

## Лазерная система контроля за отклонением стен камеры Усть-Каменогорского шлюза

А.А. Тихомиров<sup>1</sup>, В.В. Татур<sup>1</sup>, В.М. Ляпунов<sup>2</sup>, О.Н. Омаролинова<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Республиканское государственное казенное Восточно-Казахстанское предприятие водных путей  
Комитета транспорта и путей сообщения  
Министерства транспорта и коммуникаций Республики Казахстан  
070001, г. Усть-Каменогорск, ул. Шлюзная, 14, Республика Казахстан

Поступила в редакцию 27.12.2010 г.

Приведены описание и технические характеристики лазерной системы контроля, созданной на основе дальномеров Leica DISTO™ plus, которая обеспечивает всепогодный мониторинг за положением береговой и речной стенок глубоководного однокамерного Усть-Каменогорского шлюза. Представлены данные долгосрочных результатов измерения отклонений стенок камеры как за счет сезонных изменений температур (зима–лето), так и за счет наполнения-опорожнения камеры шлюза.

*Ключевые слова:* лазерная система контроля, дальномер, стенки камеры шлюза, отклонения, деформации; laser monitoring system, rangefinder, walls of lock, deflection, deformation.

### Введение

Лазерные дальномерные системы находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в строительстве и в военной технике [1–4]. Они позволяют определять расстояния между объектами, а также измерять их геометрические размеры. С помощью таких систем осуществляют мониторинг состояния зданий и сооружений, находящихся под воздействием различных внешних сил, а также контролируют изменение их размеров за счет возникающих деформаций. В статье приводится описание созданной в ИМКЭС СО РАН лазерной системы контроля (ЛСК) за отклонением стен камеры Усть-Каменогорского шлюза под воздействием напора воды и сезонных температурных деформаций, а также некоторые результаты измерений, полученные при эксплуатации ЛСК в течение 5 лет.

### Усть-Каменогорский гидроузел

На реке Иртыш в Республике Казахстан построено несколько гидроузлов. Наиболее старый из них – Усть-Каменогорский гидроузел в составе ГЭС и однокамерного шлюза, введенных в эксплуатацию в 1952 г. (рис. 1, а).

Одной из особенностей шлюза является полная глубина его камеры – более 44 м, при этом высота шлюзования судна составляет более 40 м. Эта особенность делает шлюз уникальным среди шлюзов всех гидроузлов не только в бывшем СССР, но и во всем мире.

Внешний вид камеры шлюза показан на рис. 1, б. Шлюз спроектирован и построен с учетом рельефа местности таким образом, что одна его стена («береговая») всей своей боковой поверхностью опирается через гравийно-песчанную засыпку в коренную скальную породу правого берега Иртыша (слева на рис. 1, а и б). Вторая стена («речная») не имеет такой естественной подпорки и представляет собой вертикальную железобетонную стену трапециевидального сечения высотой более 45 м (правая стенка на рис. 1, б). Объем воды при заполнении камеры шлюза составляет более 80 000 м<sup>3</sup>. Вся эта масса воды (~80 000 т) при каждом пропуске через шлюз очередного судна давит на стенки и приводит к их периодическим деформациям, которые фиксируются как отклонения поверхности стенок шлюзовой камеры. С учетом этих нагрузок и срока эксплуатации гидротехническое сооружение требует уточнения своих геометрических размеров. Деформации речной и береговой стенок в явном виде наблюдаются в виде периодического изменения расстояния между стенками камеры шлюза в его верхней части в процессе наполнения-опорожнения, а также при смене сезонов года (лето–зима).

Обслуживающим персоналом шлюза ведется постоянный контроль за состоянием стенок шлюзовой камеры. Измерение отклонений первоначально

\* Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru); Валерий Владимирович Татур (tatur@imces.ru); Виктор Михайлович Ляпунов (lvm51@rambler.ru); Ольга Николаевна Омаролинова (gr-nabl@mail.ru).



*a*

*б*

Рис. 1. Усть-Каменогорский гидроузел: *a* – общий вид (уровень воды в шлюзовой камере соответствует уровню нижнего бьефа); *б* – осушенная камера шлюза в апреле 2006 г. (вид с нижней головы шлюза)

осуществлялось мерной лентой, с помощью которой определялось расстояние между опорными точками на ограждающих парапетах в верхней части стенок камеры шлюза в нескольких поперечных сечениях. Это являлось мало оперативной и недостаточно точной измерительной процедурой. Тем не менее было установлено, что при наполнении камеры шлюза расстояние между опорными точками в центральной части увеличивается примерно на 20 мм при общей ширине камеры в верхнем сечении 20 м.

### Лазерная система контроля

В 2006 г. в ИМКЭС СО РАН по заказу Республиканского государственного казенного Восточно-Казахстанского предприятия водных путей (РГК ВК ПВП) для мониторинга положения стенок камеры Усть-Каменогорского шлюза была создана и установлена система контроля на основе лазерных дальномеров. Основными требованиями заказчика к ЛСК были: 1) выполнение измерений в сечениях камеры шлюза, более близких к сечениям, в которых проводились предыдущие измерения с помощью мерной ленты (с целью сохранения рядов измерений); 2) возможность проведения измерений во все сезоны года (с учетом резко континентального климата региона); 3) автоматизация регистрации результатов измерений.

Для обеспечения двух последних требований было принято решение установить лазерные дальномеры в административно-бытовом корпусе (АБК) шлюза в специальных нишах, сделанных в стенках здания, которое построено на коренном скальном грунте. Схема размещения дальномеров и отражателей показана на рис. 2 (проставленные размеры соответствуют данным строительных чертежей).

При таком размещении дальномеров и отражателей обеспечивалась возможность контролировать

смещения относительно здания АБК (стен корпуса) верхней части береговой и речной стенок шлюзовой камеры.

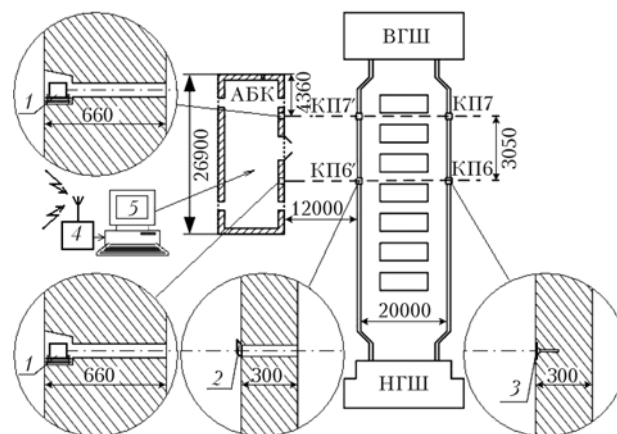


Рис. 2. Схема размещения лазерной системы контроля в Усть-Каменогорском шлюзе: АБК – административно-бытовой корпус; ВГШ – верхняя голова шлюза; НГШ – нижняя голова шлюза; КП6, КП7, КП6', КП7' – места установки отражателей; 1 – лазерный дальномер; 2 – первый отражатель на шарнире; 3 – второй отражатель; 4 – Bluetooth-адаптер; 5 – компьютер

Два лазерных дальномера 1 типа Leica DISTO™ plus установлены стационарно на юстировочных столиках, которые необходимы для первоначальной настройки системы. В дальномере применен импульсный полупроводниковый лазер (длительность импульса 15 нс), работающий в диапазоне длин волн 620–690 нм с максимальной выходной мощностью 0,95 мВт и расходимостью излучения на выходе дальномера 0,16×0,6 мрад [5]. Дальномер Leica DISTO™ plus предназначен для измерения расстояний от 0,2 до 200 м при отражении излучения

от диффузно рассеивающей поверхности. Паспортная погрешность измерения расстояний в указанном диапазоне составляет  $\Delta L = \pm 1,5$  мм. Принцип действия основан на измерении временного интервала между отправленным лазерным импульсом и принятым отраженным сигналом.

Отражатели 2, размещенные в парапете береговой стенки шлюза (в КП6' и КП7'), установлены на шарнирах, которые обеспечивают два стабильных положения: 1) вертикальное – перпендикулярно оси лазерного луча; 2) горизонтальное – позволяющее лазерному лучу проходить через отверстие в парапете до конечных стационарных отражателей 3, которые забетонированы в парапет речной стенки шлюза. Поскольку измерения проводятся операторами шлюза эпизодически, для упрощения конструкции ЛСК и повышения ее надежности было принято решение отказаться от электромеханического привода и менять положения отражателей 2 вручную.

Качество поверхности отражателя и угол установки этой поверхности относительно оси лазерного дальномера также имеют значение при проектировании ЛСК с минимальными погрешностями измерений. Это связано с конструктивными особенностями лазерного дальномера и объясняется явлением параллакса, который возникает при разнесении оптических осей передающего и приемного каналов.

Наименьшее влияние на погрешность измерений отмечается в том случае, когда отражающая поверхность расположена перпендикулярно оси лазерного дальномера. Производители аналогичных дальномеров рекомендуют не проводить измерения при угле между оптической осью дальномера и нормалью к отражающей поверхности более 60 угл. град [2]. При небольших значениях этого угла в измерения будет вноситься систематическая погрешность, которая может быть учтена при первоначальной юстировке системы. На погрешность измерений влияют также качество поверхности отражателя и стабильность ее отражательных свойств [2, 3].

В реальных условиях длительной эксплуатации в камере шлюза (при наличии запыления, запотевания, возможных механических повреждений) отражатели, сделанные из нержавеющей стали, имеют предпочтение перед другими материалами. Такой отражатель, имеющий матовую поверхность, обеспечивает рассеяние отраженного луча в пределах  $\pm 10^\circ$  с достаточно равномерной диаграммой направленности. Поэтому неточность в установке нормали отражателя к направлению лазерного луча в пределах  $\pm 5^\circ$  на расстояниях до 40 м дает погрешность, не превышающую вышеуказанную паспортную погрешность  $\Delta L$ , связанную с измерителем временных интервалов дальномера. При этом погрешность измерения расстояния до речной стенки шлюза, связанная с неточной первоначальной установкой отражателя 3, является постоянной систематической ошибкой, которая легко учитывается. Погрешность измерения расстояния до береговой стенки при неточности установки вращающегося на шарнире отражателя в пределах  $\pm 5^\circ$  дает случайную ошибку в измерении расстояния, не превышающую 0,7 мм, которая составляет  $0,5\Delta L$ . Реально фиксаторы положения вращаемого отражателя 2 (рис. 2) обеспечивали погрешность его вертикальной установки в пределах менее  $\pm 2,5^\circ$  во всем интервале температур окружающего воздуха во все сезоны года (от  $-40$  до  $+40$  °С).

Примененные в ЛСК дальномеры Leica DISTO™ plus позволяют выдавать полученную информацию в радиоканал (опция – Bluetooth), что позволяет регистрировать измеренные расстояния в компьютере с использованием дополнительного Bluetooth-адаптера, подключаемого к компьютеру (см. рис. 2). Таким образом, созданная ЛСК обеспечивает автоматическое занесение результатов измерений в базу данных компьютера, который расположен в операторской комнате здания АБК.

Пример заполнения окна базы данных представлен на рис. 3.

		КП6 Ш.Шл	20,595	КП6				Ширина шлюза в КП6	КП7				Ширина шлюза в КП7
		КП7 Ш.Шл	20,638	КП6бер	$\Delta$ мм	КП6реч	$\Delta$ мм		КП7бер	$\Delta$ мм	КП7реч	$\Delta$ мм	
КП6	КП7	Дата											
12,157	12,211	16.06.2008											
12,157	12,211	УВБ	УНБ										
12,157	12,211	334,64	294,29										
12,157	12,211	Темпер. воздуха	Темпер. бетона										
12,157	12,211	24	23	12,157	-14	32,7578	-9,2	20,6008	12,211	-4	32,8514	-1,6	20,6404
32,757	32,853	Заполнение камеры											
32,760	32,852	Наполнена											
32,754	32,850												
32,761	32,851												
32,757	32,851												
12,158	12,212	16.06.2008											
12,158	12,212	УВБ	УНБ										
12,158	12,212	334,64	294,29										
12,158	12,212	Темпер. воздуха	Темпер. бетона										
12,158	12,212	30	22	12,158	-13	32,7474	-19,6	20,5894	12,212	-3	32,8434	-9,6	20,6314
32,748	32,847	Заполнение камеры											
32,748	32,843	Опорожнена											
32,746	32,841												
32,748	32,844												
32,747	32,842												

Рис. 3. Компьютерное окно базы данных ЛСК: УВБ – уровень верхнего бьефа (водохранилище); УНБ – уровень нижнего бьефа (р. Иртыш)

Оператор заносит дату измерений, показатели уровней воды в водохранилище (УВВ) и в реке (УНБ), температуру окружающего воздуха и температуру бетона (показания соответствующих датчиков). Данные измерений ЛСК заносятся автоматически, сначала от береговых отражателей (КП6', КП7'), затем (после поворота отражателей 2 в горизонтальное положение) – от речных (КП6, КП7). Указываются данные о состоянии камеры шлюза: «наполнена», «опорожнена» или «осушена». Для повышения точности каждый раз производится 5 замеров для каждого положения отражателя и в правой части таблицы выводится усредненный результат. Программа обеспечивает определение размеров камеры шлюза в соответствующих сечениях, а также величины отклонения  $\Delta$  (мм) от контрольных положений, привязанных к прежним рядам измерений. Анализ долговременных результатов наблюдений показывает, что в одной серии измерений максимальное значение СКО определения расстояний до береговой стенки не превышало  $\pm 1$  мм, а до речной  $\pm 3$  мм на обеих трассах измерений (средние значения СКО были соответственно  $\pm 0,5$  и  $\pm 1$  мм).

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что при опорожнении шлюза ширина камеры в верхней части сечения КП6'–КП6 уменьшилась на  $(11,4 \pm 1,5)$  мм, а в сечении КП7'–КП7 – на  $(9,0 \pm 1,5)$  мм, т.е. стрелка дуги прогиба стенок камеры шлюза под напором воды в центральной части больше, чем в краевой, на 2,4 мм. Результаты измерений также показывают, что при наполнении камеры шлюза происходит незначительное смещение верхней части береговой стенки к зданию АБК (на 1 мм).

### Результаты долговременных измерений

Долговременный лазерный мониторинг измерения расстояний на трассах АБК–КП6'–КП6 и АБК–КП7'–КП7 показывает, что в зависимости от сезона года имеются смещения относительно АБК не только речной, но и береговой стенок. На рис. 4 представлены накопленные результаты измерений на трассе АБК–КП6'–КП6, которая наиболее характерна для определения величины отклонений. По оси ординат отложена временная шкала с ценой деления 1 мес (измерения начали проводиться с августа 2006 г.), по оси абсцисс – усредненные (по пяти измерениям) значения расстояний от дальнотера до соответствующих отражателей. Левая кривая показывает сезонные перемещения отражателя, установленного на береговой стенке камеры шлюза, правая – отражателя, установленного на речной стенке. Серые полосы соответствуют временным периодам, в течение которых камера шлюза была осушенной, как показано на рис. 1, б. Поставленные для примера «пички» на правой кривой в летние месяцы 2008 и 2009 гг. отображают величину отклонения речной стенки при наполнении камеры шлюза до уровня верхнего бьефа и последующего опорожнения. При этом береговая стенка, как отмечалось при анализе результатов,

приведенных на рис. 3, всегда при наполнении камеры смещалась в сторону здания АБК на 1 мм.

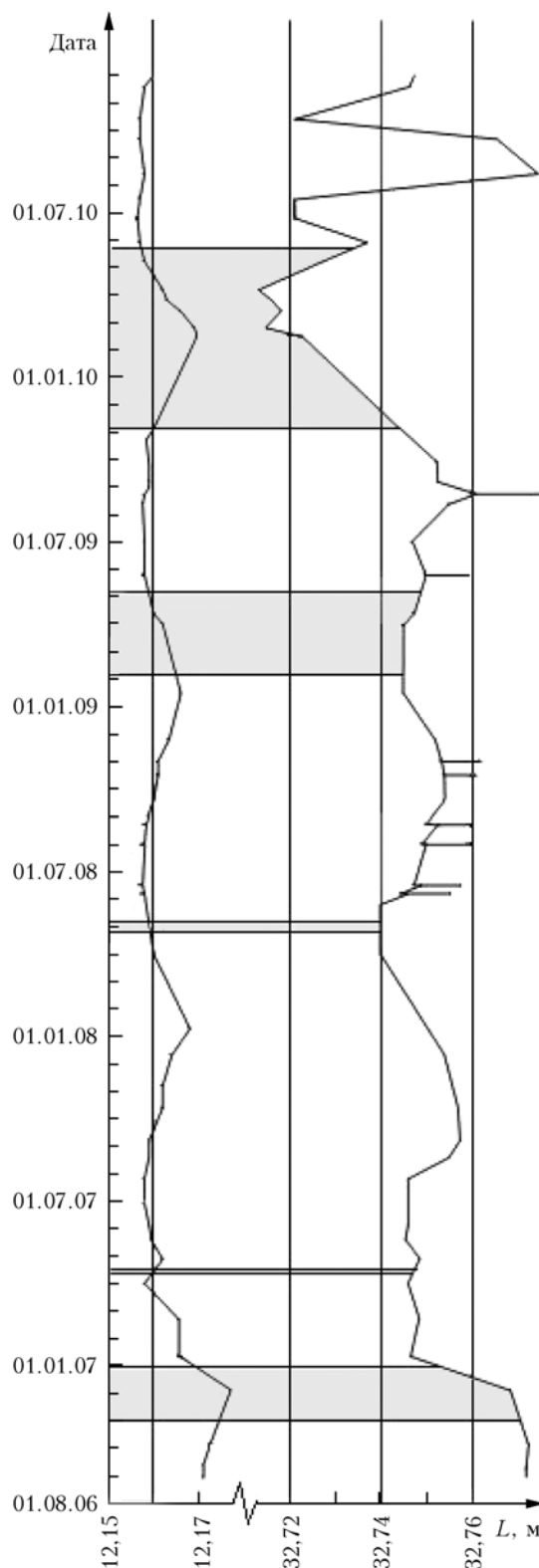


Рис. 4. Результаты долговременного мониторинга положения стенок камеры шлюза на трассе АБК–КП6'–КП6

Анализ полученных результатов измерений отклонений речной стенки на трассе АБК–КП7'–КП7

показывает меньшую величину перемещений отражателей по сравнению с трассой АБК—КП6'—КП6, но характер сезонных изменений положения отражателей совпадает.

Из предварительного анализа результатов мониторинга следует, что сезонные перемещения стенок шлюза, связанные, очевидно, в большей степени с температурными деформациями, превышают деформации, обусловленные наполнением и опорожнением камеры шлюза водой. При этом максимумы сезонных перемещений береговой и речной стенок несколько смещены по временному лагу.

### Заключение

Созданная система лазерного контроля позволила в значительной степени автоматизировать процесс мониторинга положения стенок камеры Усть-Каменогорского шлюза в течение многолетнего периода во все сезоны года. Выявлены определенные закономерности в сезонных колебаниях

стенок камеры шлюза в наполненном, опорожненном и осушенном состояниях.

Авторы выражают свою признательность директору РГК ВК ПВП г-же Г.П. Петренко и начальнику Усть-Каменогорского шлюза г-ну О.В. Живикину за поддержку и обеспечение внедрения данной работы, а предпринимателю А.А. Драпико за содействие созданию ЛСК.

1. *Лазерная локация* / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов / Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
2. *Карсунская М.М.* Геодезические приборы. М.: Институт оценки природных ресурсов, 2002. 186 с.
3. *Федотов Г.А.* Инженерная геодезия. М.: Высшая школа, 2004. 463 с.
4. *Энциклопедия. Оружие и технологии России. XXI век. Т. 11. Опτικο-электронные системы и лазерная техника* / Под общ. ред. С. Иванова. М.: ИД «Оружие и технологии», 2005. 720 с.
5. *URL:* <http://www.nwbuildnet.com/stores/bm/tools/disto/pdf/Brochure...> (дата обращения 15.12.2010).

*A.A. Tikhomirov, V.V. Tatur, V.M. Lyapunov, O.N. Omarolinova. Laser rangefinder system to monitor deflections of Ust-Kamenogorsk's lock walls.*

Description and specifications are presented for the laser monitoring system, designed using Leica DISTO™ plus rangefinders. This system provides all-season monitoring of positions of both shore and river walls of the deep-water single-lift of the Ust'-Kamenogorsk lock. Results are presented of long-term measurements of the lock walls deflections due to both seasonal (winter–summer) temperature changes and filling-emptying the lock.