

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

А.И. Шакирова, И.И. Ганибаев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева –КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В работе рассматривается один из способов измерения уровня воды на гидротехнических сооружениях. Актуальность данной работы обусловлена увеличением количества чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях, возникающих из-за чрезмерного переполнения водохранилища во время весеннего половодья и выпадения обильных осадков, тогда гидротехнические затворы не справляются с сверхнормативными объемами воды. Аварии на таких объектах могут возникать внезапно и представлять огромную опасность как для самих объектов, так и для близлежащих населенных пунктов, объектов экономики и сельскохозяйственных угодий. Поэтому требуется тщательное наблюдение за уровнем воды на гидротехнических сооружениях с целью выявления любых возможных чрезвычайных ситуаций. Повышение уровня воды в гидротехнических сооружениях можно измерить, внедрив систему из волоконно-оптических датчиков в гидротехнические затворы и таким образом считывать уровень воды в режиме реального времени.

Ключевые слова: волоконно-оптические сенсорные системы, гидротехнические сооружения, затворы, уровень воды, чрезвычайные ситуации, аварии.

Введение

В мире практически ежемесячно происходят чрезвычайные ситуации, вызванные стихийными бедствиями. Если посмотреть на статистику девять из десяти стихийных бедствий связаны с опасными природными явлениями [1] и это во многом связано с изменением климата. Все чаще можно услышать из новостей об экстремальных погодных явлениях, таких как засуха, лесные пожары, оползни, выпадение длительных и обильных осадков. Последствия изменения климата видны уже сейчас и эти последствия с годами станут еще более существенными. В данной работе рассматривается способ уменьшения риска аварий при переполнении гидротехнических сооружений (ГТС) с переливом содержимого. Как правило, в основном все гидротехнические сооружения находятся в черте или выше населенных пунктов и являются объектами повышенного риска, так как разрушение плотин может привести к катастрофическому наводнению, в зоне затоплений могут оказаться обширные территории сельскохозяйственных угодий, близлежащие населенные пункты, сотни километров автомобильных и железнодорожных дорог, мостов, линий электропередач и связи, объекты промышленности и другие объекты экономики [2]. Последствия катастрофического наводнения могут быть усугублены авариями на потенциально опасных объектах, попадающих в его зону. Также неполное разрушение плотины, когда безопасная эксплуатация сооружения уже невозможна, может привести к серьезным экономическим потерям в результате прекращения производства энергии, гидравлического регулирования и сбора воды в водохранилище. Наиболее верным и эффективным способом для смягчения последствий и уменьшения опасности от данных природных явлений видится разработка и реализация превентивных мероприятий. Например, внедрение волоконно-оптической сенсорной системы, которая сможет в режиме реального времени мониторить уровень воды в гидроузлах и предостеречь от возможных негативных последствий в будущем.

На гидротехнических сооружениях уровень воды регулируется с помощью гидротехнических затворов, когда уровень повышается до определенного уровня, затворы поднимаются и происходит опорожнение водохранилища. Затворы бывают разных видов: закрытые с ручным управлением, стационарные и автоматические/полуавтоматические. Более надежным методом управления затворами является автоматический [3, 4]. С помощью комплексной работы автоматизированной системы управления затворами и контроля уровня воды возможно добиться своевременного поднятия затворов. В данной работе предлагается внедрить систему из волоконно-оптических датчиков в гидротехнические затворы и таким образом считывать уровень воды водохранилищах. Преимуществом волоконно-оптических датчиков является очень малый размер, устойчивость к суровым условиям окружающей среды [3, 5] и возможность установки в разных местах, недоступных для традиционных датчиков, без вмешательства в физические свойства системы мониторинга [6]. По своей природе волоконно-оптические датчики нечувствительны как к внешним электромагнитным полям, так и к механическим колебаниям. Их небольшая теплоемкость также гарантирует быстрый тепловой отклик, составляющий менее секунды.

Структурная схема работы автоматизированных гидротехнических затворов

Установка представляет из себя конструктивную систему автоматического управления гидротехническими затворами для предупреждения аварийной ситуации, при этом осуществляется мониторинг уровня воды. Система основана на недорогом микроконтроллере и волоконно-оптическом термометре для определения уровня воды в плотине. В случае повышения уровня воды и возникновения аварийной ситуации на плотине, передается сообщение по беспроводным линиям связи.

Предлагаемая установка автоматического управления затворами плотины состоит из системы питания, микроконтроллера, волоконно-оптического датчика, двигателей, GSM-модуля, жидкокристаллического экрана и светодиодов. Микроконтроллер является центральным компонентом системы. Вся функция системы запрограммирована на него. Он обрабатывает все данные, полученные от периферийных устройств для принятия решений.

Двигатель управляет движением затвора плотины. GSM-модуль обеспечивает связь. На жидкокристаллическом экране постоянно отображаются данные о состоянии узлов плотины. Светодиоды служат визуальным сигналом об обстановке на объекте. Существует также хранилище данных на компьютере для записи деятельности системы. Сведения, находящиеся в хранилище данных, включают в себя: уровень воды; время открытия или закрытия затвора плотины, в случае их открытия, и время отправки предупреждающих SMS-сообщений. Эти сохраненные данные помогают записывать различные основные операции системы для ведения учета, а также для дальнейшего анализа, если это необходимо. На рисунке 1 показана структурная схема системы с взаимосвязанными компонентами.

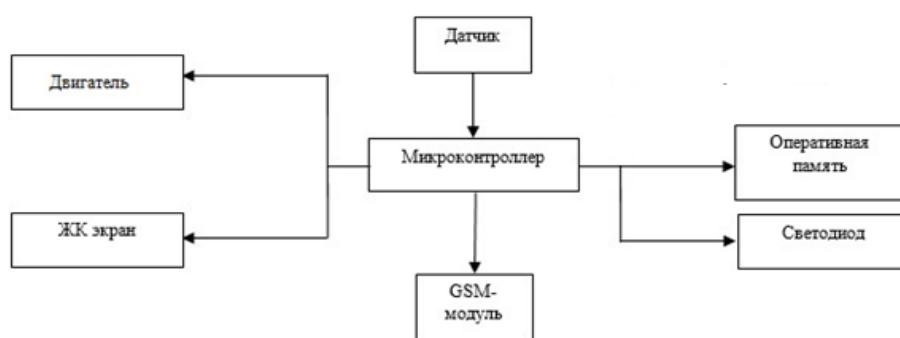


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы гидротехнического затвора

Уровень воды определяется распределенными волоконно-оптическими датчиками. При использовании технологии волоконной брэгговской решетки (ВБР) количество точек измерения определяется количеством оптоволоконных датчиков, встроенных в гидротехнический затвор, и количеством точек измерения в каждом датчике [7-9].

На рисунке 2 изображено расположение гидротехнического затвора с экспериментальной установкой.

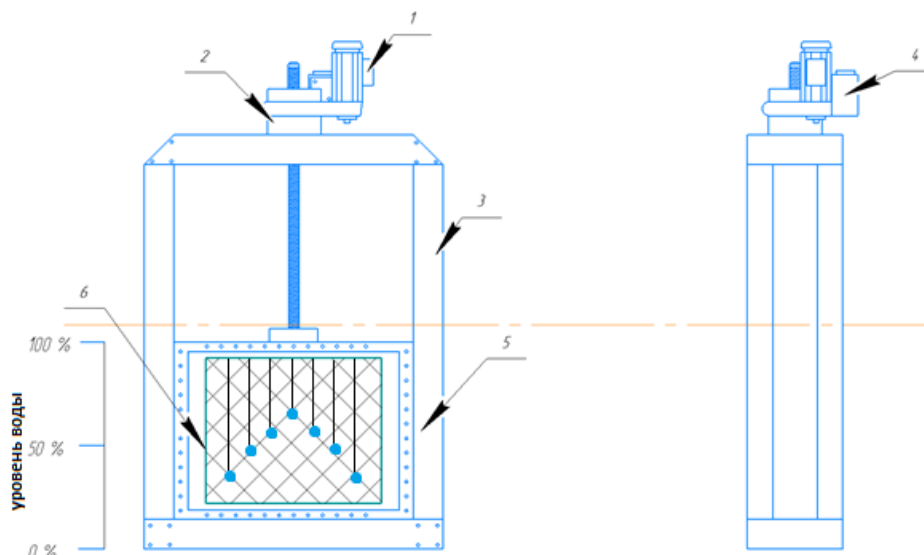


Рис. 2. Гидротехническая волоконно-оптическая система контроля на щитовом затворе гидротехнического сооружения 1) двигатель; 2) редуктор; 3) корпус затвора; 4) соединительная коробка с датчиком измерения; 5) затвор; 6) волоконно-оптическая система [3]

Также можно использовать метод измерения температуры с топологией «шина». При этом датчики будут последовательно расположены на одном световоде, как показано на рисунке 3.

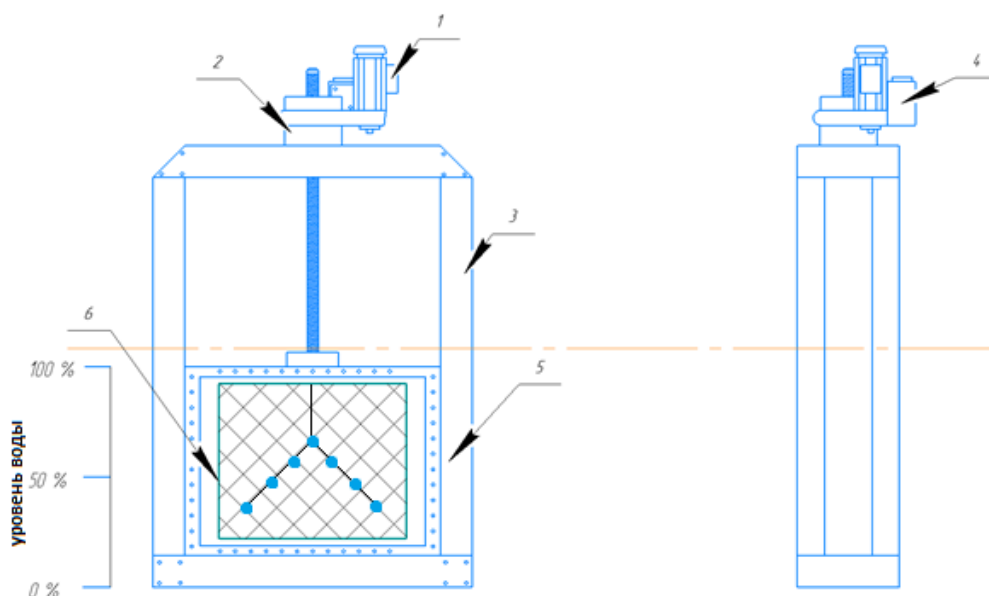


Рис. 3. Гидротехническая волоконно-оптическая система контроля на щитовом затворе гидротехнического сооружения 1) двигатель; 2) редуктор; 3) корпус затвора; 4) соединительная коробка с датчиком измерения; 5) затвор; 6) волоконно-оптическая система [3]

Недостатком данного метода является возможная деформация одного крыла волоконного световода, при которой часть, либо вся система перестанет работать.

В общей сложности 7 волоконных датчиков вставляются в вертикальные отверстия установки и зафиксированные в нужном положении. Волокна от датчиков проложены к соединительной коробке верхней части затвора. Волоконно-оптические чувствительные системы не зависят от расстояния между чувствительным элементом и считывающим устройством, что позволяет дистанционно устанавливать чувствительные части системы в контролируемом месте окружающей среды.

Во время работы системы датчик считывает уровень воды в плотине с определенной периодичностью в зависимости от уровня воды. Если уровень воды ниже 1 и 7 (боковых) датчиков, то система не выполняет никаких действий. Если вода достигает уровней расположения 2 и 6 датчиков, загорается зеленый светодиод, указывающий, что вода находится на первом уровне. Если на этом уровне затворы закрыты, никаких дальнейших действий не предпринимается, если затворы открыты, микроконтроллер посылает команду закрыть их. Когда вода достигает уровня датчиков 3 и 5, то загорается желтый светодиод, и GSM-модуль активируется для отправки предупреждающих сообщений. Когда вода достигает уровня 4 датчика (средний), загорается красный светодиод, и сирена подает сигнал тревоги, предупреждая о предстоящей катастрофе. Через заданное время двигатель активируется, и затворы открываются. На каждом из уровней ведется учет времени, в течение которого вода достигла данного значения. Кроме того, фиксируется время открытия или закрытия затворов плотины. На рисунке 4 показана технологическая схема работы системы.

Оператор плотины может видеть уровень воды в плотине в режиме реального времени. Перед тем как затворы открываются, оператор получает предупреждающее сообщение.

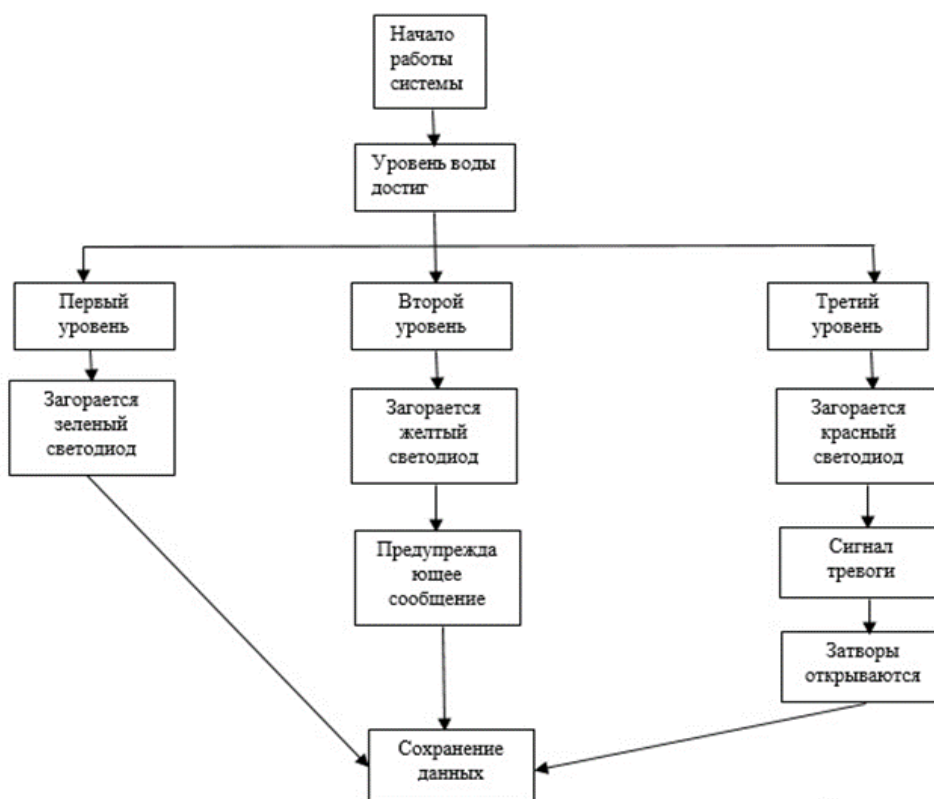


Рис. 4. Структурная схема работы гидротехнического затвора

Экспериментальная установка для мониторинга уровня воды

Экспериментальная установка изготовлена из акрилового пластика с двумя отверстиями под затворы спереди. Установка имеет размеры размером 550x250x300 мм. Размер отверстий под затворы 80x30 мм. Затвор изготовлен также из акрилового материала размером 200x105 мм. На рисунке 5 представлено изображение экспериментальной установки.

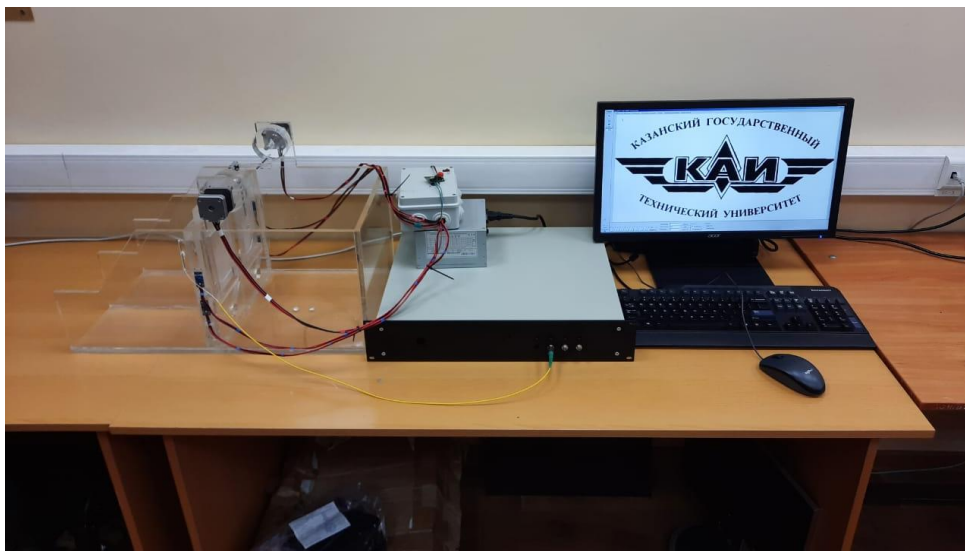


Рис. 5. Экспериментальная установка

На установке разведена контрольно-измерительная система в виде волоконно-оптической многосенсорной системы на основе волоконной Брэгговской решетки (ВБР) (рис. 6).



Рис. 6. Разводка волоконно-оптических датчиков на экспериментальной установке

Во время запуска экспериментальной установки программа с помощью герконов закрывает затворы и мониторит состояние датчиков. Если поступает сигнал с датчиков

о превышении допустимого уровня воды в системе, программа через драйвер шагового двигателя открывает затворы для сброса воды. После достижения приемлемого уровня воды в системе затворы закрываются, и система переходит в режим ожидания.

Волоконно-оптическая система состоит из пяти волоконных световодов, на концах которых расположены волоконно-оптические датчики на основе ВБР, встроенные в гидротехнический затвор. Каждая ВБР представляет собой отдельную точку датчика, отличающуюся своим положением x_i и своей брэгговской длиной волны λ_i . Все датчики расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, 1-ый датчик расположен ниже остальных, потом идет 2-ой датчик, 3-ий расположен посередине, далее 4-ый и выше всех расположен 5-ый датчик. При повышении уровня воды часть или все датчики ВБР подвергаются воздействию давления и температуры воды. Датчики, погруженные в воду, испытывают большее давление, чем датчики, расположенные над водой, температура повышается по мере приближения к поверхности. Температуры и/или давление рассчитываются по измеренному спектральному сдвигу для каждого ВБР.

Опрос уровня жидкости происходит путем определения сдвига длины волны Брэгга в датчиках, находящихся под водой и над поверхностью воды. Датчики, в свою очередь, встроены в затвор, и расширяются или сужаются из-за колебаний температуры. Для определения сдвига длины волны Брэгга на каждом датчике будут заданы начальные условия, подобранные для каждого времени года в наиболее опасные периоды паводков и половодий. Измеряя спектр длин волн и сравнивая его со спектром, полученным при эталонной температуре и/или давлении, можно рассчитать температуру и/или давление в каждой точке датчика.

Наиболее полноводный месяц года, когда уровень воды в гидроузлах достигает своего максимума, приходится на третью декаду апреля. Весеннее половодье усиливается при температурах 10,2-14,5°C. Средняя температура воздуха в период половодья составляет 11,8°C. При этом вода на водохранилищах прогревается до 5,2-10,8°C. Средняя температура воды в пик половодья составляет 7,2°C [4]. Температура на поверхности и на дне ГТС отличается примерно на 1°C.

Датчики будут расположены на некоторой одинаковой глубине под водой, где температура воды составит $16 \pm 0,5^\circ\text{C}$. На датчики будет действовать давление, которое можно рассчитать по формуле:

$$P = \rho * g * h, \quad (1)$$

где h – высота столба жидкости над датчиком;

g – модуль ускорения свободного падения, равно $9,8\text{м/с}^2$;

ρ – плотность воды.

Интенсивные дождевые паводки отмечаются обычно в первой декаде июня. При этом средняя температура воздуха составляет от 13 до 24°C, среднесезонная температура воздуха – 20,1°C. Средняя температура в водохранилище в июне составляет примерно 17,2°C. Также температура на ГТС главным образом определяется притоком и стоком реки, поступлением солнечной радиации, термогидродинамическим взаимодействием и турбулентным перемешиванием [10].

В осенне-зимний период паводки маловероятны. Среднесезонная температура в водоемах осенью составляет 5,2 °C, в зимний – 1,8°C. При этом средняя температура воздуха осенью 4,4 °C, а зимой – 9,7°C.

При проведении наблюдений за уровнем воды данные от датчиков передаются в центральную систему наблюдения на сервера. Данные наблюдений должны измеряться и передаваться автоматически по расписанию. Наблюдения должны подразделяться на два режима: штатный и экстренный. Штатный режим наблюдения производится в любой сезон

года, при уровне воды, не превышающем норму, а экстренный применяется при опасных или критических значениях уровня [11]. Измерение уровня воды в штатном режиме производится каждый час, а отправка данных 1-2 раза в сутки, а в режиме повышенной готовности измерения производятся каждые 10-15 минут, а передача данных – каждый час или менее часа.

Контейнер экспериментальной установки наполнялся водой с исходной температурой (на 5–6 °С ниже температуры окружающей среды) до произвольного уровня. Выдерживалось необходимое время, равное времени установления воды в статическое состояние (отсутствие флуктуаций уровня воды), опускались контрольные средства измерения температуры и плотности воды, снимались показания с поверочного средства. Производилось сопоставление результатов замеров с показаниями радарного датчика непрерывного измерения уровня жидкостей [12]. При сопоставлении результатов значения текущего уровня волоконно-оптического измерителя рассчитывались по формуле:

$$L_{\text{тек}} = \frac{P_i}{\rho_T g} \quad (2)$$

где P_i – среднее значение давления с сенсора при i -м уровне залива,

g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²,

ρ_T – плотность воды при соответствующей температуре воды, снятая с контрольного средства измерения.

Вычисление относительной погрешности измерения уровня осуществляется по формуле:

$$\delta_L = \frac{\bar{L}_{\text{ОМТГ}} - \bar{L}_{\text{СИ}}}{\bar{L}_{\text{СИ}}} 100 \%, \quad (3)$$

где $L_{\text{ОМТГ}}$ – среднее значение уровня, м, измеренное системой;

$L_{\text{СИ}}$ – контрольное значение давления в м, получаемое в результате пересчета значений измерений плотности ρ_T .

В таблице 1. представлены экспериментальные данные, полученные на представленной установке.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Уровень залива жидкостью: $L_{\text{тек}} > L_5$							
№ сенсора	λ , мм.	№ сенсора	λ , мм.	Период времени	Показания эталонного средства измерения		
					T, °C	ρ , кг/м ³	Lтек, мм
L5 TE	1583,7877	L5 PE	1570,8631	9.35 – 9.40	16,6	994	59.06
L4 TE	1518,9341	L4 PE	1521,8415	9.42 – 9.44	16,1	-	
L3 TE		L3 PE		-	15,7	-	
L2 TE	1535,2085	L2 PE	1536,7430	9.50 – 9.53	15,6	-	
L1 TE	1520,6271	L1	1522,7015	9.54 – 9.56	15,5	-	
Уровень залива жидкостью: $L_5 > L_{\text{тек}} > L_4$							
№ сенсора	λ , мм.	№ сенсора	λ , мм.	Период времени	Показания эталонного средства измерения		
					T, °C	ρ , кг/м ³	Lтек, м
L5 TE	1583,7841	L5 PE	1570,8255	11.08	19,4	-	52.38
L4 TE	1518,9578	L4 PE	1521,8942	11.11– 11.15	16,6	994	
L3 TE	-	L3 PE	-	-	-	-	
L2 TE	1535,2272	L2 PE	1536,7504	11.19– 11.22	15,8	-	
L1 TE	1520,6336	L1 PE	1522,6657	11.23– 11.26	15,5	-	

По результатам статистической обработки данных, полученных при испытаниях, относительная погрешность измерения уровня составила 0,3%, а в абсолютных значениях погрешность измерений составила 2 мм. Данные значения по первой величине соответствуют группе уровнемеров, работающих по давлению в дискретных точках, а по второй – группе микроволновых радаров.

Вывод

Ежегодно увеличивающееся количество чрезвычайных ситуаций во всем мире принуждает нас разрабатывать все новые способы и методы, которые могут уменьшить последствия, либо совсем предотвратить такие опасные ситуации. Один из таких способов представлен в данной работе, где разработана экспериментальная установка, позволяющая контролировать уровень воды, установленная на макете гидротехнического затвора. Экспериментально доказано повышение чувствительности измерения при контроле уровня воды на гидротехническом сооружении.

Литература

1. Акимов, В. А. Опасные гидрометеорологические явления на территории России: Научно-популярное издание / В. А. Акимов, Р. А. Дурнев, Ю. И. Соколов; ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – Москва, 2009. – 316 с. – ISBN 978-5-93970-038-2. – EDN MQQNJN.
2. Муравьева Е.В. Прогнозирование чрезвычайной ситуации на гидротехнических сооружениях / Е.В. Муравьева, Е.В. Арефьева, Д.О. Копытов, А.И. Шакирова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 5(103). – С. 82-89. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-5-82-89. – EDN LQTLWQ.
3. Шакирова А.И. Системы мониторинга технического состояния и предупреждения аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях с использованием волоконно-оптических средств инструментального контроля: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13/ А.И. Шакирова. – Казань. – 2020. – 224 с.
4. Bhat S.P. Automation of water discharge process at canals / S.P. Bhat, S.R. Hirekhan // Proc. 2015 Int. Conf. Appl. Theor. Comput. Commun. Technol. iCATccT 2015. – P. 609–613
5. Belaud G. Hydraulic modeling of an automatic upstream water-level control gate for submerged conditions. / G. Belaud, X. Litrico, B. De Graaf, J.P. Baume // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2008 – 134(3). – P. 315–326.
6. Vinogradov V.Yu. Fiber acoustic control system for assisting jettison bladder type fuel cell of MI-8 helicopter in emergency conditions / V.Yu. Vinogradov, E.V. Muravyeva, A.I. Shakirova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Т. 1061. – № 1. – С. 012063.
7. Ameen O.F. Graphene diaphragm integrated FBG sensors for simultaneous measurement of water level and temperature / O.F. Ameen, M.H. Younus, M.S. Aziz, A.I. Azmi, R.K. Raja Ibrahim, S.K. Ghoshal // Sens. Actuators A Phys. – 2016. – 252. – P. 225–232.
8. Lieftucht D. HD Mold – A New Fiber-Optic-Based Mold Monitoring System. / D. Lieftucht, M. Reifferscheid, A. Krasilnikov, T. Schramm, D. Kirsch // AISTech Conference Proceedings. – 2013.
9. Meltz G. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method / G. Meltz, W. Morey, W. Glenn // Optics Letters. – 1989. – 14. – P. 823-825.
10. Краткий гидрологический обзор за 2020 год: [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Казань. – 2017. – Режим доступа: URL. <http://www.tatarmeteo.ru/ru/gidrologiya/kratkij-gidrologicheskij-obzor.html>

11. Поддубный С.А. Особенности гидродинамического режима и термической структуры руслового пруда малой реки / С.А. Поддубный, К.А. Подгорный, А.И. Цветков, М.В. Цветкова // Географический вестник – 2015. – 2(25) – С. 46-54.

12. Морозов, О. Г. Радиофотонный измеритель уровня воды для гидротехнических плотин / О. Г. Морозов, А. И. Шакирова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2020. – Т. 76, № 3. – С. 131-137. – EDN UYLLEA.

FIBER-OPTIC SENSOR SYSTEMS FOR MEASURING THE WATER LEVEL IN HYDRO-ENGINEERING STRUCTURES

A.I. Shakirova, I.I. Ganibaev

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper considers one of the methods for measuring the water level in hydraulic structures. Increasingly, emergency situations occur at hydraulic structures due to excessive overflow of the reservoir during the spring flood and heavy precipitation, then hydraulic gates cannot cope with excess volumes of water. The relevance of this work is due to the increase in the number of emergencies caused by floods. Accidents at such facilities can occur suddenly and pose a great danger both to the facilities themselves and to nearby settlements, economic facilities and agricultural land. Therefore, careful monitoring of the water level at hydraulic structures is required in order to identify any possible emergencies. Water level rise in waterworks can be measured by incorporating a system of fiber optic sensors into waterworks gates and thus reading the water level in real time.

Key words: fiber-optic sensor systems, hydraulic structures, gates, water level, emergencies, accidents.

Статья представлена в редакцию 30 июня 2023г.