

**Совершенствование средств измерения деформаций конструкций  
судоходных шлюзов**

Моргунов К. П.

Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С. О. Макарова  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Представлены результаты использования электронного тахеометра для определения деформаций конструкций секций камеры судоходного шлюза. Установлено, что изменения трехмерного положения контрольных точек в моменты шлюзования определяются достаточно надежно, причём наиболее точно определяется относительное расстояние между парой контрольных точек. Рекомендовано использование тахеометра в системе мониторинга состояния гидротехнических сооружений*

При мониторинге состояния конструкций судоходного шлюза, работающего в составе действующего гидроузла, одной из наиболее проблемных позиций является измерение перемещений стен камеры под воздействием различных эксплуатационных нагрузок. Основной причиной таких трудностей является то обстоятельство, что имеющимися в составе штатной контрольно-измерительной аппаратуры геодезическими средствами определять деформации стен камер практически невозможно. При работе шлюза элементы конструкций камер претерпевают динамические (меняющиеся в течение процесса) деформации, однако проводимые на объектах измерения позволяют получать только конечные значения относительных перемещений стен камер при наполнении–опорожнении. Определить независимые перемещения каждого элемента конструкции в процессе изменения уровня воды в камере существующими методами нельзя. Интерес представляют также деформации, вызываемые температурными воздействиями, изменяющимися в течение суток. Такие данные интересны 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 и днище камеры.

Появление новых средств измерения перемещений – автоматических тахеометров создает потенциальную возможность приблизиться к решению обозначенной выше задачи. Не смотря на незначительность перемещений верха стен камер при наполнении и опорожнении (1,5–2,0 мм), с использованием такого прибора можно будет оценить перемещения стен камеры при сезонных температурных колебаниях. Получение даже этих

сведений было бы достаточным успехом в совершенствовании системы мониторинга, расширило бы представления о процессах деформирования камеры шлюза в период эксплуатации.

Для оценки возможностей использования электронного тахеометра для наблюдения за динамикой деформирования камер шлюзов в качестве пилотного проекта был выполнен цикл измерений на судоходных сооружениях Волгоградского гидроузла.

Электронный тахеометр – это геодезический прибор для измерения расстояний и углов по разности фаз испускаемого и отражённого лучей. С использованием встроенного программного обеспечения (ПО) тахеометр в автоматическом режиме рассчитывает координаты и высоты наблюдаемых точек. Управляющее ПО системы дает возможность многократно перепределять координаты, отслеживая их изменение во времени, вычислять трехмерные изменения координат, скорость смещения наблюдаемых точек и другие величины.

#### ***Установка оборудования и процедура измерений***

Судопропускные сооружения Волгоградского гидроузла – двухкамерные двухниточные железобетонные шлюзы (№ 30 и № 31 по нумерации Волжских шлюзов) с распределительной системой питания. Для проведения измерений на сооружениях шлюзов был использован электронный тахеометр Leica TM30, обеспечивающий в соответствии с техническими данными прибора [1] угловую точность измерения 0,5" и точность измерения расстояния – до 1 миллиметра на расстояниях до 1000 м.

Тахеометр устанавливался в районе нижней головы шлюза № 30 на пилоне трубчатой конструкции, управляющий компьютер размещался в специальном коробе в непосредственной близости от пилона и соединялся с тахеометром кабелем (рис. 1).



Рис. 1. Тахеометр на пилоне



Рис. 2. Отражательные призмы на секциях шлюзов

В процессе выполнения измерений предполагалось контролировать положение верха секций 2, 4, 5 и 8 на каждом из шлюзов. В контрольных точках на конструкциях камер устанавливались отражающие призмы: на шлюзе № 30 – на ограждении рымных ниш, на шлюзе № 31 – на парапете секций камеры (рис. 2).

На рис. 3 приведена схема размещения измерительного оборудования на гидроузле.

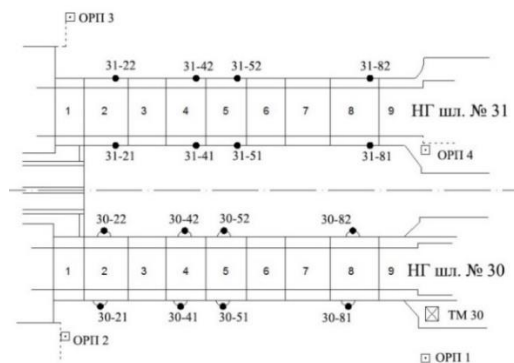


Рис. 3. Схема размещения оборудования на гидроузле:  
ТМ 30 – тахеометр; ОРП 1 ÷ ОРП 4 – опорные ориентирные пункты;  
30–21 ÷ 31–82 – места установки отражающих призм

Для периодического переопределения координат точки установки тахеометра в каждом цикле измерений на неподвижных конструкциях шлюзов были установлены 4 ориентирных неподвижных пункта ОРП 1 ÷ 4 (рис. 3). Расстояние от тахеометра до самой дальней контрольной точки (31–22) составило 266,5 метра, до самой ближней (30–81) – 46,7 метра (рис. 3).

Программа наблюдений предполагала следующий алгоритм измерений:

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

Относительное плановое положение контрольных точек, как за длительный период, так и в периоды шлюзований определялось посредством

вычислений или непосредственных измерений горизонтальных проложений между парными точками на противоположных стенках секций. Горизонтальные проложения в данном проекте получались с использованием двух способов, основанных на разных принципах. Сходимость результатов, полученных разными способами, подтвердила их надежность.

Первый способ заключался в периодическом вычислении расстояний между двумя контрольными точками по их координатам, полученным тахеометром. Способ был реализован при помощи виртуального датчика (вставленной в управляющее ПО формулы) для которого назначалась программа наблюдений (вычислений) с периодичностью 5 минут. Способ характерен тем, что количество определяемых расстояний может быть достаточно велико без существенного увеличения стоимости оборудования. Однако при этом точность полученных полярным методом координат контрольных точек и, соответственно, вычисленных расстояний зависит от внешних условий. В проекте вычислялось 8 линий.

Другой способ – непосредственное измерение расстояний между двумя противоположными стенками с помощью тахеометра. Тахеометр устанавливался в створ, в котором расположена пара контрольных точек, запускалась управляющая программа и выполнялись автоматические измерения взаимного расстояния между точками с заданной периодичностью. Затем оборудование может быть переставлено на следующую пару точек.

Во время проведения работ по измерению контролировалось положение самого тахеометра. В начале каждого рабочего дня засечка координат места расположения тахеометра выполнялось вручную, затем – автоматически с периодом от 15 до 40 минут. В процессе проведения измерений выяснилось, что пилон с тахеометром перемещается вместе с сооружением. Поэтому с учетом перемещения самого тахеометра корректировались измеряемые величины перемещений контрольных точек.

#### ***Анализ результатов наблюдений***

Характерные трехмерные перемещения контрольных точек, соответствующие данным по трем шлюзованиям, приведены на рис. 4. 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 шлюза – в среднем 0,3–0,5 мм для обеих точек. По высоте видны четко зафиксированные упругие деформации величиной 2 мм для обеих точек.

Результаты измерений за длительный период (за 25 дней) для контрольной точки 30–82 приведены на рис. 5. Измерения выполнялись только в рабочее время с 8 часов утра и до 17 часов, поэтому 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).

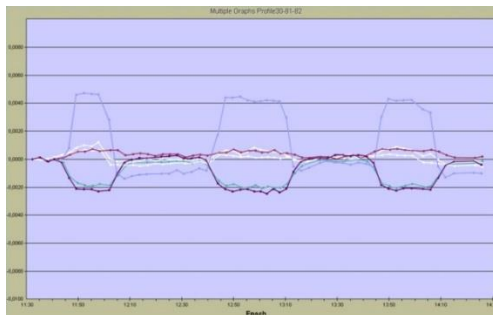


Рис. 4. Графики перемещений контрольных точек на шлюзе № 30:



- смещение точки 30–81 перпендикулярно оси шлюза;
- смещение точки 30–82 перпендикулярно оси шлюза;
- смещение точки 30–81 вдоль оси шлюза;
- смещение точки 30–82 вдоль оси шлюза;
- смещение точки 30–81 по высоте;
- смещение точки 30–81 по высоте

Из рис. 5 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 около плюс 35 градусов Цельсия).

Оценка влияние внешних условий на точность измерения показала существенное зависимость показаний от удалённости контрольной точки от прибора и наличия солнечной рефракции (наблюдения выполнялись в солнечную погоду при сильной рефракции). Однако значение вычисленного относительного расстояния между контрольными точками менее подвержено такому влиянию, расстояние между стенками определяется более надежно, чем собственно координаты контрольных точек, по которым оно вычислено, при одинаковых внешних условиях наблюдений. Среднее изменение расстояния на секциях шлюза № 30 при наполнении и опорожнении составило 4,2 мм.

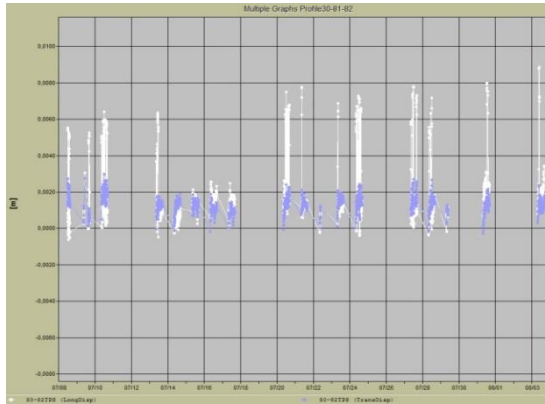


Рис. 5. Графики перемещения контрольной точки 30–82

Измерения тахеометром, установленным в створе измеряемой линии, были проведены для цикла наполнения и опорожнения камеры шлюза, данные представлены на рис. 6. Среднее изменение горизонтального положения между призмами на противоположных стенках шлюза в момент шлюзования составило 4,3 мм.

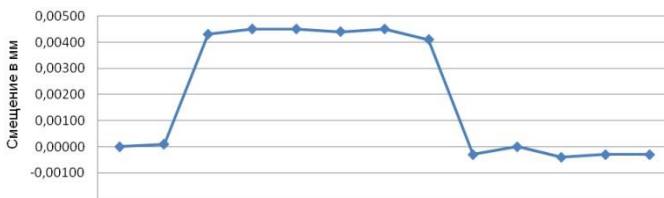


Рис. 6. Линейные измерения в створе восьмой секции шлюза № 30

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 обеспечивать периодическое переопределение координат тахеометра, что подразумевает организацию стабильной опорной геодезической сети.

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 сильных искажений результатов измерений вертикальной и горизонтальной рефракцией. Но относительное расстояние 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.

Результаты эксперимента оценивались по сводным таблицам значений результатов за определенный период и построенным по ним графикам. Такая «визуальная» оценка результатов оказалась серьезно затруднена сложностью происходящих при работе шлюза процессов и влиянием их друг на друга. Например, «всплески», показывающие смещения на графиках в моменты шлюзования, затрудняют оценку процесса в целом. Поэтому при долгосрочном (постоянном) использовании тахеометра в системе мониторинга состояния гидротехнических сооружений целесообразна разработка методики оценки результатов, внесение ее в базу данных и использование в дальнейшем. При этом измерения могут выполняться как в автоматическом режиме при стационарной (долгосрочной) установке оборудования, так и в режиме временной установки оборудования на заранее подготовленные места, а также в «ручном режиме», устанавливая тахеометр-автомат в створе измеряемой линии. Метод измерения расстояний между стенками шлюзов, когда тахеометр устанавливается в створе измеряемой линии, хотя и не дает общего представления о деформациях всего объекта в целом, но вполне может заменить устаревшие способы с применением инварных проволок.

### **Литература**

1. Описание и характеристики электронного тахеометра Leica TM30 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30>.