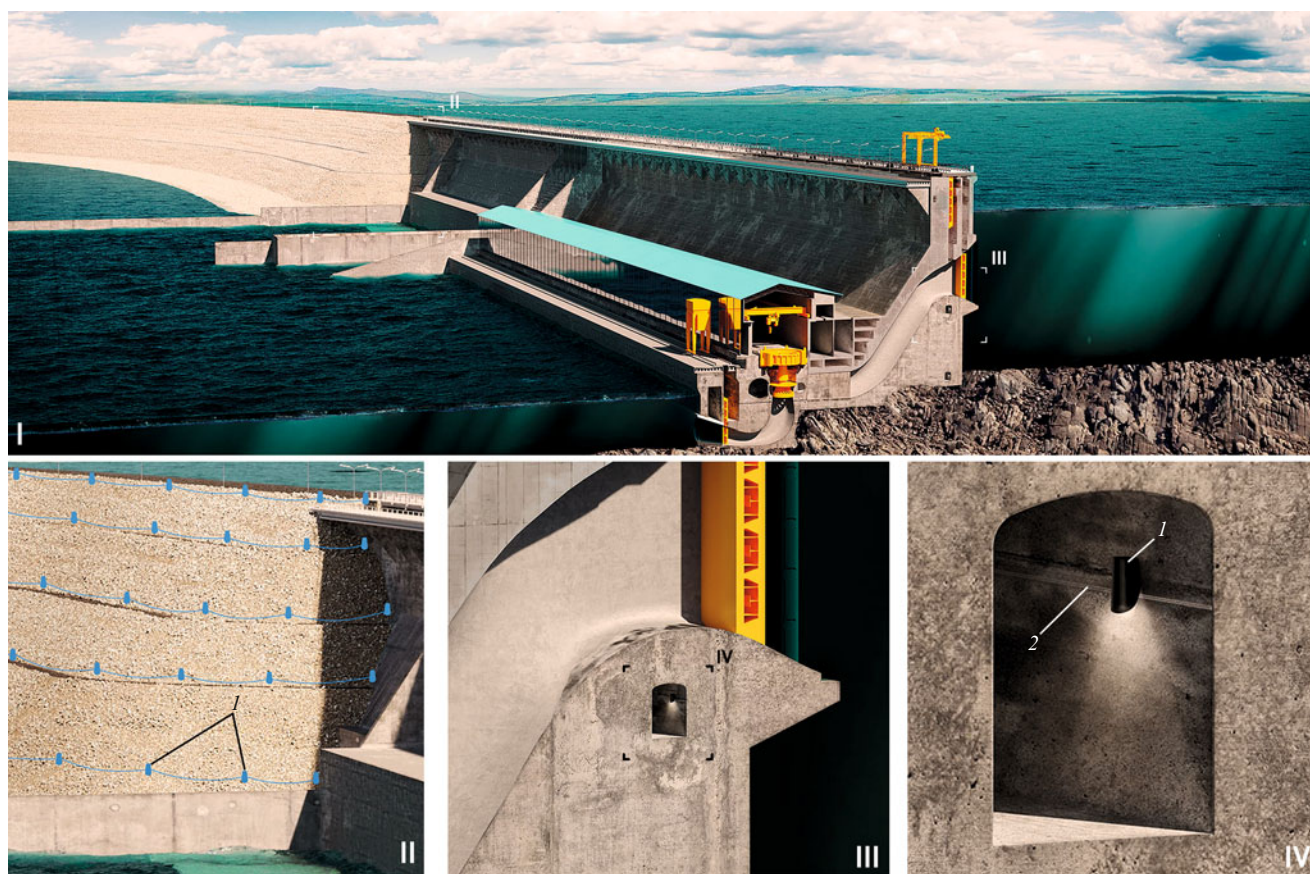


**Рис. 7.** Автоматизированный гидростатический нивелир “Монитрон” ДГЦ-21: 1 — измерительная аппаратура, замаскированная под светодиодный светильник; 2 — коммутационные кабели; 3 — шланг воздушной трассы; 4 — шланг гидравлической трассы

Как указывалось выше, количество гидростатических нивелиров в одной системе практически не ограничено. При очень большом количестве нивелиров, из эксплуатационных соображений, их целесообразно разделять на подсистемы. Таким образом, можно обеспечить мониторинг гидротехнического сооружения любого размера.

Благодаря компактности гидростатические нивелиры могут размещаться в различных служебных помещениях, в потернах, машзалах ГЭС, на строительных конструкциях, как внутри, так и вне сооружения, включая поверхности, подвергаемые воздействиям внешней среды. Корпуса гидростатических нивелиров могут совмещаться со светильниками, располагаясь на высоте, безопасной от случайных механических воздействий. На поверхности плотин из местных материалов гидростатические нивелиры размещаются на грунтовых реперах (рис. 8).

Важнейшей функцией системы “Монитрон” является непрерывность измерений, что позволяет, благодаря автоматизированным оповещениям, заблаговременно обнаруживать возникновение и прогнозировать развитие нештатных ситуаций. Это даёт возможность, учитывая простоту и надёжность конструкции системы, достаточно легко объединять её с используемыми в настоящее время и разрабатываемыми цифровыми автоматизированными системами мониторинга и анализа напряжённо-деформированного состояния ГТС [11 – 12].



**Рис. 8.** Примеры размещения автоматизированных гидростатических нивелиров на ГТС: I — общий вид гидроузла; II — размещение гидростатических нивелиров на грунтовой плотине; III — потерна в здании ГЭС; IV — фрагмент здания ГЭС; 1 — гидростатический нивелир; 2 — гидравлическая, воздушная и коммуникационная трассы

## Выводы

1. Метод гидростатического нивелирования позволяет значительно повысить качество натуральных наблюдений за осадками гидротехнических сооружений.

2. Накопленный опыт применения системы гидростатического нивелирования “Монитрон” свидетельствует о том, что при высокой эксплуатационной надёжности её технические характеристики обеспечивают высокую точность результатов наблюдений, получаемых в режиме реального времени.

3. Возможность несложного объединения гидростатических нивелиров в единую систему, независимо от числа и места размещения измерительных приборов, позволяет развернуть её на объекте и приступить к наблюдениям в течение короткого промежутка времени, при необходимости, объединяя её с используемыми в настоящее время цифровыми автоматизированными системами мониторинга.

4. При большом количестве точек установки нивелиров систему можно разделять на подсистемы, что, в свою очередь, позволяет использовать её на ГТС при любой, определяемой размером сооружения, базе измерений.

## Список литературы

1. *О безопасности гидротехнических сооружений*: Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ.
2. *СП 58.13330.2012*. Гидротехнические сооружения. Основные положения: Актуализированная редакция СНиП 33 – 01 – 2003.
3. *СТО 70238424.27.140.035-2009*. Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехни-

ских сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования.

4. *Калустян Э. С.* Геомеханика в плотиностроении. — М.: Энергоатомиздат, 2008.
5. *Александров А. В., Беллендир Е. Н., Лащенков С. Я., Альжанов Р. Ш.* Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы // *Гидротехническое строительство*. 2016. № 7. С. 2 – 10.
6. *Tsvetkov R. V., Yepin V. V., Shestakov A. P.* Numerical estimation of various influence factors on a multipoint hydrostatic leveling system // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 208. — 012046.
7. *Pellissier P. F.* Hydrostatic Leveling Systems // *IEEE Transactions*. 1965. Vol. 12. Is. 3. P. 19 – 20.
8. *Манукин А. Б., Казанцева О. С., Бехтерев С. В., Матюнин В. П., Калинин И. И.* Длиннобазисный гидростатический нивелир // *Сейсмические приборы*. 2013. Т. 49. № 4. С. 26 – 34.
9. *Александров А. В., Беллендир Е. Н., Вавер П. А., Симутин А. Н.* Опытное обоснование выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 // *Гидротехническое строительство*. 2018. № 8. С. 7 – 16.
10. *Зерцалов М. Г., Симутин А. Н., Александров А. В.* Расчётное обоснование управляемого компенсационного нагнетания при подъёме модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2 // *Гидротехническое строительство*. 2018. № 8. С. 2 – 6.
11. *Лунаци М. Э., Шполянский Ю. Б., Соболев В. Ю., Беллендир Е. Н., Белостоцкий А. М., Лисичкин С. Е., Бершов А. В.* Концепция построения архитектуры программно-аппаратного комплекса для мониторинга состояния гидротехнических сооружений // *Гидротехническое строительство*. 2016. № 5. С. 2 – 6.
12. *Рубин О. Д., Антонов А. С., Беллендир Е. Н., Кобочкина Е. М., Котлов О. Н.* Разработка расчётного модуля программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности взаимовлияющих ГТС // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 2. С. 96 – 105.