

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РОССИЙСКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРА ПРИ МОНИТОРИНГЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

ООО «Монитрон»

**Симутин А. Н.**, к. т. н., генеральный директор

ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

**Медведев Г. М.**, начальник отдела мониторинга

ООО «Сигма Тау»

**Хотеев Е. А.**, к. т. н., главный инженер

**Дейнеко А. В.**, к. т. н., начальник отдела расчетных обоснований

В связи с интенсивным освоением подземного пространства, включая строительство глубоких котлованов, возрастает необходимость непрерывного мониторинга осадков существующих зданий и сооружений нормального и повышенного уровня ответственности. Традиционные геодезические методы (использование оптических нивелиров, тахеометров) не обеспечивают высокую цикличность и непрерывность наблюдений, что во многих случаях не позволяет своевременно отреагировать на возникновение нештатных и аварийных ситуаций и принимать меры для их предотвращения. В статье рассмотрен опыт автоматизированного геотехнического мониторинга в режиме реального времени с использованием системы гидростатического нивелирования «Монитрон» для предотвращения аварийной ситуации при проходке тоннеля коллектора диаметром 4,0 м под одной из линий московского метрополитена.

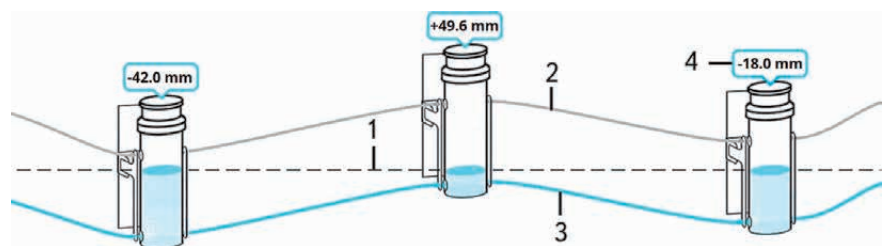
**Ключевые слова:** гидростатическое нивелирование, датчики гидростатического нивелира цифровые, геотехнический мониторинг, вертикальные перемещения, осадки

## ВВЕДЕНИЕ

**А**втоматизированное гидростатическое нивелирование представляет собой технологию измерения квазистатических вертикальных перемещений (осадок), которая применяется для геотехнического (деформационного) мониторинга зданий и сооружений различных типов [1–5].

Система гидростатического нивелирования «Монитрон» представляет собой соединенные между собой измерительные сосуды с датчиками уровня жидкости (рис. 1). Данные с датчиков с помощью промышленного компьютера собираются и передаются на интернет-портал <https://monitron.xuz>, предоставляющий для авторизованных пользователей доступ к результатам наблюдений в режиме реального времени.

Особенностью системы «Монитрон» является использование инновационных оптико-электронных датчиков уровня жидкости. Преимуществами данной системы по сравнению с оптическими нивелирами и тахеометрами (ручными, автоматизированными и роботизированными) являются:

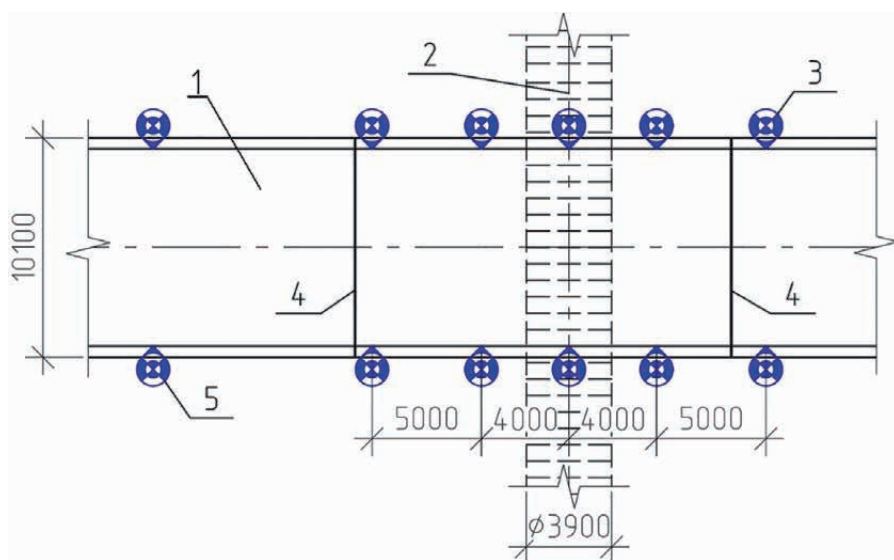


**Рис. 1.** Принцип работы системы гидростатического нивелирования:

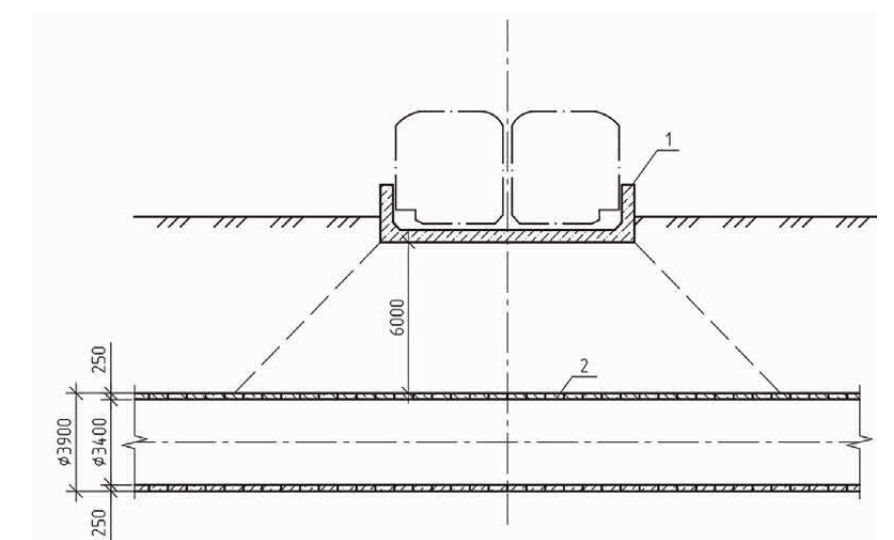
- 1 — уровень рабочей жидкости в гидравлической системе;
- 2 — шланг воздушной трассы;
- 3 — шланг гидравлической трассы;
- 4 — изменение высотного положения измерительного сосуда от первоначального

- высокая цикличность измерений: данные с цифровых датчиков гидростатического нивелира поступают 1 раз в минуту;
- независимость процесса нивелирования от погодных-климатических условий;
- отсутствие необходимости прямой видимости между датчиками (например, в подвальных помещениях);
- фиксированная точность измерений  $\pm 0,05$  мм, практически не зависящая от расстояния между датчиками и их количества.

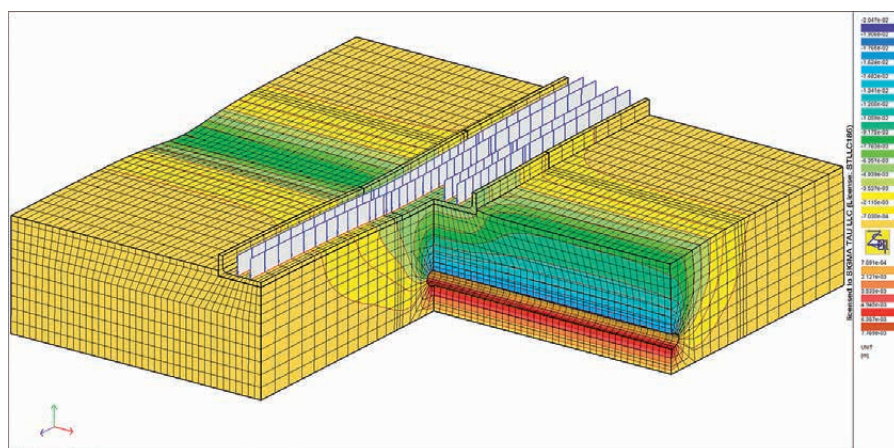
Датчики гидростатического нивелира цифровые ДГЦ-19 выпускаются в универсальном исполнении с диапазоном измерения 100 мм, с расширенным температурным диапазоном эксплуатации от минус 65 до плюс 50 °С, с высокой степенью защиты IP 66 (пыленепроницаем, защищен от сильного воздействия струи воды), с базовым сроком службы 10 лет. Датчики обладают современным дизайном и могут быть замаскированы под приборы освещения или архитектурной подсветки.



**Рис. 2.** План пересечения строящегося тоннеля (2) с действующим сооружением метрополитена (1), разделенным деформационными швами (4), с указанием расположения гидростатических нивелиров (3), в том числе опорных (5)



**Рис. 3.** Продольный разрез по оси строящегося тоннеля (2) с поперечным разрезом действующего участка метрополитена (1)



**Рис. 4.** Фрагмент цифрового двойника на момент завершения проходки для проектного случая

Датчики ДГЦ-19 для измерения вертикальных перемещений включены в Государственный реестр средств измерений (Госреестр СИ). Также имеются датчики ДГЦ-22 с возможностью измерения как осадок, так и углов поворота поверхности жидкости к горизонту, которые в настоящее время применяются экспериментально и находятся на этапе испытаний для включения в Госреестр СИ.

Указанная высокая цикличность наблюдений особенно актуальна при строительстве тоннелей, когда фактическая скорость проходки достигает порядка 15 м/сутки, а также при разработке глубоких котлованов вблизи существующих зданий и сооружений. Контроль осадок объектов мониторинга в режиме реального времени позволяет оперативно уточнять технологические параметры разработки грунта и своевременно вводить в действие дополнительные мероприятия по сохранности, обеспечивая высокую надежность инженерной защиты существующих зданий и сооружений.

С учетом длительного срока службы и высокой эксплуатационной надежности цифровые датчики гидростатического нивелира эффективны для постоянного контрольного мониторинга объектов повышенного уровня ответственности, таких как высотные здания, сооружения гидротехнического и атомного строительства.

Система «Мониторн» обладает возможностью самодиагностики на предмет повреждения в процессе эксплуатации. Интернет-сервис позволяет настроить автоматическое формирование и рассылку периодических отчетов, а также тревожных оповещений посредством электронной почты и смс-сообщений о достижении заданных контрольных значений осадок.

Учитывая все обозначенные преимущества, система гидростатического нивелирования «Мониторн» была применена при закрытой проходке коллекторного тоннеля под действующим участком московского метрополитена (рис. 2) между станциями «Филатов луг» и «Саларьево» Сокольнической линии. Проектируемый тоннель имеет наружный и внутренний диаметры 3,9 и 3,4 м, соответственно.

Проходка велась тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК) Lovat RME-158 SE (диаметр резанья 4,05 м) с активным грунтопригрузом забоя. Обделка тоннеля сборная железобетонная с последующим усилением под лотком метрополитена. Ширина кольца 750 мм. Каждое кольцо состоит из шести трапециевидных блоков, в центре которых расположены отверстия для нагнетания раствора и заполнения строительного зазора. Протяженность тоннеля в технической зоне метрополитена составляет 50 м. Фактическая скорость проходки составляла 5,6 м/сутки. Расстояние в свету от обделки строящегося коллектора до сооружений метрополитена составляет 6,0 м (рис. 3).

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ «МОНИТРОН»**

Учитывая, что фактические деформации при проходке могут отличаться от проектных, целесообразно на стадии строительства иметь цифровой двойник (ЦД) напряженно-деформированного состояния сооружений, представляющий собой достаточно подробную конечно-элементную модель проектируемого сооружения, вмещающего массива и существующих сооружений. Благодаря расчету ЦД с учетом результатов мониторинга осадок по данным гидростатических нивелиров появляется возможность оценить реальные запасы прочности конструкции и прогнозировать дальнейшее изменение напряженно-деформированного состояния как сооружений, так и основания.

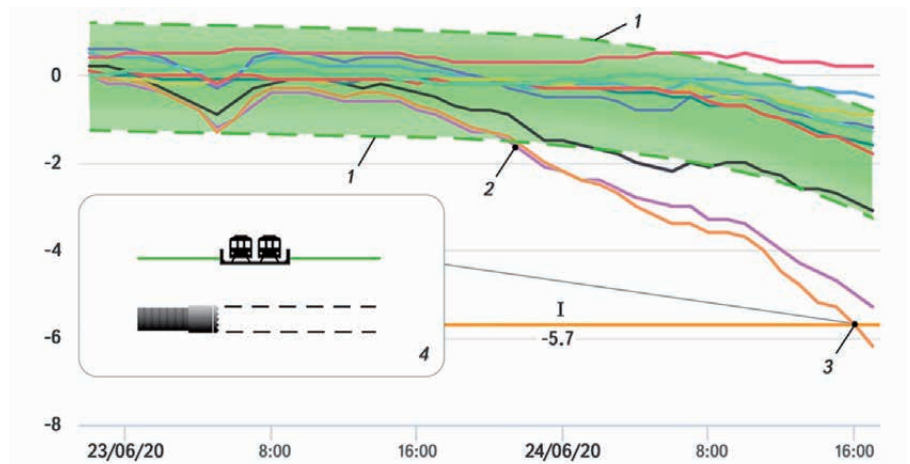
**Цифровой двойник**

В рассматриваемом случае в программно-вычислительном комплексе ZSoil (рис. 4) был создан цифровой двойник, откалиброванный под проектные данные максимальной осадки. Это позволило до начала проходки назначить для каждого из датчиков гидростатического нивелира расчетные графики зависимости осадки от положения ТПМК с границами прогнозного коридора (см. 1 на рис. 5), учитывающими точность геотехнических расчетов. Выход фактического графика осадки из прогнозного коридора может считаться сигналом к необходимости корректировки параметров проходки или применения защитных мероприятий.

В соответствии с проектной документацией в части оценки влияния строительства, выполненной сторонней организацией, были назначены расчетная осадка в 5,4 мм и предельно допустимая осадка в 14,0 мм, использованные в сервисе <https://monitron.xuz> как значения (см. I на рис. 5, I и II на рис. 6), в процентном соотношении от которых происходит автоматическая рассылка sms-сообщений и электронных писем всем ответственным и заинтересованным лицам (например, инженер получит первое оповещение при 60% от расчетного значения, а его руководитель — при 80%).

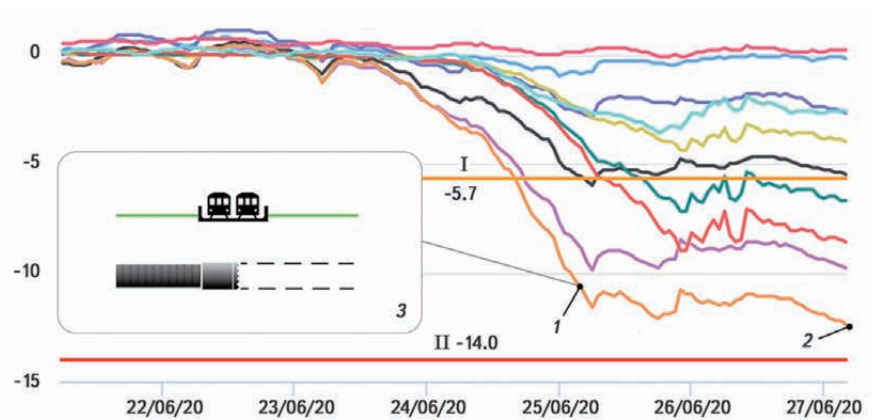
**Результаты мониторинга**

При проходке коллектора результаты мониторинга высотного положения действующего участка метрополитена 23/06/2020 в 22:00 показали, что его осадки достигли границ расчетного коридора цифрового двойника (см. точку 2 на рис. 5), что стало первым тревожным сигналом о необходимости внесения изменений в параметры проходки. При достижении проектной осадки в 5,7 мм (см. точку 3 на рис. 5) ООО «Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации» (НИЦ ТА), осуществлявший научное сопровождение проходки, направил письмо о необходимости увеличения давления грунтопригруза до 0,6 бар и корректировки срока



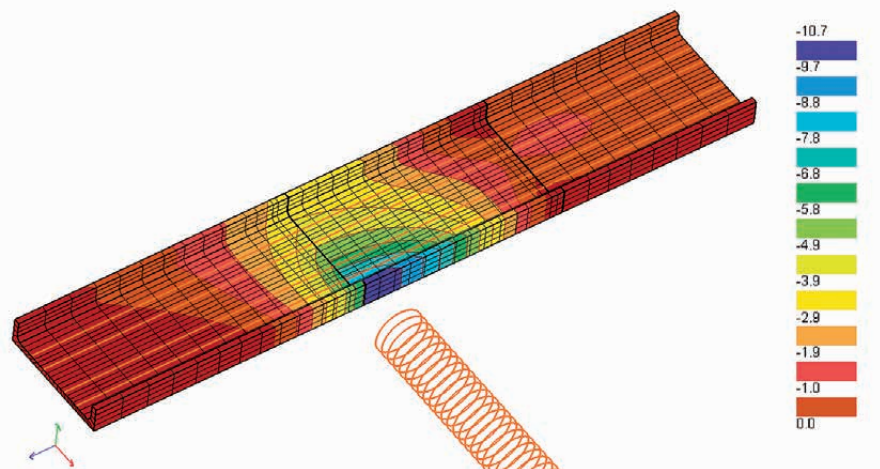
**Рис. 5.** График вертикальных перемещений действующего участка метрополитена с 22:00 22/06/2020 по 17:00 24/06/2020:

- 1 — границы прогнозного коридора осадки ЦД для датчика с максимальной осадкой;
- 2 — точка выхода фактической осадки из прогнозного коридора;
- 3 — максимальная осадка в 5,7 мм на 16:00 24/06/2020;
- 4 — условное положение ТПМК относительно сооружения метро в точке графика № 3;
- I — расчетная проектная осадка (по результатам расчета сторонней организации)



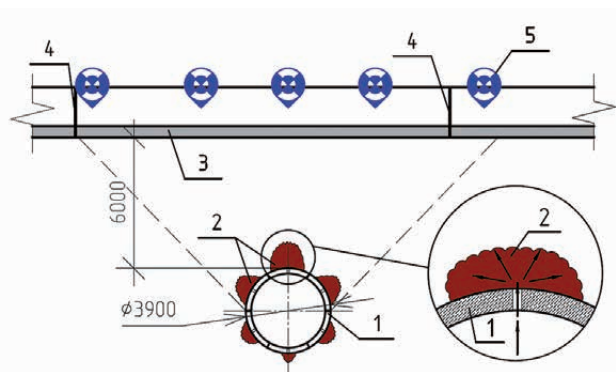
**Рис. 6.** График вертикальных перемещений действующего участка метрополитена с 4:00 21/06/2020 по 4:00 27/06/2020:

- 1 — максимальная осадка в 10,7 мм на 4:00 25/06/2020;
- 2 — максимальная осадка в 12,4 мм на 4:00 27/06/2020;
- 3 — условное положение ТПМК относительно сооружения метро в точке графика № 3;
- I — расчетная проектная осадка (по результатам расчета сторонней организации);
- II — предельная осадка



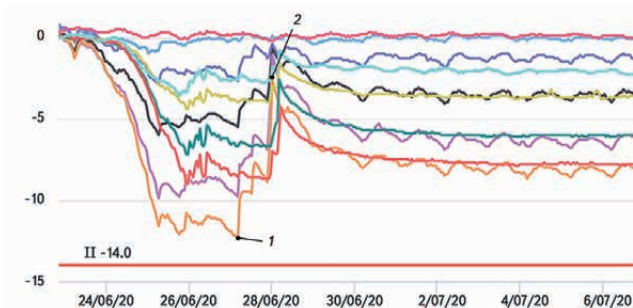
**Рис. 7.** Фрагмент цифрового двойника на момент максимальной осадки действующего участка метрополитена в 10,7 мм на 4:00 25/06/2020 (см. точку 1 на рис. 6)





**Рис. 8.** Схема работ по управляемому компенсационному нагнетанию:

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1 — строящийся тоннель;                | 4 — деформационные швы;       |
| 2 — нагнетаемый раствор;               | 5 — гидростатические нивелиры |
| 3 — действующий участок метрополитена; |                               |



**Рис. 9.** График вертикальных перемещений действующего участка метрополитена за весь период наблюдения при проходке тоннеля:

- |  |
|--|
| 1 — начало работ по компенсационному нагнетанию, максимальная осадка в 12,4 мм на 4:00 27/06/2020; |
| 2 — компенсированная осадка с 12,4 мм до 2,6 мм в 0:05 28/06/2020;                                 |
| II — предельная осадка   |

схватывания тампонажного состава до 3 часов.

Дальнейшая проходка, продолжавшаяся до 4:00 25/06/2020, показала недостаточность принятых мер, и при достижении осадки в 10,7 мм (см. точку 1 на рис. 6, рис. 7) НИЦ ТА направил второе письмо с указанием о необходимости увеличения давления грунтопригруза до 1,0 бар. Как показала дальнейшая проходка, эта мера также оказалась временной (см. рис. 6).

Уже к 12:00 26/06/2020 возник выраженный тренд нарастания осадки, которая к 4:00 27/06/2020 имела максимальное значение в 12,4 мм (см. точку 2 на рис. 6), что соответствует 87% от предельного значения, установленного эксплуатирующей организацией. Учитывая это, было принято решение выполнить работы по управляемому компенсационному нагнетанию [6–7] из строящегося тоннеля в основание действующего участка метрополитена. Суть работ заключалась в нагнетании растворов в каждое четное кольцо через отверстия в блоках обделки (рис. 8) до отказа по давлению в 4 бар.

Влияние управляемого компенсационного нагнетания контролировалось по показаниям автоматизированных гидростатических нивелиров (рис. 9). Инъекционные работы были остановлены 28/06/2020, при этом осадка у датчика, ранее имевшего максимальное значение в 12,4 мм (см. точку 1 рис. 9), была компенсирована до 2,6 мм (см. точку 2 на рис. 9). Последующий процесс релаксации напряжений, усадки и водоотдачи раствора привел к стабилизации осадки за 8 суток до максимального значения в 8,6 мм (61% от предельного значения).

## Выводы

Созданы реальные, проверенные на практике предпосылки для комплексного геотехнического (деформационного) мониторинга на основе современных автоматизированных гидростатических нивелиров

«Монитрон» и программного обеспечения для создания цифровых двойников, обеспечивающие в совокупности постоянные наблюдения и контроль за изменением напряженно-деформированного состояния строящихся или эксплуатируемых зданий и сооружений при освоении подземного пространства.

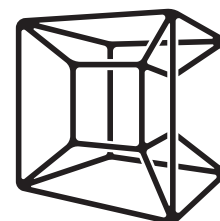
При анализе данных геотехнического мониторинга необходимо сопоставлять результаты измерений не с их расчетным максимальным значением, а с расчетными значениями осадок по каждой точке наблюдений для текущего этапа строительства. Это обеспечивается совместным применением автоматизированных гидростатических нивелиров «Монитрон» и цифрового двойника объекта мониторинга.

Выход графика осадок за пределы прогнозного коридора может заблаговременно предупредить о начале развития непростой ситуации, пока величина возникших отклонений сравнительно мала и возможны эффективные корректирующие мероприятия. ■

## Литература

1. Pellissier P. F. Hydrostatic leveling systems // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1965. Vol. 12. Issue 3. Pp. 19–20.
2. Meier E., Geiger A., Ingensand H., Licht H., Limpach P., Steiger A., Zwysig R. Hydrostatic Levelling System: measuring at the system limits // *Journal of Applied Geodesy*. 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 91–102.
3. Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 3. С. 21–28.
4. Pospíšil J., Dandoš R. Basic principles of hydrostatic levelling // *GeoScience Engineering*. 2018. Vol. LXIV. No. 2. Pp. 12–21.

5. Zhang X., Zhang Y., Zhang L., Qiu G., Wei D. Power transmission tower monitoring with hydrostatic leveling system: measurement refinement and performance evaluation // *Hindawi Journal of Sensors*. 2018. Article ID 4176314.
6. Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Александров А.В. Расчетное обоснование управляемого компенсационного нагнетания при подъеме модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2 // *Гидротехническое строительство*. 2018. № 8. С. 2–6.
7. Беллендир Е.Н., Александров А.В., Зерцалов М.Г., Симутин А.Н. Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания // *Гидротехническое строительство*. 2016. № 2. С. 15–19.



ООО «Монитрон»  
Москва  
+7 (495) 220-03-45  
box@monitron.ru  
www.monitron.ru