

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110

## THE USE OF MODERN MEANS OF STRAIN MEASURING AT RESEARCH OF INSTALLATIONS OF VOLGOGRAD HYDROELECTRIC COMPLEX

**R. V. Kozlov<sup>1</sup>, V. Li<sup>2</sup>, K. P. Morgunov<sup>3</sup>**

1 — JSC «NIIES», Moscow, Russian Federation

2 — LLC “Firma G.F.K.”, Moscow, Russian Federation

3 — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Watching lock chambers gateway number 30 and number 31 of the Volgograd hydroelectric during the operation showed that the main parameters to be controlled are the piezometric levels of groundwater in fillings chambers values pressure on the bottom of the camera, the concrete situation and the movement of the top wall chambers under different operating loads. Measuring movement of the top of the wall is the most problematic in the existing now in the current monitoring system of hydroelectric — available means of geodetic measurement of dynamic deformations of the walls of the cameras is almost impossible. Ongoing measurement facilities allow only finite values of relative displacement chamber walls during the filling-emptying. To determine the independent movement of each element in the process of changing the water level in the chamber is not possible by existing methods. Processes occurring in the locking of vessels, rather dynamic, the duration of the passage of the ship through the gateway are within 40 – 60 minutes. During this time the chamber is filled, and its walls are deflected in the direction of filling, then in the process of emptying the chamber top wall is moved in the axis of the chamber. The deviation depends on the design of the walls, the nature of backfill soil, the groundwater level in the filling, and other factors. The dynamics of these processes (the movement speed and amplitude) affect the stability con constructions gateway and magnitude of the stresses arising in them, which in turn determines the operational safety of locking processes. Performed on shipping Volgograd hydroelectric plants pilot project on the measurement of displacements structures using Total Station has demonstrated the ability to produce a whole range of information about the movements of structural elements. Analysis of such information creates the possibility of a more objective assessment of the state of the ship lock.*

*Keywords: ship lock, filling and emptying of the lock chamber, constructions movement, total station, observing program, redefinition of the coordinates.*

### **For citations:**

Kozlov, Roman V., Vladimir Li, and Konstantin P. Morgunov. “The use of modern means of strain measuring at research of installations of Volgograd hydroelectric complex.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 95–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110.

**УДК 626.42**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА

**Р. В. Козлов<sup>1</sup>, В. Ли<sup>2</sup>, К. П. Моргунов<sup>3</sup>**

1 — АО «НИИЭС», Москва, Российская Федерация

2 — ООО «Фирма Г.Ф.К.», Москва, Российская Федерация

3 — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Наблюдение за состоянием камер шлюзов № 30 и № 31 Волгоградского гидроузла в процессе эксплуатации показало, что основными параметрами, которые необходимо контролировать, являются пьезометрические уровни грунтовых вод в засыпках камер, значения противодавления на днища камер, состояние бетона и перемещение верха стен камер под воздействием различных эксплуатационных*

нагрузок. Измерение перемещения верха стен является наиболее проблемным в существующей ныне на действующих гидроузлах системе мониторинга — имеющимися геодезическими средствами измерять динамику деформаций стен камер практически невозможно. Проводимые на объектах измерения позволяют получать только конечные значения относительных перемещений стен камер шлюза в процессе наполнения — опорожнения. Определить независимые перемещения каждого элемента в процессе изменения уровня воды в камере существующими методами нельзя. Процессы, происходящие при шлюзовании судов, достаточно динамичны, длительность прохода судна через шлюз находится в пределах 40–60 мин. В течение этого времени камера наполняется, и её стены отклоняются в сторону засыпки, затем в процессе опорожнения верх стен камеры перемещается в сторону оси камеры. Величина отклонения зависит от конструкции стен, характера грунтов засыпки, уровня грунтовых вод в засыпке и других факторов. Динамика этих процессов (скорости и амплитуды перемещений) влияет на устойчивость конструкций шлюза и величины напряжений, возникающих в них, что, в свою очередь, определяет эксплуатационную безопасность процессов судопропуска. Выполненный на судоходных сооружениях Волгоградского гидроузла пилотный проект по измерениям перемещений конструкций с использованием электронного тахеометра продемонстрировал возможность получения целого комплекса информации о перемещениях элементов конструкций. Анализ такой информации создает возможность более объективной оценки состояния судоходного шлюза.

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, наполнение и опорожнение камеры шлюза, перемещение конструкций, автоматический тахеометр, программа наблюдений, переопределение координат

**Для цитирования:**

Козлов Р. В. Использование современных средств измерения деформаций при исследовании сооружений Волгоградского гидроузла / Р. В. Козлов, В. Ли, К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 95–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110.

---

## Введение

Одним из важнейших параметров, который необходимо наблюдать в процессе функционирования судоходных гидротехнических сооружений, является перемещение верха стен камер под воздействием различных эксплуатационных нагрузок [1], [2]. При этом проводимые на российских шлюзах измерения с использованием инварной проволоки или лазерных дальномеров позволяют получать только конечные значения относительных перемещений стен камер при наполнении — опорожнении. Определить независимые (абсолютные) перемещения каждого элемента в процессе изменения уровня воды в камере используемыми методами невозможно, несмотря на то, что такие данные представляли бы значительный интерес для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций и устойчивости сооружения. Кроме того, зная характер деформирования стен по мере роста нагрузки, можно было бы оценить, как ведет себя днище камеры.

Несмотря на то, что и осадки, и горизонтальные перемещения конструкций камер шлюзов № 30 и 31 Волгоградского гидроузла в течение последних 20 лет наблюдений стабилизировались [3], [4], тем не менее наблюдаемый в последние годы процесс изменения интенсивности судопропуска на шлюзах может вызвать дополнительные деформации. Более того, как показали опытные прецезионные измерения, характер деформаций стен камер со стороны межшлюзья отличается от деформации внешних стен камер. Безусловно, для детальной оценки поведения камер шлюзов недостаточны редкие геодезические замеры и измерения ширины камеры, желательнее использовать более точные методы измерений, которые позволили бы получать полную информацию о перемещениях каждой из стен камер в процессе опорожнения — наполнения камеры, а также при перемещениях, вызванных температурными воздействиями (суточными и сезонными).

В последние годы появились новые средства измерения перемещений и деформаций — автоматические тахеометры [5] – [12]. Эти приборы дают возможность измерять весьма незначительные величины деформаций в динамике, что создает возможность наблюдать перемещения

элементов конструкции камеры шлюза. Хотя из-за незначительности перемещений верха стен камер при наполнении и опорожнении (1,5 – 2,0 мм) даже использование такого современного прибора может не дать нужного результата. Но, во всяком случае, что точно можно будет уловить, это перемещения стен камеры при сезонных температурных колебаниях. Получение даже этих сведений могло явиться серьезным успехом в совершенствовании системы мониторинга, а также расширить наши представления о процессах деформирования камеры шлюза в период эксплуатации.

В рамках выполнения комплексного анализа состояния судоходных сооружений Волгоградского гидроузла был опробован пилотный проект использования электронного тахеометра для наблюдения за динамикой деформирования камер шлюзов.

### **1. Алгоритм работы системы, использующей электронный тахеометр**

Электронный тахеометр — это геодезический прибор для измерения расстояний и углов. Расстояния определяются по разности фаз испускаемого и отраженного луча. Прямоугольные координаты объектов тахеометры определяют путем преобразования полярных координат (расстояний до наблюдаемых точек и углов) по формулам:

$$x = r \cos \varphi; y = r \sin \varphi.$$

По результатам анализа изменения положения нескольких контролируемых точек можно сделать выводы о состоянии как отдельных конструктивных элементов, так и сооружения в целом. При этом необходимо обеспечить стабильность положения самого тахеометра, координаты которого можно также периодически переопределять *методом обратной засечки* и, при необходимости, выполнять перерасчет его координат.

В рамках решения задачи по наблюдению за перемещением стен шлюза алгоритм работы электронных тахеометров-автоматов может состоять из следующих действий:

– тахеометр устанавливается в удобной и по возможности неподвижной точке гидроузла и позиционируется относительно опорных точек (такими опорными точками могут служить как пункты, зафиксированные в локальной системе координат гидроузла, так и пункты государственного геодезического обоснования, стабильность которых не вызывает сомнений);

– определяются контрольные точки на элементах конструкции шлюза, положение которых будет наблюдаться индивидуально (абсолютные перемещения) или попарно (перемещения точек друг относительно друга);

– составляется программа наблюдений контрольных точек: очередность их опроса, периодичность наблюдений;

– вводится формула для вычисления горизонтальных проложений (расстояний) между контрольными точками;

– после запуска системы периодически переопределяются координаты тахеометра относительно опорных точек, измеряются координаты контрольных точек и горизонтальные проложения между ними и от них до тахеометра.

Результаты выполненных измерений могут в графическом или табличном виде быть представлены пользователю (оператору).

В случае включения автоматического тахеометра в систему мониторинга и управления возможна оценка полученных данных по заданным критериям, выработка с использованием специализированного программного обеспечения управленческих команд и передача их на исполнительные механизмы системы. Общий алгоритм работы такой системы представлен на рис. 1.

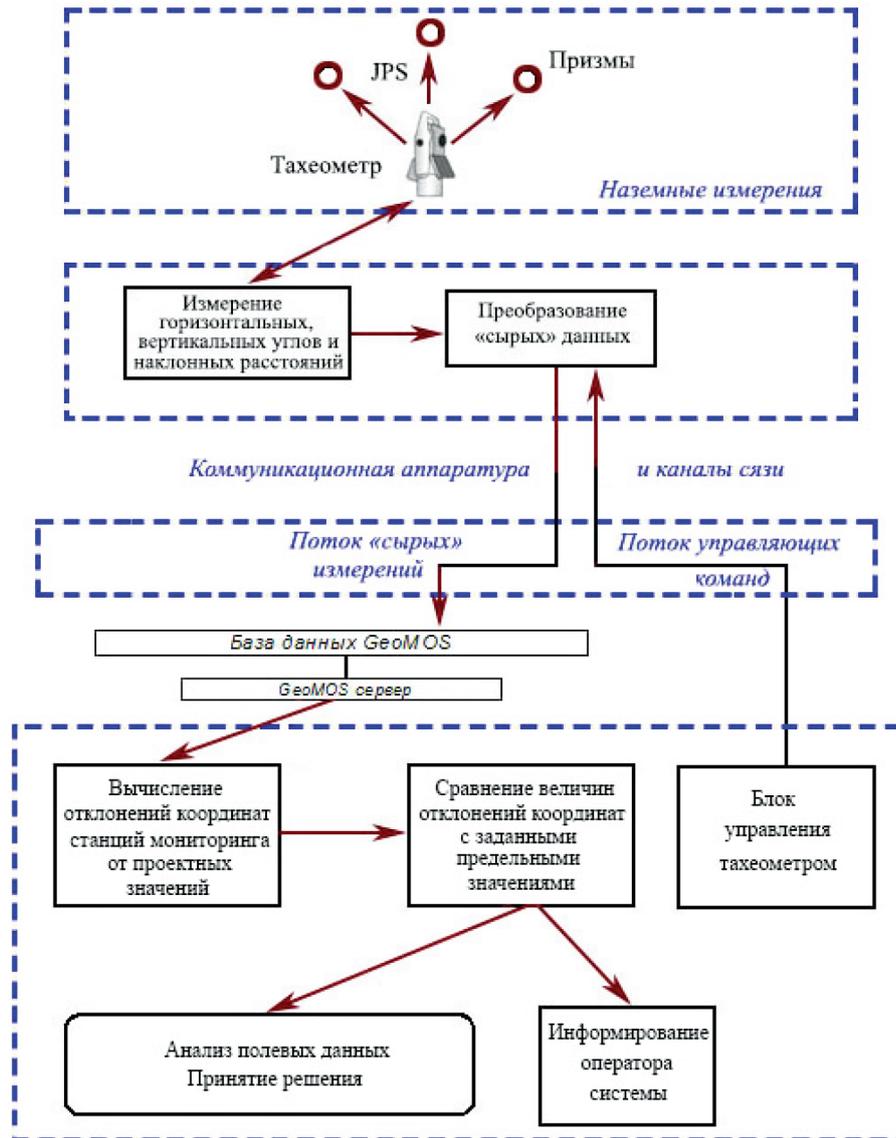


Рис. 1. Алгоритм работы системы, основанной на электронных тахеометрах

## 2. Установка оборудования на сооружениях Волгоградского гидроузла

Для изучения возможностей использования электронных тахеометров по наблюдению за перемещениями конструкций на шлюзах Волгоградского гидроузла была проведена серия измерений. При этом предполагалось решение следующих задач:

- периодическое переопределение горизонтальных проложений между парными контрольными точками, расположенными на противоположных стенах шлюза, что позволяет судить об изменениях этого относительного расстояния под влиянием различных факторов;
- периодическое переопределение координат контрольных точек относительно опорных пунктов, что позволяет судить об изменении их абсолютного положения в пространстве.

Для проведения измерений на сооружениях шлюзов № 30 и 31 был использован электронный тахеометр Leica TM30 [13]. В соответствии с техническими данными прибора, он обеспечивает угловую точность измерения 0,5" и точность измерения расстояния до миллиметра на расстояниях до 1000 м. Выполнение программы наблюдений обеспечивалось управляющим программным обеспечением (ПО) GeoMos.

По результатам рекогносцировочных работ, проведенных на гидроузле, были выбраны места установки оборудования, общая схема расстановки которого приведена на рис. 2.

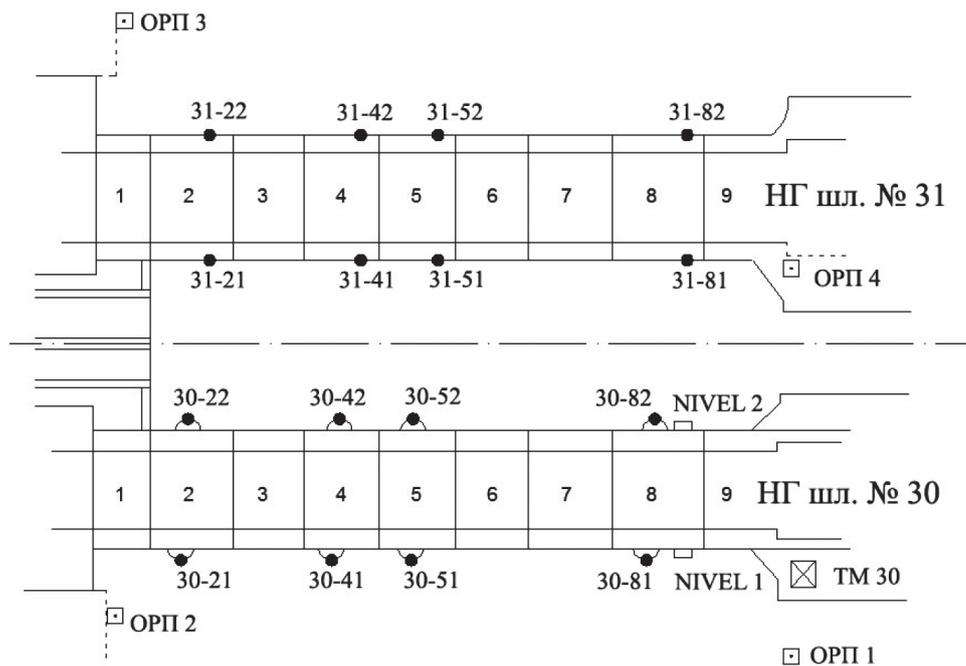


Рис. 2. Схема установки оборудования на гидроузле:  
 ТМ 30 — тахеометр; NIVEL 1 и NIVEL 2 — датчики углов наклона;  
 ОПП 1 – ОПП 4 — опорные ориентирные пункты

Тахеометр был установлен в районе нижней головы шлюза № 30 на пилоне трубчатой конструкции, управляющий промышленный компьютер смонтирован в специальном ящике в непосредственной близости от пилона и соединен с тахеометром кабелем. Над пилоном смонтирован навес для защиты прибора от осадков (рис. 3).

а)



б)



Рис. 3. Установка тахеометра:

а — тахеометр на пилоне (рядом компьютер); б — тахеометр под навесом

Для периодического переопределения координат точки установки электронного тахеометра в каждом цикле измерений было предусмотрено использование четырех ориентирных твердых пунктов ОПП 1 – ОПП 4 (рис. 4, а). Пункты были закреплены L-образными призмами на стабильном осно-

вании. Два датчика углов наклона Nivel [14] были смонтированы на противоположных сторонах восьмой секции шлюза № 30 (рис. 4, б). К местам установки датчиков подведено электропитание напряжением 220 В, данные от датчиков в управляющий компьютер поступали по беспроводной сети Wi-Fi.

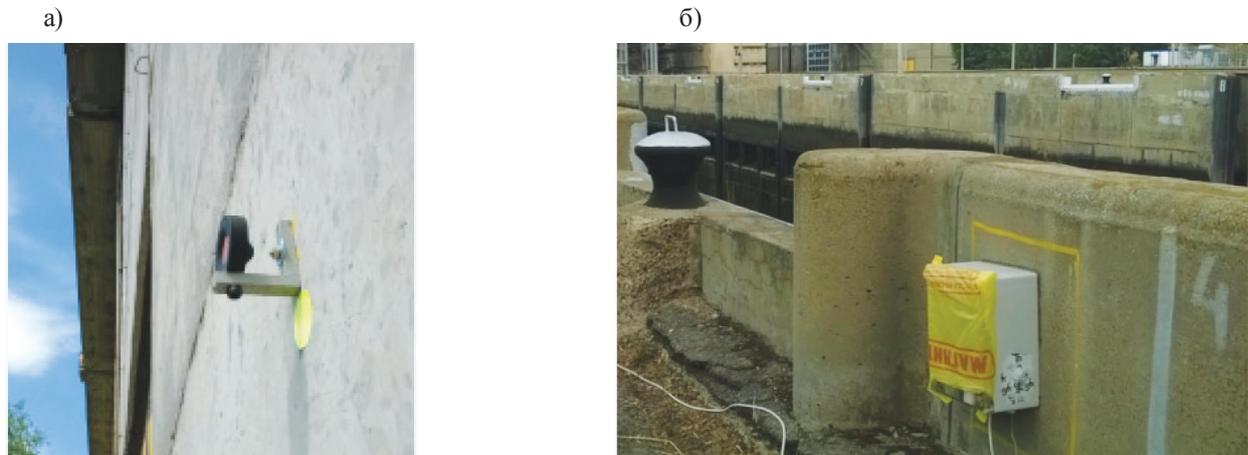


Рис. 4. Установка оборудования:  
а — опорный пункт ОРП 1; б — датчик углов наклона Nivel

Контролируемые точки были закреплены призмами попарно на секциях 2, 4, 5, 8 шлюзов № 30 и 31. На шлюзе № 30 точки закреплены посередине секций на ограждении рымных камер, на шлюзе № 31 призмы установлены на ограждении секций (рис. 5). Расстояние от тахеометра до самой дальней точки (31-22) составило 266,5 м, до самой ближней (30-81) — 46,7 м (см. рис. 2).



Рис. 5. Установка отражательных призм на секциях шлюзов:  
а — призма на камере плавучего рыма; б — призма на ограждении секции камеры

Программа наблюдений предполагала периодическую установку тахеометра на пилоне для проведения очередного цикла наблюдений и следующий алгоритм измерений:

- периодическое переопределение координат базовой точки и ориентирование прибора методом обратных засечек перед началом очередного цикла наблюдений;
- определение координат контрольных точек полярным способом при двух кругах каждые 5 мин;
- снятие отсчетов с комбинированного датчика температуры и давления каждые 10 мин (полученные данные используются для автоматического введения поправок в измеренные тахеометром линии).

Контрольные точки на шлюзах № 30 и 31 были объединены в две группы, для каждой из которых действовала вышеописанная программа. Данные поступали на управляющий компьютер

и хранились в базе данных, средствами приложений GeoMos просматривалась и визуализировалась как оперативная информация, так и информация, полученная из базы данных.

Относительное плановое положение стенок шлюзов как за длительный период, так и в периоды шлюзований определялось с помощью вычислений или непосредственных измерений горизонтальных проложений между парными точками на противоположных стенках секций. Горизонтальные проложения в данном проекте получались с использованием нескольких способов, основанных на разных принципах. Сходимость результатов, полученных разными способами, подтвердила их надежность.

*Первый способ* — периодическое вычисление расстояний между двумя контрольными точками по их координатам, полученным тахеометром. Этот способ был реализован при помощи виртуального датчика (вставленной в управляющее ПО формулы), для которого назначается программа наблюдений (вычислений) с периодичностью 5 мин. Преимущество этого способа состоит в том, что количество определяемых расстояний может быть достаточно велико, без существенного увеличения стоимости оборудования. Ограничения — точность полученных полярным методом координат контрольных точек и, соответственно, вычисленных расстояний зависит от внешних условий. В проекте вычислялось восемь линий.

*Второй способ* — определение горизонтальных перемещений контрольных точек в направлении, перпендикулярном оси шлюза, при помощи высокоточных датчиков углов наклона. Два датчика Nivel были установлены на противоположных стенках восьмой секции шлюза № 30. Управление датчиками осуществлялось ПО GeoMos. Для вычисления горизонтальных смещений также может применяться виртуальный сенсор (формула) для пересчета угла наклона в линейное смещение. Для получения общего изменения длины линии между двумя противоположными стенками результаты, полученные по формулам для каждого датчика, складываются и могут быть выведены в виде графика как отдельный виртуальный сенсор. Преимуществами способа являются полностью автоматическая и практически не обслуживаемая работа после установки и наладки, высокая чувствительность датчиков, прямое измерение величин наклонов стенок шлюза в двух плоскостях. Ограничением служит достаточно высокая стоимость при большом количестве датчиков.

*Третий способ* — непосредственное измерение расстояний между двумя противоположными стенками с помощью тахеометра. При этом тахеометр устанавливается на штативе или специальном кронштейне в створе с парой точек, ориентируясь на дальнюю точку из пары, запускается управляющая программа, выполняются автоматические измерения с заданной периодичностью, формируется текстовый файл отчета с измеренными расстояниями. Затем оборудование может быть переставлено на следующую пару точек.

Во время проведения работ было опробовано два способа контроля стабильности положения самого тахеометра:

- периодическое переопределение координат методом обратной линейно-угловой засечки;
- методом линейной засечки.

Засечка выполнялась автоматически с периодом 15 – 40 мин. Координаты станции, от которых рассчитывались координаты контрольных точек, принимались по результатам засечки, выполненной вручную в начале каждого рабочего дня, результаты автоматических повторных измерений использовались только для оценки работы системы. В процессе проведения измерений выяснилось, что пилон с тахеометром перемещается вместе с сооружением. При этом разброс результатов, полученных из линейной засечки, был в 2 раза меньше разброса координат линейно-угловой засечки. С учетом перемещения самого тахеометра корректировались измеряемые величины перемещений контрольных точек.

### **3. Анализ результатов наблюдений**

Наблюдения на шлюзах № 30 и 31 Волгоградского гидроузла проводились в летне-осенний период 2015 г. Температуры наружного воздуха достигали значений +35 – 37 °С.

### Трехмерные перемещения контрольных точек

На графике рис. 6 приведен характерный для всего периода наблюдений короткий отрезок времени, содержащий данные по трем шлюзованиям в период с 11 ч 30 мин до 14 ч 20 мин 07 августа 2015 г. Среднее расстояние для данных контрольных точек от тахеометра составляет 46,7 м. Возвратные деформации в плане по точке 30-81 в среднем составляют 0,4 – 0,5 мм, по точке 30-82 в среднем 4,2 – 4,5 мм в направлении, перпендикулярном оси шлюза, в направлении вдоль оси — в среднем 0,3 – 0,5 мм для обеих точек. По высоте видны четко зафиксированные упругие деформации величиной 2 мм для обеих точек.

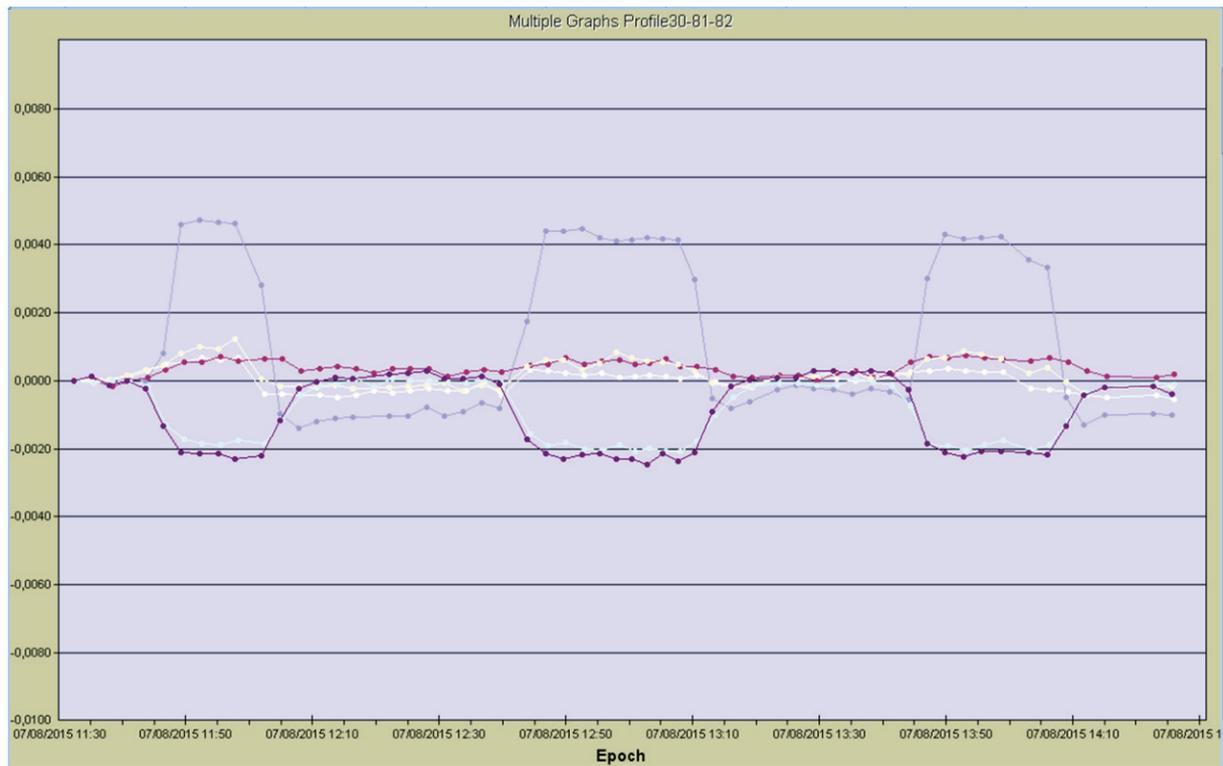


Рис. 6. Данные тахеометра о перемещении конструкций при шлюзовании, расстояние от тахеометра до контрольных точек — 46,7 м:

◆ 30-81TPS (LongDisp)	— смещение точки 30-81 перпендикулярно оси шлюза;
◆ 30-82TPS (LongDisp)	— смещение точки 30-82 перпендикулярно оси шлюза;
◆ 30-81TPS (TransDisp)	— смещение точки 30-81 вдоль оси шлюза;
◆ 30-82TPS (TransDisp)	— смещение точки 30-82 вдоль оси шлюза;
◆ 30-81TPS (HeightDisp)	— смещение точки 30-81 по высоте;
◆ 30-82TPS (HeightDisp)	— смещение точки 30-82 по высоте

Результаты измерений за длительный период (с 8 июля по 3 августа 2015 г.) для контрольной точки 30-82 приведены на рис. 7. Поскольку измерения выполнялись только в рабочее время с 8 ч утра до 17 ч, на графике видны группы измерений по каждому такому отрезку времени.

Выбросы вверх от каждой группы — это зафиксированные в момент шлюзования смещения. На графиках зафиксированы смещения относительно нулевого цикла наблюдений, направленные перпендикулярно оси шлюза (белый цвет) и вдоль оси шлюза (голубой). Из графика рис. 7 видно, что колебания величины смещения точки 30-82 за весь период наблюдений лежат в диапазоне плюс-минус 2 мм, а возвратные деформации при шлюзовании не превышают 5 мм (с учетом того, что все замеры выполнялись днем при средней температуре +35 °С).

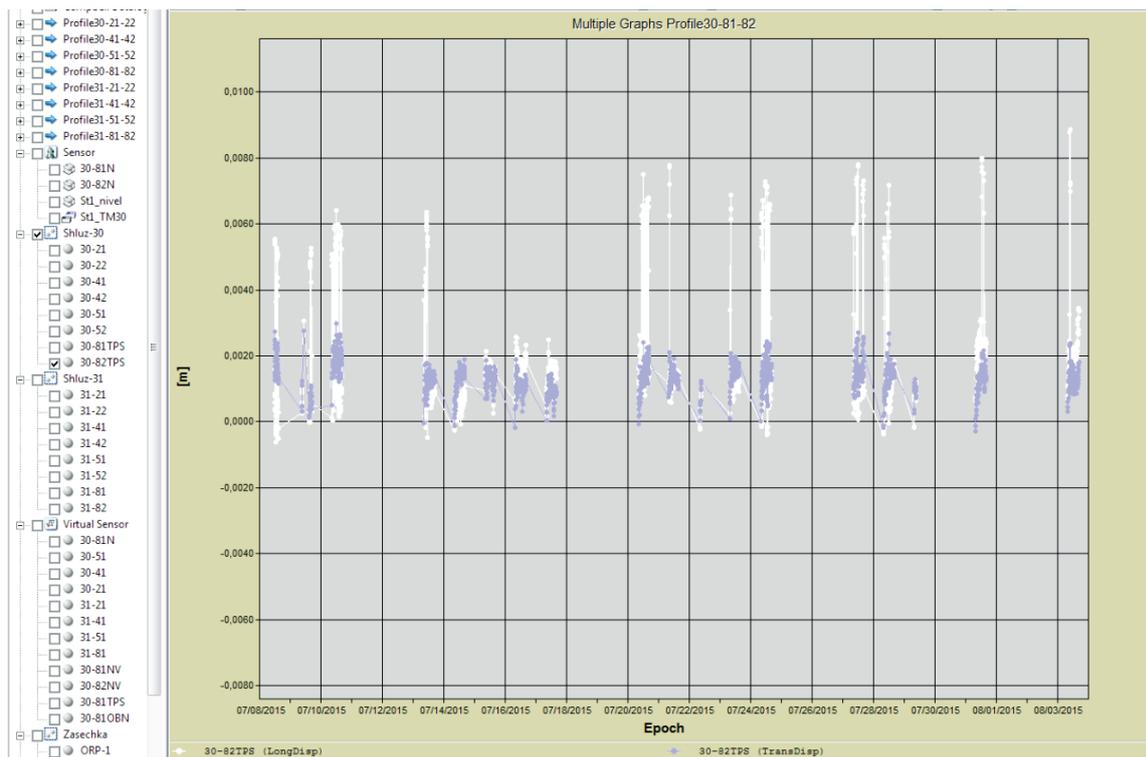


Рис. 7. Результаты измерений за период с 8 июля по 3 августа 2015 г. для контрольной точки 30-82 шлюза № 30

Измерения трехмерных перемещений контрольных точек зафиксировали также интересное явление: при наполнении шлюза № 30 шлюз № 31 «всплывает» на 2,0 — 2,5 мм, т. е. его контрольные точки перемещаются вверх (рис. 8). В противоположном случае, когда наполняется шлюз № 31, шлюз № 30 не «всплывает».

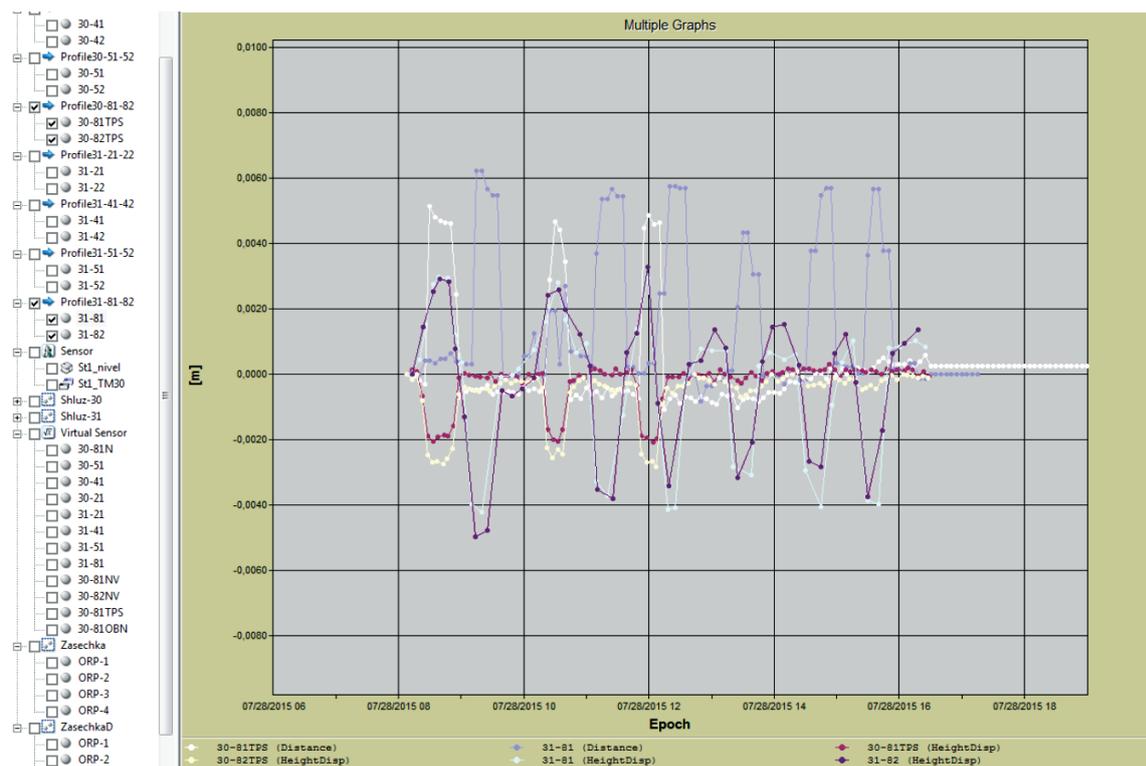


Рис. 8. Зависимость перемещений контрольных точек шлюза № 31 от наполнения шлюза № 30

*Измерение расстояний между стенками шлюзов полярным способом по результатам измерений тахеометром*

На графике рис. 9 представлены вычисленные расстояния между контрольными точками, удаленными от тахеометра на расстояниях 144, 174 и 235 м. Измерения проводились с 11 ч 30 мин до 14 ч 20 мин 07 августа 2015 г.

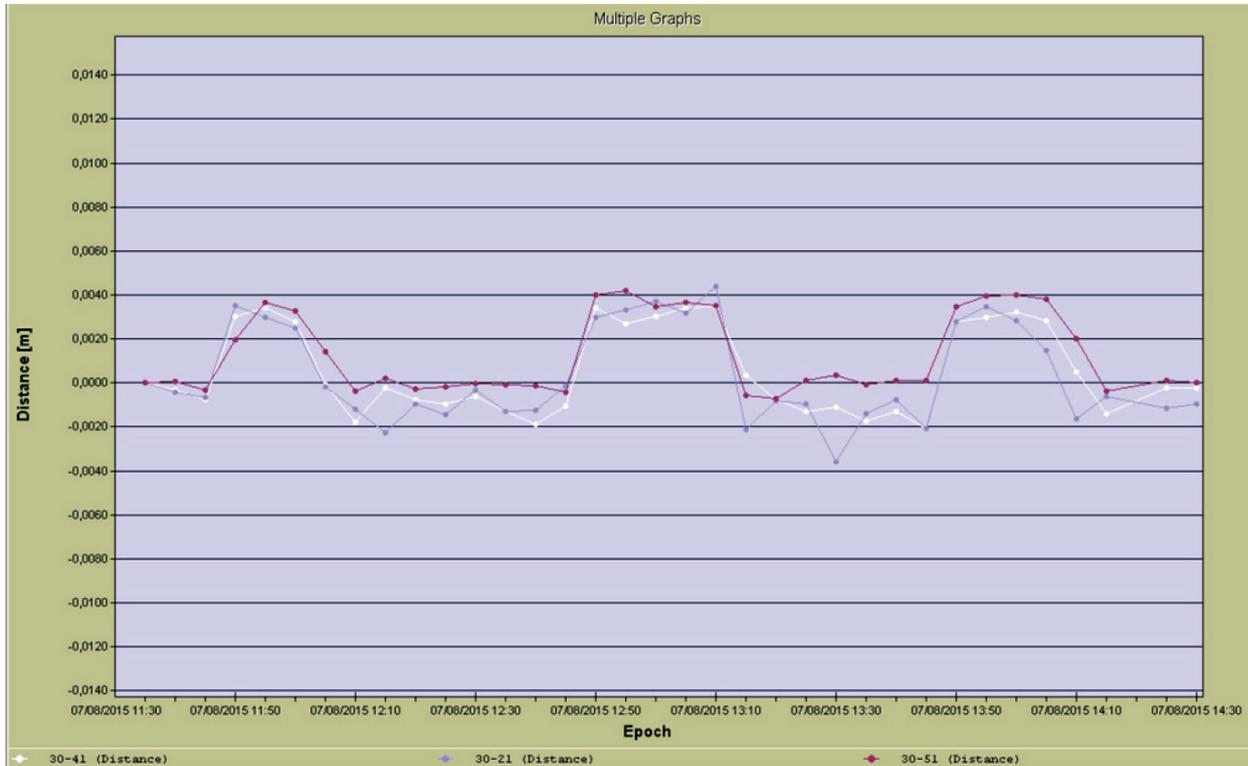


Рис. 9. Изменение расстояний между контрольными точками во время шлюзований

Из графика видно, что качество определения расстояния непосредственно до каждой отдельной контрольной точки в значительной степени зависит от влияния внешних условий и удаленности от прибора. При этом значение вычисленного относительного расстояния между контрольными точками менее подвержено такому влиянию. Поскольку время измерения координат пары точек очень мало и составляет несколько секунд, внешние условия за такой короткий промежуток измениться практически не успевают. Соответственно результаты определения изменения расстояния между парой контрольных точек во время шлюзования наилучшим образом отражают динамику перемещения стенок шлюза. Среднее изменение расстояния на секциях шлюза № 30 составило 4,2 мм.

На рис. 10 приведен пример представления изменения расстояний между стенками шлюза как в относительной мере от начала выделенного периода, так и в абсолютной, в виде собственно значений расстояний.

На рис. 11 приведены результаты измерения расстояний между стенками шлюза № 30 в отсутствие шлюзований. Прибор показывает «шум» с разбросом результатов в пределах 1 мм, при этом «шум» при определении собственно координат контрольных точек существенно выше. Это свидетельствует о том, что расстояние между стенками определяется более надежно, чем собственно координаты контрольных точек, по которым оно вычислено при одинаковых внешних условиях наблюдений.

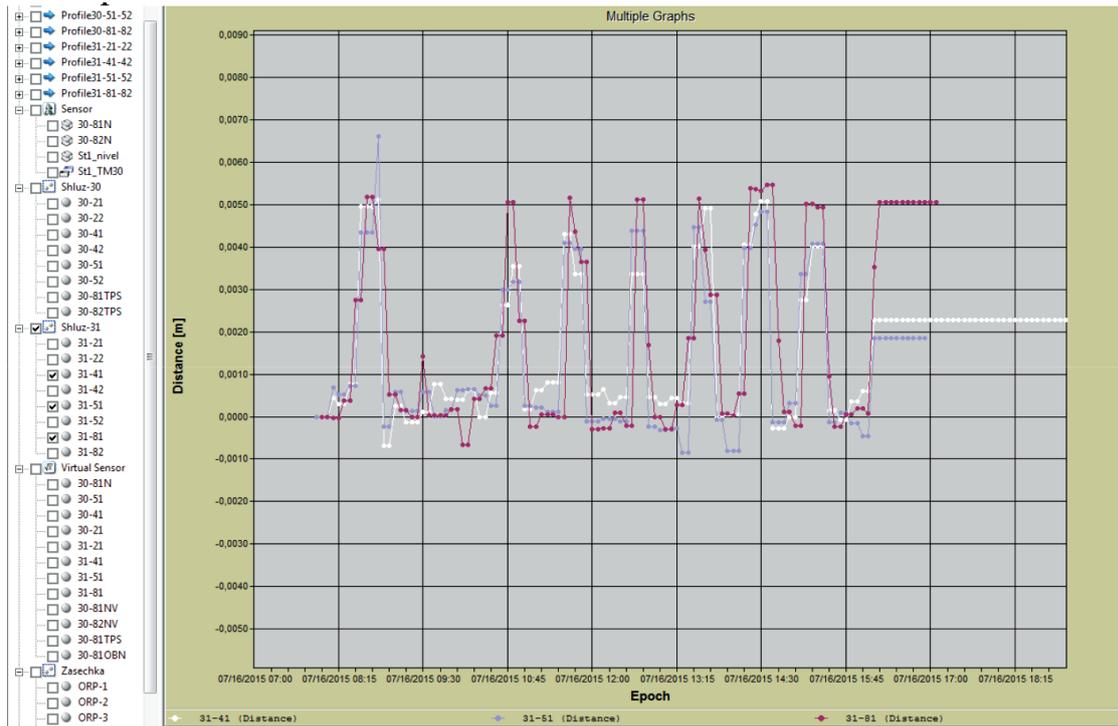


Рис. 10. Шлюз 31, секции 4, 5, 8

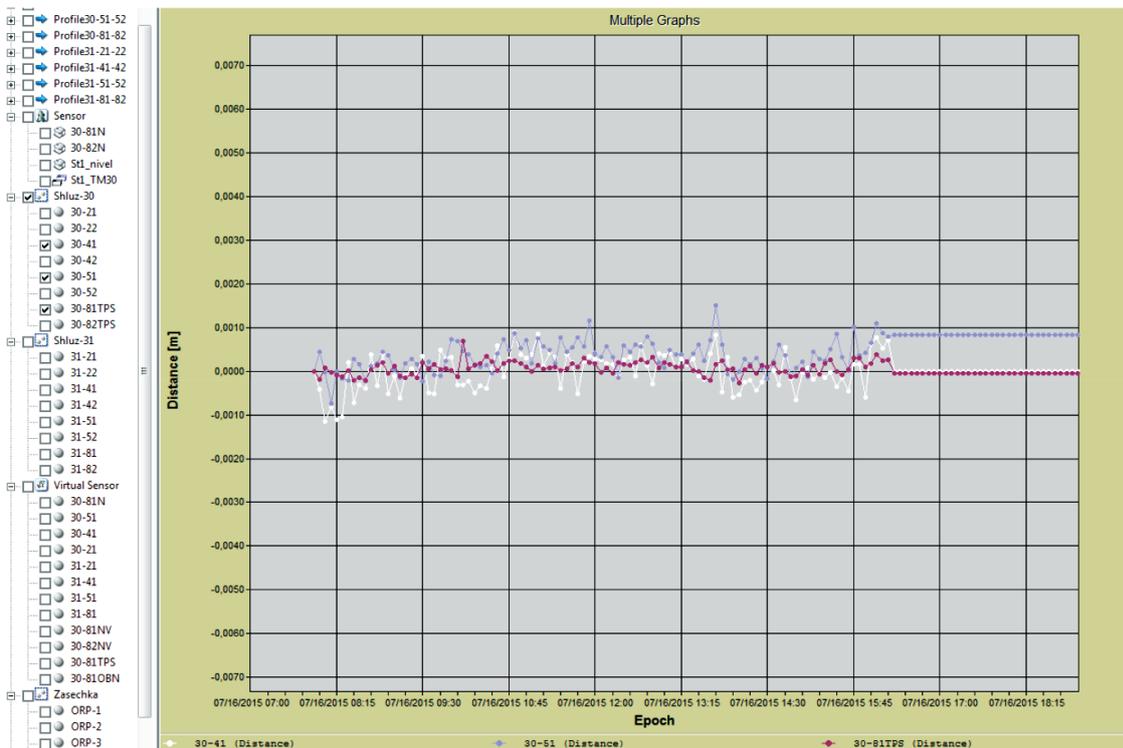


Рис. 11. Расстояние между стенками шлюза 30 в отсутствие шлюзований

**Измерение расстояний между стенками шлюзов по показаниям датчиков углов наклона Nivel**

Датчики углов наклона Nivel измеряют наклон в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: ось  $Y$  направлена вдоль оси шлюза, ось  $X$  — перпендикулярно. На графиках рис. 12

приведен пример наблюдений за перемещениями точек 30-81 и 30-82 с 15 ч 07.07.2015 г. до 15 ч 07.09.2015 г. Для наглядности перемещения отображены относительно начала выбранного периода. Из графиков видно, что верх противоположных стенок шлюза имеет разные величины смещений. Точка 30-81 смещается на расстояние около 1 мм, точка 30-82 — на расстояние около 3 мм. Среднее суммарное значение относительного перемещения составляет около 4,1 мм. Смещения в линейном выражении получены автоматически по встроенной формуле, которая «работает» как виртуальный датчик. Точно такая же динамика зафиксирована и при помощи тахеометра.

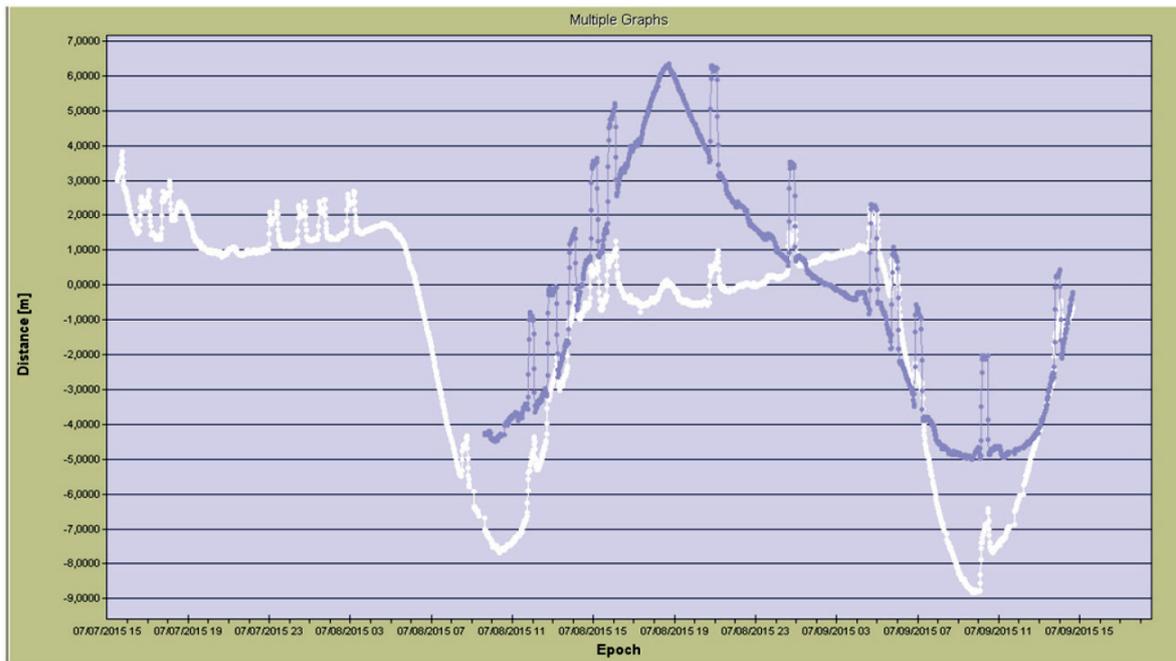


Рис. 12. Перемещение верха стен восьмой секции камеры шлюза № 30:

- ◆ 30-81NW (Distance) — горизонтальные смещения по оси X точки 30-81;
- ◆ 30-82NW (Distance) — горизонтальные смещения по оси X точки 30-82

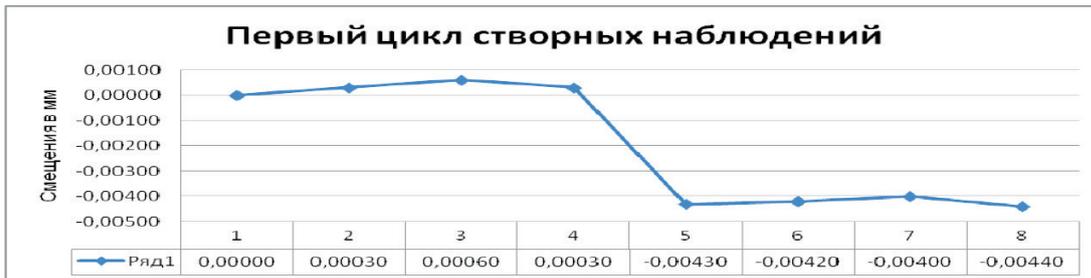
Заметим, что если рассматривать суточные движения контрольных точек, фиксируемые датчиками углов наклона, то максимальный разброс (видно на графике) составит 10 – 11 мм. Это не означает, что точки перемещаются в таком диапазоне в действительности. Причиной таких искажений служит неравномерный нагрев как измерительного оборудования, так и стен камеры шлюза. Верхняя часть стены нагревается сильнее и деформируется больше. Соответственно результаты, полученные по формуле, где предполагается, что стена высотой 20 м наклоняется целиком без изгибов, искажены.

Для более точных выводов необходимо проводить дополнительные исследования: как минимум защитить места крепления датчиков наклона от прямого воздействия солнечных лучей и сравнить результаты, полученные с помощью датчиков углов наклона, с результатами, полученными от электронных тахеометров. При этом величины горизонтальных перемещений стенок шлюзов в моменты шлюзования датчиками наклона фиксируются корректно, и они полностью совпадают с величинами, полученными с использованием тахеометра.

***Измерение расстояний между стенками шлюзов по результатам линейных измерений тахеометром, установленным в створе измеряемой линии***

Наблюдения проводились 07 августа 2015 г. с 17 ч 40 мин до 18 ч 50 мин на восьмой секции шлюза № 30 (рис. 13).

а)



б)



Рис. 13. Линейные измерения в створе восьмой секции шлюза № 30:  
 а — первый цикл измерений; б — второй цикл измерений

Первый цикл начался в момент полного наполнения шлюзовой камеры и включил в себя наполнение и затем сброс воды. Второй цикл содержал наполнение и опорожнение камеры шлюза. Среднее изменение горизонтального проложения между призмами на противоположных стенках шлюза в момент шлюзования составило 4,3 мм.

### Заключение

Выполненная работа подтвердила, что система мониторинга горизонтальных и вертикальных перемещений стен камер шлюзов, основанная на использовании высокоточных тахеометров-автоматов, позволяет фиксировать относительные пространственные перемещения контрольных точек с точностью 1 мм и меньше. Для обеспечения точности измерений в течение длительного периода наблюдений необходимо выполнять периодическое переопределение координат тахеометра, что подразумевает организацию стабильной опорной геодезической сети. В идеале сам пилон с тахеометром должен быть стабилен. При этом подтверждено, что для обеспечения наилучших результатов необходимо для переопределения координат тахеометра использовать метод линейной засечки.

В процессе проведения эксперимента было выявлено влияние смещений отдельных зданий и конструктивных элементов шлюзов друг на друга, что повлияло на результаты, поскольку оказалось, что выбранные опорные точки закреплены в местах, имеющих циклическое перемещение в диапазоне порядка 2 – 3 мм. Кроме того, наполнение или опорожнение одного шлюза сказывалось на перемещении элементов соседнего шлюза, что существенно затрудняло оценку результатов и наглядность представления результатов в виде графиков.

Изменения трехмерного положения контрольных точек в моменты шлюзования при помощи высокоточного электронного тахеометра определяются достаточно надежно. Опытным путем для конкретных условий проведения эксперимента и расположения оборудования установлено, что наилучшие результаты получены при удалении контрольных точек от тахеометра не более 170 – 180 м. Максимальное удаление от тахеометра контрольных точек составило 260 м, оценка трехмерных смещений в этом случае оказалась затруднена из-за искажений результатов измерений вертикальной и горизонтальной рефракцией, но относительное расстоя-

ние между парой контрольных точек определялось достаточно хорошо и совпадало с результатами, полученными при ручных измерениях. Система надежно фиксировала горизонтальные перемещения в моменты шлюзования в пределах 4 – 5 мм, высотные перемещения составили 2 мм. Были также зафиксированы неравномерные горизонтальные смещения стенок шлюзов внешних (примыкающих к грунту), их смещения в среднем составили 1,5 – 2,5 мм, и внутренних (соединенных между собой лотком для сброса воды), их смещения составляли в среднем 4 – 5,5 мм.

Подтвердилась возможность фиксировать изменение горизонтальных смещений стенок секций шлюзов с использованием высокоточных датчиков наклона Nivel. Направление кренов в продольном и поперечном направлении в моменты шлюзования, а также вычисленные значения горизонтальных поперечных смещений полностью совпадают с данными тахеометров. Это дает основание утверждать, что стенки камеры шлюза при наполнении и опорожнении наклоняются равномерно, без изломов.

При суточных наблюдениях влияние температурного фактора становится очень существенным. Корректную оценку кренов и перемещений в этом случае провести без дополнительных исследований оказалось невозможно. Например, необходимо учитывать характер деформаций от солнечного нагрева бетонной стенки (какая часть стабильна, а какая деформируется), а также периоды затенения от местных предметов и другие подобные факторы. При долгосрочных наблюдениях следует устанавливать датчики в местах, защищенных от прямых солнечных лучей.

Метод измерения расстояний между стенками шлюзов, когда тахеометр устанавливается в створе измеряемой линии, хоть и не дает общего представления о деформациях всего объекта в целом, но вполне может заменить измерения с применением инварных проволок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях. — М.: Транспорт, 1981. — 96 с.
2. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке уровня безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Утв. Федеральным агентством морского и речного транспорта от 15 апреля 2011 г. — М.: Росморречфлот, 2011. — 136 с.
3. Королева А. А. Анализ состояния судоходных сооружений Волгоградского гидроузла на основе данных наблюдений и измерений / А. А. Королева, С. В. Лапин, К. П. Моргунов, В. И. Щербина // Гидротехника. XXI век. — 2016. — № 3 (27). — С. 60–68.
4. Моргунов К. П. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов камер шлюзов Волгоградского гидроузла при различных условиях эксплуатации / К. П. Моргунов, М. В. Красникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.
5. ГОСТ Р 51774-2001. Тахеометры электронные. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 10 с.
6. Электронный тахеометр [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://strport.ru/instrumenty/elektronnyj-takheometr> (дата обращения: 01.12.2016).
7. Электронные геодезические тахеометры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://stroy-masterden.ru/elektronnyj-taxeometr-delaem-pravilnyj-vyibor.html> (дата обращения: 01.12.2016).
8. Характеристики тахеометров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bcoreanda.com/ShowArticle.aspx?ID=2921> (дата обращения: 01.12.2016).
9. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдения за осадками сооружений / А. В. Никонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — Т. 1. — № 1. — С. 78–86.

10. Скрипников В. А. Создание высокоточных малых линейно-угловых сетей с применением электронных тахеометров / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 84–87.

11. Мельников Е. В. Разработка системы контроля состояния гидротехнических сооружений судоходного шлюза / Е. В. Мельников, В. Н. Морозов, И. Л. Краснощеков // Современные технологии автоматизации. — 2012. — № 4. — С. 80–84.

12. Морозов В. Н. Комплексная система автоматизации судопропуска Шекснинского гидроузла / В. Н. Морозов, И. Л. Краснощеков, Л. А. Павлович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2015. — Т. 17. — № 2–4. — С. 843–850.

13. Описание и характеристики электронного тахеометра Leica TM30 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30\\_brochure\\_ru.pdf](http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30_brochure_ru.pdf) (дата обращения: 01.12.2016).

14. Высокоточный датчик наклона для структурного мониторинга Leica Nivel 210/Nivel 220 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220\\_brochure\\_ru.pdf](http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220_brochure_ru.pdf) (дата обращения: 01.12.2016).

## REFERENCES

1. *Instruktsiya po nablyudenyam i issledovaniyam na sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh so-oruzheniyakh*. Transport, 1981.

2. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke urovnya bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Utverzhdeny FAMiRT 15 aprelya 2011 g.* М.: ROSMORRECH-FLOT, 2011.

3. Koroleva, A. A., S. V. Lapin, K. P. Morgunov, and V. I. Shcherbina. “Analiz sostoyaniya sudokhodnykh sooruzhenii Volgogradskogo gidrouzla na osnove dannykh nablyudenii i izmerenii.” *Gidrotekhnika. XXI vek* 3(27) (2016): 60–68.

4. Morgunov, K. P., and M. V. Krasnikova. “Analysis of stress-strain state elements lock chamber Volgograd hydroelectric complex under different operating conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.

5. Russian Federation. State Standard GOST R 51774-2001. Electronic tacheometers. General specification. М.: ИПК Издатel'stvo standartov, 2001.

6. Elektronnyi takheometr. Web. 1 Dec. 2016 <<http://strport.ru/instrumenty/elektronnyi-takheometr>>.

7. Elektronnye geodezicheskie takheometry. Web. 1 Dec. 2016 <<http://stroy-masterden.ru/elektronnyj-taxeometr-delaem-pravilnyj-vyibor.html>>.

8. Kharakteristiki takheometrov. Web. 1 Dec. 2016 <<http://bcoreanda.com/ShowArticle.aspx?ID=2921>>.

9. Nikonov, Anton V. “Experience of application of trigonometric levelling with use electronic total stations for measuring deformations of constructions.” *Interexpo Geo-Siberia* 1.1 (2013): 78–86.

10. Skripnikov, Victor A., and Margarita A. Skripnikova. “Establishment of high-accuracy minor linear-angular networks using total station.” *Interexpo Geo-Siberia* 1.1 (2014): 84–87.

11. Mel'nikov, E. V., V. N. Morozov, and I. L. Krasnoshchekov. “Razrabotka sistemy kontrolya sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii sudokhodnogo shlyuza.” *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* 4 (2012): 80–84.

12. Morozov, Viktor, Igor Krasnoshchekov, Lev Pavlovich, Igor Pavlovich, Dmitriy Krasinskiy, Ivan Danilushkin, Evgeniy Melnikov, and Sergey Kolpashchikov. “Crafts passing automation complex system at sheksninskiy water-engineering system.” *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 17.2–4 (2015): 843–850.

13. Opisaniye i harakteristiki jelektronnogo taheometra Leica TM30. Web. 1 Dec. 2016 <[http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30\\_brochure\\_ru.pdf](http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30_brochure_ru.pdf)>.

14. Vysokotochnyi datchik naklona dlya strukturnogo monitoringa Leica Nivel 210/Nivel 220. Web. 1 Dec. 2016 <[http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220\\_brochure\\_ru.pdf](http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220_brochure_ru.pdf)>.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Козлов Роман Валерьевич** —  
начальник отделения ИДС  
АО «НИИЭС»  
125362, Российская Федерация, Москва, а/я 393,  
Строительный проезд 7А  
e-mail: [kozlovrv@niies.ru](mailto:kozlovrv@niies.ru)  
**Ли Владимир** — ведущий эксперт  
ООО «Фирма Г.Ф.К.»  
109004, Российская Федерация, Москва,  
Шелапутинский пер. 6  
e-mail: [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)  
**Моргунов Константин Петрович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская 5/7  
e-mail: [morgunovkp@gumrf.ru](mailto:morgunovkp@gumrf.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kozlov, Roman V.** —  
Director of IDS Department  
JSC «NIIES»  
7A Stroitel'nyi proezd, Moscow, a/ya 393, 125362,  
Russian Federation  
e-mail: [kozlovrv@niies.ru](mailto:kozlovrv@niies.ru)  
**Li, Vladimir** — leading expert  
LLC "Firma G.F.K."  
6 Shelaputinsky lane, Moscow, 109004, Russian  
Federation  
e-mail: [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)  
**Morgunov, Konstantin P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [morgunovkp@gumrf.ru](mailto:morgunovkp@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 14 декабря 2016 г.  
Received: December 14, 2016.*