

УДК 621.373.826-791:627.82

Лазерный дальномерный мониторинг положения гидротехнических сооружений (на примере Усть-Каменогорского шлюза)

А.А. Тихомиров¹, В.В. Татур¹, В.М. Ляпунов^{2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический 10/3, Россия

²Усть-Каменогорский судоходный шлюз Республиканского государственного казенного Восточно-Казахстанского предприятия водных путей Республики Казахстан
070001, г. Усть-Каменогорск, ул. Шлюзовая, 14, Республика Казахстан

Поступила в редакцию 21.01.2015 г.

Представлены описание лазерной системы дальномерного мониторинга отклонений стенок Усть-Каменогорского судоходного шлюза шахтного типа с глубиной камеры более 47 м и результаты 8,5-летних наблюдений за этими отклонениями, обусловленными сезонными температурными деформациями и сменными динамическими нагрузками в процессе наполнения-опорожнения камеры. Определена наметившаяся тенденция уменьшения ширины камеры шлюза в одном из верхних поперечных сечений со скоростью ~2,2 мм/год. Исследовано влияние процесса наполнения-опорожнения камеры на динамику отклонения стенок камеры.

Ключевые слова: лазерный дальномерный мониторинг, Усть-Каменогорский судоходный шлюз, воздействие переменных гидравлических нагрузок и температур, отклонения стенок; laser rangefinder monitoring, Ust-Kamenogorsk shipping lock, effects of variable hydraulic loads and temperatures, wall deflections.

Введение

Гидротехнические сооружения, построенные на большинстве крупных рек бывшего СССР в 20–80-е гг. прошлого века, за прошедшие годы подвергались значительным погодным и гидродинамическим воздействиям и нуждаются в постоянном наблюдении за их состоянием. На входящие в состав этих сооружений камеры судоходных шлюзов воздействуют не только температурные деформации, связанные со сменой сезонов зима–лето, но и переменные гидродинамические нагрузки, происходящие при наполнении и опорожении камеры для пропуска судов из верхнего бьефа водохранилища на нижний бьеф и обратно.

Уникальным гидротехническим объектом является высоконапорный однокамерный шлюз шахтного типа, входящий в состав Усть-Каменогорского гидроузла и сооруженный в начале 50-х гг. XX в. [1, 2] на р. Иртыш. Усть-Каменогорский шлюз (УКШ) имеет глубину камеры более 47 м при общей длине 100 м. Регион, где расположен УКШ, относится к зоне резко континентального климата (перепад температур от -40°C зимой до $+40^{\circ}\text{C}$ летом) и, кроме того, располагается в зоне высокой

сейсмичности (до 9 баллов) [3]. Таким образом, УКШ – опасный техногенный объект, который требует постоянного мониторинга его состояния, поскольку ниже по течению реки в 10 км находится г. Усть-Каменогорск с населением 300 тыс. человек с высокоразвитой металлургической промышленностью.

Возможности лазерного мониторинга за положением стенок камеры УКШ были продемонстрированы авторами ранее [4, 5]. Разработанная в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) лазерная система дальномерного мониторинга (ЛСДМ) была установлена на УКШ в августе 2006 г. и до настоящего времени функционирует, позволяя наблюдать за отклонениями стенок камеры под воздействием температурных деформаций, а также при воздействии переменных гидравлических нагрузок. В статье приводятся результаты 8,5-летних наблюдений.

Краткое описание УКШ и ЛСДМ

Детальное описание объекта мониторинга – УКШ – и разработанной ЛСДМ приведено в [4, 5]. На рис. 1 представлены одно из поперечных сечений и план УКШ, где проходят трассы двух лучей ЛСДМ. Береговая стенка УКШ боковой поверхностью опирается через гравийно-песчаную засыпку на коренную скальную породу правого берега реки.

* Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru); Валерий Владимирович Татур (tatur@imces.ru); Виктор Михайлович Ляпунов (lv51@rambler.ru).

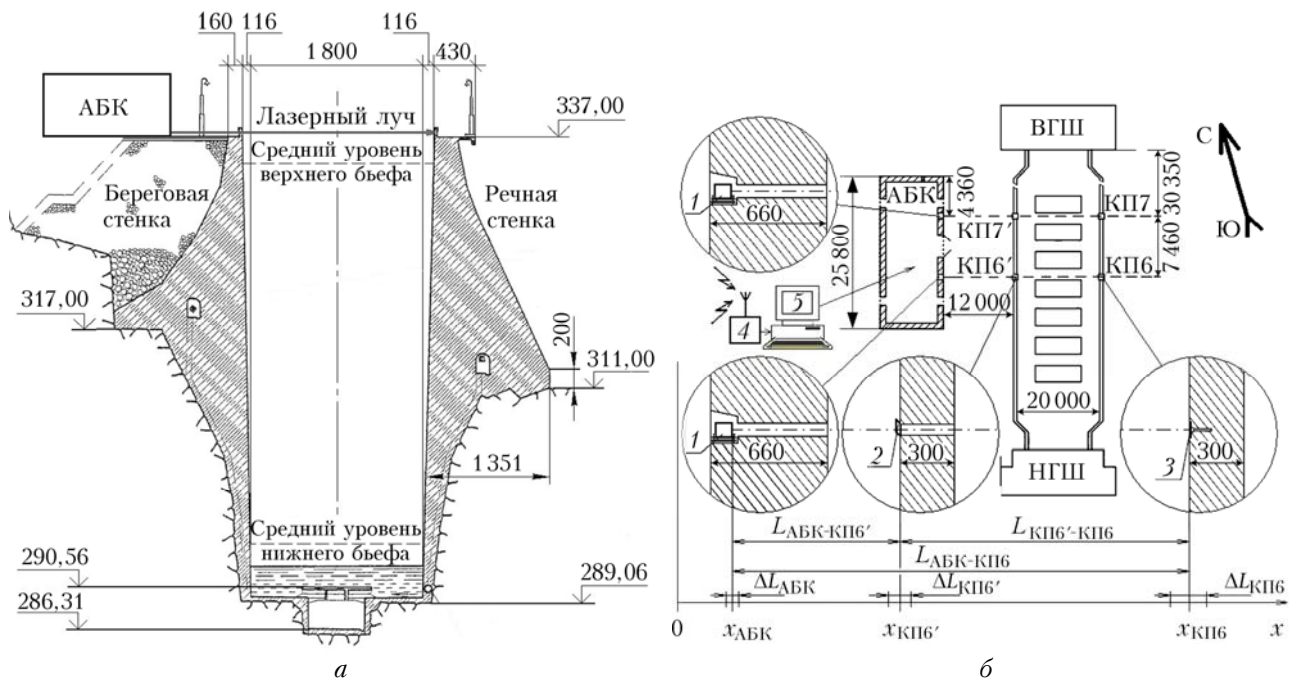


Рис. 1. Схема размещения элементов ЛСДМ на УКШ: *а* – поперечное сечение камеры (вид со стороны нижнего бьефа, строительный чертеж, размеры в сантиметрах, высотные отметки в метрах); *б* – план шлюза (размеры в миллиметрах): 1 – дальномеры; 2 – поворотные отражатели; 3 – стационарные отражатели; 4 – Bluetooth-адаптер; 5 – компьютер. ВГШ – верхняя голова шлюза; НГШ – нижняя голова шлюза; КП6', КП7' и КП6, КП7 – места размещения отражателей

На скальный грунт опирается и дно камеры шлюза. Речная стенка представляет собой вертикальное железобетонное сооружение трапециевидного сечения высотой 26 м над коренным грунтом берега реки и подвержена отклонениям за счет температурных деформаций, а также в процессе наполнения-опорожнения камеры. Каждая из стенок камеры УКШ состоит из 10 секций, имеющих длину 10 м и разделенных температурно-осадочными швами. При этом секция, в которой расположен контрольный пункт КП7, при строительстве была выполнена как экспериментальная – с предварительно напряженной арматурой.

В состав ЛСДМ входят два лазерных дальномера 1 типа Leica DISTO™ plus [5], предназначенные для измерения расстояний от 0,2 до 200 м при отражении излучения от диффузно рассеивающей поверхности. Паспортная погрешность измерения расстояний в указанном диапазоне составляет $\Delta L_d = \pm 1,5$ мм. Для облегчения условий эксплуатации дальномеров они размещались в нишах стены здания административно-бытового корпуса (АБК) (рис. 1, б). В холодные сезоны года каналы в стенках открывались только на время проведения измерений, которое занимало не более 10 мин. Измерительные трассы были расположены вблизи мест, где в предыдущие годы выполнялись измерения отклонений стенок с помощью мерной проволоки (эти измерения являлись довольно трудоемкой и не совсем презентабельной процедурой). Поворотные отражатели 2, установленные в парапетах береговой стенки, в положении «открыто» обеспечивали

прохождение лазерного луча через канал в береговом парапете до стационарного отражателя 3, забетонированного в парапете речной стенки. Результаты измерений фиксировались в базе данных компьютера, туда же заносились дата измерений, температура T воздуха и бетона в стенках камеры, уровень воды в верхнем и нижнем бьефе (УВБ и УНБ) гидроузла, состояние камеры шлюза («наполнена», «опорожнена», «осушена»). Для повышения достоверности проводилось усреднение результатов измерений по пяти замерам на каждой измерительной трассе.

Теоретические оценки результатов дальномерных измерений

Все объекты УКШ, на которых размещены элементы ЛСДМ, имеют сезонные смещения из-за изменений температуры, поэтому привяжем лазерную измерительную систему координат к базовой неподвижной системе координат, ось x которой совпадает с направлениями дальнометрирования, а начало этой системы (точка 0) считается все время неподвижным (см. нижнюю часть рис. 1, б). В базовой системе положение объектов УКШ на оси x фиксируется следующими координатами: $x_{АБК}$ – начало отсчета дальномера, $x_{КП6'}$ и $x_{КП6''}$ – поверхности отражателей в парапетах береговой и речной стенок соответственно (здесь $j' = 6', 7'; j = 6, 7$). При смене температур стена здания АБК, а следовательно и дальномеры, перемещаются в базовой системе координат в пределах $\Delta L_{АБК}$. Аналогичные

величины сезонных смещений $\Delta L_{\text{КП}j}$ и $\Delta L_{\text{КП}j}$ имеют парапеты береговой и речной стенок камеры, в которых установлены отражатели 2 и 3. В процессе наполнения-опорожнения камеры подобные смещения отражателей в парапетах стенок обусловлены гидравлическими воздействиями воды, наполняющей шлюз.

Измеряемые с помощью дальномеров величины $L_{\text{АБК-КП}j}$, равные ~ 12 м, содержат следующие составляющие (в базовой системе координат):

$$L_{\text{АБК-КП}j} = (L_{\text{АБК-КП}j})_{\text{ист}} + \Delta L_{\text{АБК}} + \Delta L_{\text{КП}j} + \Delta L_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $(L_{\text{АБК-КП}j})_{\text{ист}}$ – «истинное» (не учитывающее сезонных смещений) расстояние между дальномером, размещенным в стене АБК, и отражателем, установленным в парапете береговой стенки (в неподвижной системе координат); $\Delta L_{\text{д}}$ – погрешность измерения расстояния дальномером, которая включает систематическую и случайную составляющие. Аналогичное выражение можно записать для измеряемых величин $L_{\text{АБК-КП}j}$, равных $\sim 32,8$ м:

$$L_{\text{АБК-КП}j} = (L_{\text{АБК-КП}j})_{\text{ист}} + \Delta L_{\text{АБК}} + \Delta L_{\text{КП}j} + \Delta L_{\text{д}}. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) показывают, что в величину расстояния, измеряемого дальномером, вносят вклад погрешность дальномера $\Delta L_{\text{д}}$ и его возможные сезонные смещения $\Delta L_{\text{АБК}}$. Последняя величина нами не была оценена из-за отсутствия базовой нулевой точки отсчета в неподвижной системе координат.

Величина $\Delta L_{\text{АБК}}$ также не учитывалась при измерениях смещений парапетов стенок камеры в процессе ее наполнения-опорожнения, который происходит в интервале нескольких часов. Кроме того, давление воды при наполненной камере на фундамент стены АБК демпфируется гравийно-песчаной засыпкой. При этих измерениях можно считать, что величина $\Delta L_{\text{АБК}}$, входящая в соотношения (1) и (2), пренебрежимо мала.

При оценках изменений ширины камеры $L_{\text{КП}j-\text{КП}j'}$ в соответствующих ее сечениях по разностному соотношению

$$L_{\text{КП}j-\text{КП}j'} = L_{\text{АБК-КП}j} - L_{\text{АБК-КП}j'} \quad (3)$$

исключаются возможные смещения $\Delta L_{\text{АБК}}$ стены здания АБК, а также систематическая составляющая погрешности измерений дальномером. Случайная составляющая погрешности уменьшается за счет усреднения результатов измерений по пяти замерам.

Приведенные оценки смещений объектов УКШ с размещенными на них элементами ЛСДМ позволяют сделать заключение, что все полученные результаты измерений по смещению секций стенок камеры определены относительно исходных положений установок дальномеров в стене здания АБК. Эти положения дальномеров приняты неизменными на весь многолетний период наблюдений. Отметим также, что поскольку дальномеры в нишах здания АБК были жестко зафиксированы, периодические

поверки погрешности измерений дальномеров за весь период наблюдений не проводились.

Результаты многолетних измерений отклонений стенок под влиянием температурных деформаций

В период с 2006 по 2014 г. средний уровень воды на верхнем бьефе Усть-Каменогорского водохранилища относительно уровня Балтийского моря составляет $(334,4 \pm 0,3)$ м, уровень воды в р. Иртыш (на нижнем бьефе) – $(294,7 \pm 0,5)$ м. Измерения выполнялись персоналом УКШ каждый месяц во все сезоны года. За истекший период в общей сложности было проведено более 200 сеансов дальномерных измерений расстояний на трассах АБК-КП6', АБК-КП7', АБК-КП6, АБК-КП7.

Главными задачами мониторинга являлись оценка максимальных сезонных отклонений стенок камеры в двух поперечных сечениях УКШ относительно лазерных дальномеров и определение трендов в изменении среднего положения стенок камеры за этот период. Дополнительно в 2008–2009 и 2012–2014 гг. проводилась оценка влияния давления воды на положение стенок камеры шлюза при ее наполнении и последующем опорожнении.

Результаты измерений, выполненных за 8,5 лет, представлены на рис. 2. Верхние диаграммы (а и в) по каждой трассе показывают измеренные сезонные колебания парапетов секций речной и береговой стенок камеры относительно здания АБК. Ниже (б и г) даны рассчитанные по соотношению (3) значения ширины камеры шлюза $L_{\text{КП}j-\text{КП}j'}$ на соответствующих трассах.

Следует отметить, что среднеквадратичная ошибка измерений расстояний по пяти замерам только в 10% превышала паспортное значение основной погрешности измерения дальномера $\Delta L = \pm 1,5$ мм и только на трассах до отражателей в речной стенке. В этом случае на результаты измерений оказывали влияние турбулентные и рефракционные искажения лазерного луча, проходящего над верхней частью камеры шлюза, при повышенной влажности и перепадах температуры на разных участках трассы над глубокой камерой шлюза. Однако эти измерения не были обеспечены соответствующими метеорологическими данными.

Поскольку измерения проводились не строго периодически, точки, отображающие результаты измерений на диаграммах (см. рис. 2), показаны с разными временными интервалами между ними. Затененные участки диаграммы на расстояниях между береговой и речной стенками соответствуют состоянию камеры «осушена» в указанный период, когда проводились ремонтные работы в камере.

В нижней части рис. 2 приведены сезонные колебания температуры, которые подтверждают резко континентальный климат региона. Следует отметить, что в течение года не функционировал датчик температуры бетона (декабрь 2012 г. – декабрь 2013 г.).

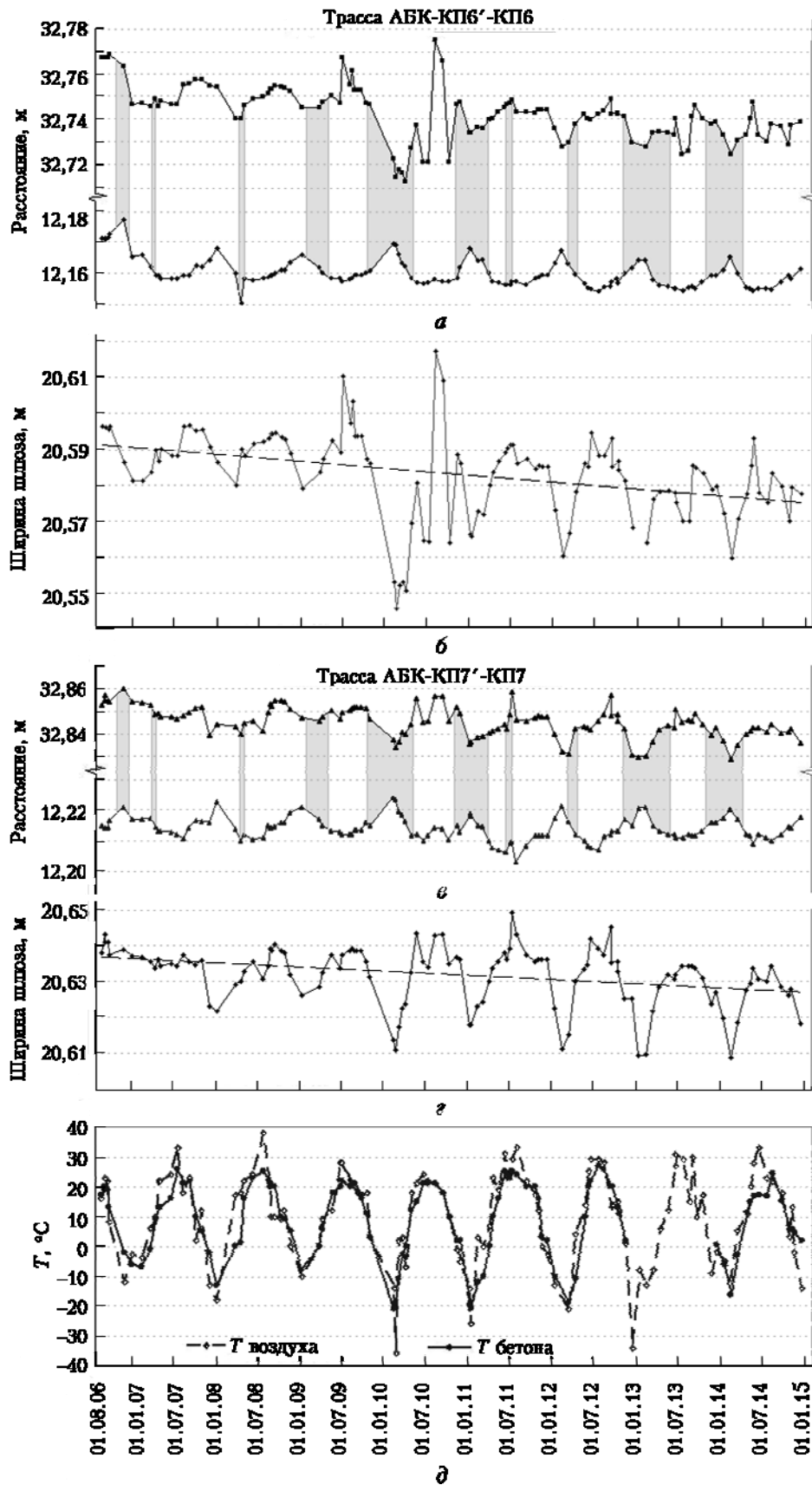


Рис. 2. Сезонные изменения расстояний на измерительных трассах (а, в) и рассчитанные значения ширины камеры УКШ (б, г) на этих трассах. Диаграммы колебания температур воздуха и бетона в стенках камеры (д); точками отмечены результаты измерений

Полученные результаты сезонных колебаний секций в стенках камеры УКШ на измерительных трассах позволили сделать следующие выводы.

Береговая стенка. Общий ход сезонных изменений положения отражателей в парапетах секций береговой стенки камеры шлюза на трассах АБК-КП6' и АБК-КП7' практически совпадал. Изменение положений верхних частей береговой стенки между состояниями «зима–лето» составляло 2–2,5 см относительно здания АБК, причем в более холодные зимы это смещение увеличивалось (особенно при 38-градусном морозе зимой 2009/10 г.). Максимальное «выпираание» береговой стенки в сторону камеры шлюза совпадало с минимумом температуры окружающей среды. Летом береговая стенка смещалась в сторону коренного берега (здания АБК). В общем случае максимум летнего смещения достигался в июне каждого года.

Речная стенка. Сезонные изменения положения отражателей в парапете секций речной стенки на рассматриваемых трассах несколько отличались. Наибольшие смещения наблюдались на трассе АБК-КП6'-КП6, где максимальное смещение между состояниями «зима–лето» ($\Delta L_{\text{КП6}})_{\text{сез}}$ превысило 6 см в 2010 г. Максимум смещения стенки на трассе АБК-КП7'-КП7 составил в том же сезоне ($\Delta L_{\text{КП7}})_{\text{сез}} \cong 3,5$ см (секция, на которой расположен контрольный пункт КП7, была выполнена с предварительно напряженной арматурой). Следует отметить, что максимальные отклонения речной стенки в направлении берега приходились на конец января – февраль каждого зимнего сезона, когда температура окружающего воздуха, а также в бетонных стенках была минимальной. Максимальное отклонение верха речной стенки в сторону реки отмечалось в конце календарного лета – начале осени. В целом в контролируемых секциях имеет место тенденция наклона верхней части речной стенки в сторону берега.

Ширина камеры. Результаты анализа показывают, что минимум ширины камеры УКШ на обеих трассах совпадал со значениями минимально достижимых температур в зимние периоды. В летний период ширина камеры увеличивалась, причем ее максимальное значение достигалось в конце календарного лета, когда максимум температур начинал уменьшаться. В целом ход сезонной зависимости ширины камеры по обеим трассам имеет много общего, но положения максимальных и минимальных значений ширины камеры относительно температурных максимумов и минимумов смещены по-разному. В 2010 г. (с наибольшими различиями сезонных температур) на трассе КП7'-КП7 максимальное изменение ширины камеры шлюза достигло 3,3 см, а на трассе КП6'-КП6 – превысило 7,1 см, что составляет ~0,35% от ширины камеры. Такие различия в сезонных изменениях ширины камеры в разных сечениях могут свидетельствовать о том, что секции в ее стенках имеют различные температурные деформации.

На рис. 2, б и г пунктирными линиями показаны линейные тренды изменения ширины камеры.

Вследствие увеличения значений отклонения речной стенки камеры шлюза в 2010 г. (как в летний, так и в зимний периоды) линейные тренды показывают уменьшение ширины камеры в верхней части срединного поперечного сечения (измерительная трасса АБК-КП6'-КП6), составляющее примерно 2,2 мм/год. На трассе АБК-КП7'-КП7 производная тренда в два раза меньше – 1,1 мм/год. Следует отметить, что на пятилетнем интервале наблюдений производная трендов была в два раза больше.

Таким образом, результаты измерений показывают, что средняя ширина камеры УКШ в сечении КП6'-КП6 по верхнему периметру за 8,5 лет уменьшилась на 17,5 мм, что составляет ~0,1% от общей ширины камеры.

Результаты измерений в процессе наполнения-опорожнения камеры

Весьма привлекательным является использование дальномера для исследования поведения стенок камеры УКШ во время ее перехода из состояния «опорожнена» в состояние «наполнена», а затем опять в «опорожнена». Процесс наполнения камеры занимает примерно 25–30 мин, опорожнения – 30–40 мин. В этих исследованиях наиболее интересные результаты измерений в 2008 г. были получены на трассе АБК-КП6'-КП6 для положения секций в береговой и речной стенках камеры (рис. 3).

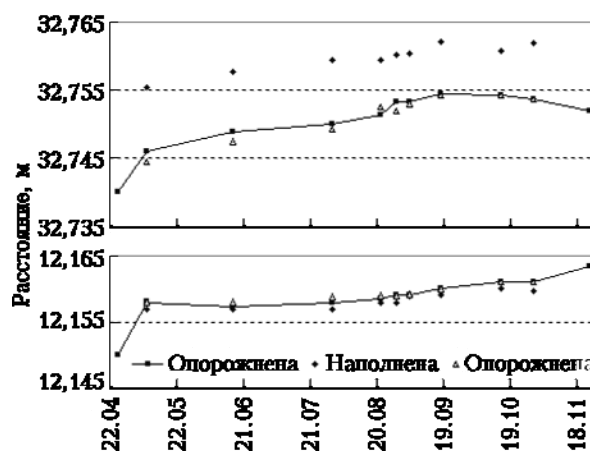


Рис. 3. Изменения положения стенок камеры шлюза в режимах «опорожнена-наполнена-опорожнена» в сезоны 2008 г. на трассе АБК-КП6'-КП6. Вверху – речная стенка, внизу – береговая

Обычно камера шлюза находится в опорожненном состоянии. Измерения расстояний проводились до наполнения камеры, их результаты на рис. 3 отмечены квадратиками, соединенными отрезками линий. Следующие измерения выполнялись спустя 10–15 мин после наполнения камеры. Затем примерно через 1 ч после нахождения камеры в наполненном состоянии, связанном с заходом судна в шлюз и выходом из него, осуществлялось опорожнение камеры до уровня нижнего бьефа и повторное измерение расстояний (в основном через 10–15 мин после окончания процесса опорожнения).

Результаты измерений показали, что расстояние от дальномера до отражателя в секции КП6 речной стенки увеличивалось на (9 ± 2) мм в зависимости от времени года, а в секции КП7 — на (6 ± 2) мм. Береговая стенка при наполнении камеры всегда смещалась в сторону здания АБК примерно на 1–1,5 мм, а затем возвращалась в исходное состояние после опорожнения шлюза. Процесс возвращения секций речной стенки в исходное состояние проходил наподобие колебания затухающего маятника. Если измерения проводились сразу после выпуска воды из камеры, то наблюдалось незначительное смещение речной стенки (около 1–2 мм) в сторону берега (треугольные точки на верхней кривой рис. 3), затем стенка возвращалась в исходное состояние.

Проведенные в 2012–2013 гг. повторные эксперименты с наполнением-опорожением камеры подтвердили характерные особенности изменения положения секций береговой и речной стенок камеры шлюза, которые наблюдались в период с 2008 по 2009 г.

В июле 2014 г. по составленной нами специальной методике операторами УКШ был выполнен дополнительный эксперимент по оценке динамики отклонения верхней части секций речной стенки с одновременной фиксацией уровня воды в камере шлюза. Измерения осуществлялись с интервалом 5 мин, их результаты представлены на рис. 4. Анализ показывает, что отклонение секций речной стенки начинается, когда уровень воды в камере

достигает отметки 311 м, соответствующей основанию трапецеидально-консольной части конструкции секции (см. рис. 1, а). Первой максимальной величины отклонения достигает секция с КП6, секция с КП7 достигает максимального отклонения с задержкой до 5 мин. Процесс возврата секций в прежнее положение начинается сразу после начала опорожнения камеры и практически прекращается при достижении уровня 311 м. После этого наблюдается некоторый колебательный процесс секций, но амплитуда колебаний находится в пределах основной погрешности измерения расстояния дальномером ($\pm 1,5$ мм).

Заключение

Лазерный дальномерный мониторинг является достаточно эффективным средством для наблюдений за положением объектов гидротехнических сооружений, поскольку позволяет определять их сезонные смещения, а также оценивать результаты воздействия переменных гидравлических нагрузок с погрешностями, составляющими $\pm 1,5$ мм.

Наиболее репрезентативны результаты сезонных изменений ширины камеры шлюза, поскольку на них не влияют сезонные смещения мест установки дальномеров. Отмечена тенденция уменьшения ширины камеры шлюза в двух наблюдаемых поперечных сечениях. В сечении, включающем секцию с предварительно напряженной арматурой, скорость уменьшения ширины камеры равна $\sim 1,1$ мм/год,

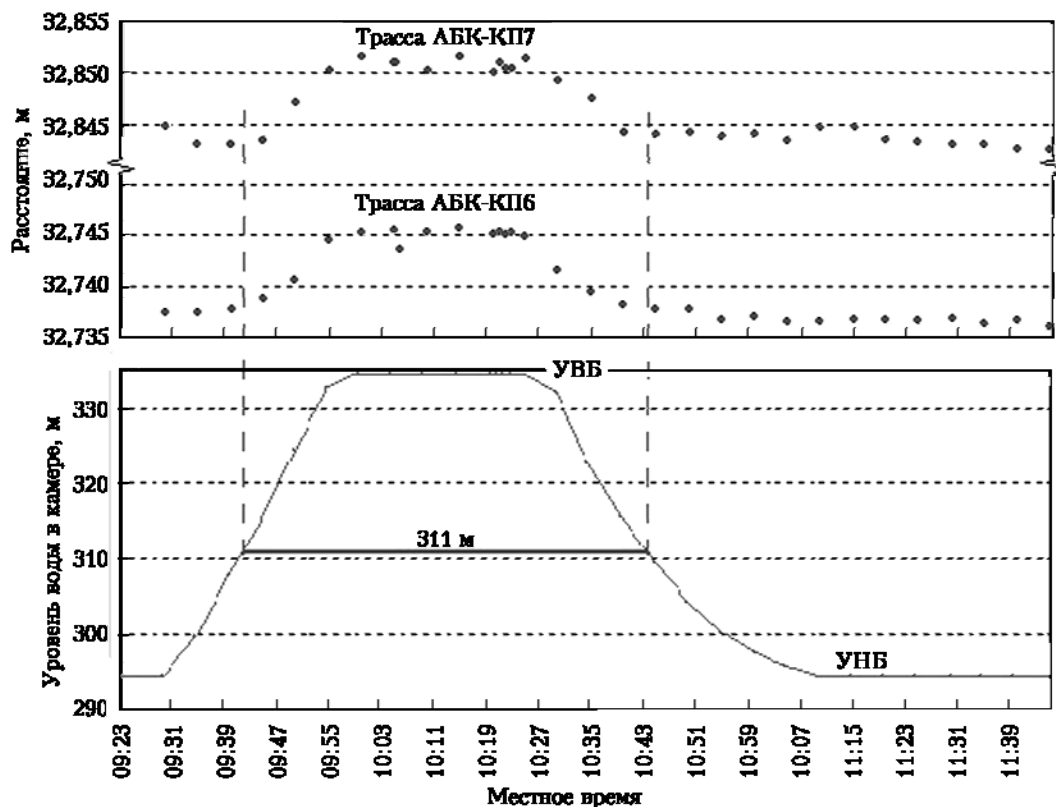


Рис. 4. Динамика отклонения секций речной стенки в процессе наполнения-опорожнения камеры шлюза 22 июля 2014 г.

в сечении с секцией, имеющей обычную арматуру, — ~2,2 мм/год. В целом за 8,5 лет наблюдений ширина камеры в этом сечении уменьшилась на 17,6 мм, что составляет ~0,1% от общей ширины камеры.

Созданная ЛСДМ позволила также наблюдать динамику отклонения секций стенок камеры УКШ в процессе наполнения-опорожнения. Отмечено, что отклонение речной стенки начинает происходить тогда, когда уровень воды в камере достигает основания трапецидально-консольной части конструкции секций стенки, стоящей на коренном грунте.

Лазерная система дальномерного мониторинга, реализованная на УКШ, подтвердила свою долговременную работоспособность. Опыт ее эксплуатации может послужить основой для создания подобных систем, позволяющих персоналу гидротехнических сооружений и других техногенных объектов определять опасные тенденции в направлении смещения объектов наблюдений и своевременно реагировать на возможные внештатные ситуации.

В последнее время появилось сообщение об установке на УКШ системы геодезического мониторинга положения стенок камеры [7]. Сравнение полученных предварительных результатов геодези-

ческого мониторинга с нашими данными сезонных отклонений показывают их совпадение в пределах 15%-й погрешности.

1. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D3%F1%F2%FC-%CA%E0%EC%E5%ED%EE%E3%EE%F0%F1%EA%E0%FF_%C3%DD%D1 (дата обращения: 10.01.2015).
2. URL: <http://rgkvkvpv.ucoz.ru/index/0-2> (дата обращения: 10.01.2015).
3. URL: <http://www.kazakh.ru/news/id/519> (дата обращения: 08.01.2011).
4. Тихомиров А.А., Татур В.В., Ляпунов В.М., Омариолинова О.Н. Лазерная система контроля за отклонением стен камеры Усть-Каменогорского шлюза // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 432–436.
5. Татур В.В., Тихомиров А.А., Ляпунов В.М., Омариолинова О.Н. Исследование отклонений стенок камеры высоконапорного Усть-Каменогорского шлюза методом лазерного дальнометрирования // Безопасность в техносфере. 2012. № 3. С. 9–14.
6. URL: <http://www.nwbuildnet.com/stores/bm/tools/disto/pdf/Brochure...> (дата обращения: 15.12.2010).
7. Середович В.А., Ткачева Г.Н., Середович А.В. Геодезический мониторинг деформаций Усть-Каменогорского судоходного шлюза // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 3. С. 127–129.

A.A. Tikhomirov, V.V. Tatur, V.M. Lyapunov. Laser rangefinder monitoring of hydro-technical utilities position (the case of Ust-Kamenogorsk shipping lock).

The description of the laser rangefinder monitoring system for Ust-Kamenogorsk shipping lock's wall deflections and the results of 8.5-years observations are presented. Ust-Kamenogorsk shipping lock has high-head single-lift chamber with 47 m depth. The wall deflections are caused by seasonal thermal deformations and dynamic loads related to the lock filling-emptying. The trend is found of the chamber width decrease with the rate of ~2.2 mm/year in the upper part of the lock. The effect of the lock filling-emptying process on the wall deflection dynamics was studied.