

УДК 631.672.4: 621.3.087.47: 681.586.48

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-366-1-83-89

В.Л. Снежко, ✉
Д.М. Бенин,
А.В. Подобный,
Н.В. Гавриловская

Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

✉ vlsnejko@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию:
18.11.2022

Одобрена после рецензирования:
30.11.2022

Принята к публикации:
15.12.2022

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-366-1-83-89

Vera L. Snezhko, ✉
Dmitrii M. Benin,
Aleksandr V. Podobnyj,
Nadezhda V. Gavrilovskaya

Russian State Agrarian University —
Moscow Agricultural Academy named after
K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

✉ vlsnejko@rgau-msha.ru

Received by the editorial office:
18.11.2022

Accepted in revised:
30.11.2022

Accepted for publication:
15.12.2022

Устройство автоматического контроля уровня воды для мелиоративных объектов

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Мониторинг уровня режима открытой мелиоративной сети необходим не только для ее безопасного функционирования, но и для определения объема водоподдачи в измерительных створах, оборудованных средствами водоучета. Автоматический мониторинг уровней на открытой мелиоративной сети наиболее проблематичен. На старых оросительных системах используются устаревшие средства измерений, внедрение цифровых технологий ограничивается высокой стоимостью оборудования и сложностью подвода электроэнергии к удаленным створам. Целью исследований была разработка автоматизированного цифрового комплекса для мониторинга уровня воды на открытой мелиоративной сети с питанием от возобновляемого источника энергии и испытание экспериментального образца в условиях действующей оросительной системы.

Методы. При выборе конструктивных элементов и разработке программного кода выполнен анализ условий эксплуатации, диапазонов и требуемой точности измерений; использованы методы теории программирования логических контроллеров, декомпозиции и формализации алгоритмов, структурного программирования. При испытаниях опытного образца использованы методы теории планирования эксперимента, математической статистики и теории ошибок.

Результаты. Экспериментальный образец цифрового измерительного комплекса в автоматическом режиме производит измерения температуры воздуха, атмосферного давления и расстояния до уровня свободной поверхности воды, производит их запись в память устройства и/или передачу на удаленный сервер. Для работы комплекса требуется постоянное напряжение 5 В, питание возможно от солнечной батареи и/или от аккумулятора. Испытания автоматического комплекса в водоеме при отсутствии выраженного течения и в канале с максимальной скоростью течения порядка 2,6 м/с продемонстрировали удовлетворительную точность измерений.

Ключевые слова: мелиорация, водоснабжение, уровень воды, контроль, автоматическое измерение, автоматизация, датчики

Для цитирования: Снежко В.Л., Бенин Д.М., Подобный А.В., Гавриловская Н.В. Устройство автоматического контроля уровня воды для мелиоративных объектов. *Аграрная наука*. 2023; 366 (1): 83-89, <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-83-89>

© Снежко В.Л., Бенин Д.М., Подобный А.В., Гавриловская Н.В.

Automatic water level monitoring device for open reclamation network

ABSTRACT

Relevance. Monitoring of the level regime of an reclamation network is necessary not only for its safe operation, but also for determining the volume of water supply in measuring points equipped with water accounting facilities. The automatic monitoring of levels in an open reclamation network is the most problematic. Old irrigation systems use outdated measuring instruments, the introduction of digital technologies is limited by the high cost of equipment and the complexity of supplying electricity to remote sites. The aim of the research was to develop an automated digital complex for monitoring the water level in an open reclamation network powered by a renewable energy source and to test an experimental sample under the conditions of an existing irrigation system.

Methods. When choosing structural elements and developing a program code, an analysis of operating conditions, ranges and required measurement accuracy was carried out; methods of the theory of programming logic controllers, decomposition and formalization of algorithms, structural programming were used. When testing a prototype, methods of the theory of experiment planning, mathematical statistics and the theory of errors were used.

Results. An experimental sample of a digital measuring complex automatically measures air temperature, atmospheric pressure and distance to the level of the free surface of water, records it in the device's memory and/or transfers it to a remote server. The operation of the complex requires a constant voltage of 5 V, it can be powered by a solar energy and/or a battery. Tests of the automatic complex in a reservoir in the absence of a pronounced current and in a channel with a maximum flow velocity of about 2.6 m/s demonstrated satisfactory measurement accuracy.

Key words: melioration, water supply, water level, control, automatic measurement, automation, sensors

For citation: Snezhko V.L., Benin D.M., Podobnyj A.V., Gavrilovskaya N.V. Automatic water level monitoring device for open reclamation network. *Agrarian science*. 2023; 366 (1): 83-89, <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-83-89> (In Russian).

© Snezhko V.L., Benin D.M., Podobnyj A.V., Gavrilovskaya N.V.

Введение / Introduction

По данным Росводресурсов, в 2021 году в Российской Федерации объем использованной свежей воды составил 48 млрд м³, сброс загрязненных сточных вод в поверхностные объекты — 11,6 млрд м³. В общем объеме водозабора на нужды орошения и сельскохозяйственного водоснабжения приходилось 14%, в объеме загрязненных сточных вод — порядка 5%. Орошаемые земли в России занимают площадь порядка 4,7 млн га, а ирригация является одной из водоемких отраслей аграрного производства.

Учет водопотребления на нужды орошения необходим для формирования платы за оросительную воду, так как при использовании двухставочного тарифа стоимость воды зависит не только от площади орошаемого участка, но и от объема фактически поданной оросительной воды [1]. На оросительных системах расходы воды в каналах (при подаче до 10 м³/с) измеряются с помощью стандартных водомерных устройств: водосливов (треугольных, прямоугольных, трапецеидальных, с тонкой стенкой или порогом) и лотков различных модификаций («Паршала», «Вентури», «САНИИРИ» и т.п.). При использовании большинства водомерных устройств необходимо измерение уровня воды, которое производится с помощью игольчатых и уровнемерных реек, приборов промышленного контроля (поплавковых, буйковых, акустических уровнемеров).

В отечественной практике на мелиоративных системах основным инструментом измерения уровня воды в настоящее время являются стандартные гидротехнические уровнемерные рейки, размещаемые на гидростопках в береговых успокоительных нишах (колодцах). Измерения уровня рейками является дискретным, выходная информация исключительно визуальная. Отечественные переносные водомерные рейки ГР-116 при диапазоне измерений до 1 м имеют погрешность измерений $\pm 0,002$ м. Поплавковые уровнемеры не требуют подключения к электропитанию и в диапазоне измерений до 20 м обеспечивают погрешность в пределах $\pm 0,01$ м (ГР-116, РГПТ-А).

Аналоговые сигналы являются выходной информацией для ряда датчиков уровня отечественного и зарубежного производства. Российский датчик уровня QT50U требует постоянного напряжения 24 В и в диапазоне до 8 м имеет погрешность $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины, такую же погрешность в диапазоне до 11 м имеет датчик IRU. Датчик «Honeywell» производства США требует постоянного напряжения 12 В и в диапазоне 0,5–20 м дает

погрешность $\pm 0,0001$ м [2]. Диапазон, погрешность измерений и требуемое напряжение различаются в зависимости от типа устройств.

Исследования средств водоизмерения, применяемых на открытой сети государственных мелиоративных систем, выявили крайне ограниченное применение современных цифровых технологий и оборудования. Из 2181 пункта водоучета 60% использовали гидрометрические рейки, 4% — уровнемеры и расходомеры, причем устаревшего образца [3]. На старых оросительных системах контроль уровня воды зачастую происходит по меткам уровня, нанесенным непосредственно на бетонные поверхности сооружений, или выполняется по рейкам, установленным перед водомерными устройствами (рис. 1).

Использование зарубежных автоматических уровнемеров (поплавковых, напорных, ультразвуковых, радиолокационных) конечными пользователями сдерживает высокая стоимость оборудования и проблемы обеспечения регулярного технического обслуживания.

В последнее время получили применение методы контроля уровней на основе датчиков-камер с последующей обработкой данных микроконтроллерами [4]. Для снижения затрат разрабатываются автономные недорогие системы мониторинга. Интересной является разработка системы контроля, включающей датчик давления и регистратор данных [5]. Испытания новых средств водоучета, использующих датчики давления и передачу данных на сервер в условиях юга России приведены в работе [6].

Автоматизация учета воды средствами телеметрии является одним из направлений совершенствования мелиоративных систем [7]. Цифровизация оросительных систем — актуальная проблема современного развития мелиорации. Целью исследований является разработка комплекса автоматического измерения уровня воды на открытой мелиоративной сети и последовательное испытание экспериментального образца на водоеме (при отсутствии течения и волнообразования) и на канале действующей оросительной системы.

Материал и методы исследования / Materials and method

Измерительный комплекс разрабатывался для испытаний на реке Большая Лосиха Алтайского края на акватории гидроузла Лосихинской оросительной системы, расположенной в Первомайском районе. При нормальном подпорном уровне (НПУ), равном 144,4 м (балтийская система высот), объем водохранилища составляет 123 тыс. м³; при уровне мертвого объема (УМО), равном 143,6 м, объем водохранилища равен 90 тыс. м³.

Средняя глубина водохранилища — 3,65 м. В состав гидроузла входят: бетонная водоподъемная переливная плотина, водосбросное сооружение, насосная станция, водозаборное сооружение и шлюз-регулятор. Максимальная пропускная способность шлюза-регулятора — 8,6 м³/с. Береговое водозаборное сооружение, расположенное в верхнем бьефе, предназначено для забора воды на орошение и совмещено с насосной станцией. Забор воды к основным насосам осуществляется из подводящего канала по двум ниткам труб. Максимальная глубина воды в подводящем канале

Рис. 1. Визуальные измерения уровней: а — измерительная шкала на поверхности бетонного бычка перед пазом; б — рейка в успокоительной нише перед трапецеидальным водосливом [2] (фото авторов)

Fig. 1. Visual measurements of levels: а — a measuring scale on the surface of a concrete pillar in front of the groove; б — staff in a still niche in front of the trapezoidal spillway [2] (photo of the author)



а



б

Рис. 2. Подводящий канал водозабора Лосихинской оросительной системы:

а — вид со стороны верхнего бьефа; б — вид со стороны нижнего бьефа (фото авторов)

Fig. 2. The inlet canal of the water intake of the Losikhinskaya irrigation system:

а — view from the upstream side; б — view from the downstream side (photo of the author)



а



б

перед плоским затвором шлюза-регулятора составляет 1 м, размер затвора — 2 x 1,5 м (рис. 2).

Отводящий канал представляет собой бетонную трубу тоннельного типа с размером затвора 2 x 1,5 м и длиной 26 метров, сопряженную с водобойным колодцем и гасителем в нижнем бьефе. Все сооружения гидроузла относятся к IV (самому низкому) классу опасности, для которого установка контрольно-измерительной аппаратуры исходно не предусмотрена проектом. В настоящее время на гидроузле нет оборудования для автоматического контроля уровней воды. Служба эксплуатации фиксирует отметки уровней в створе плотины по уровнемерной рейке с последующей записью в журнале наблюдений.

Основные требования, предъявляемые к измерительному комплексу, были сформированы с учетом рекомендаций [8]: питание от возобновляемого источника энергии (солнечных батарей) и от аккумуляторной батареи и автоматическое измерение расстояния от плоскости установки датчика до уровня воды, автоматическое измерение температуры атмосферного воздуха и атмосферного давления; передача данных на удаленный компьютер в режиме реального времени с использованием GPRS и параллельная запись в память устройства; удобный интерфейс просмотра данных.

При выборе конструктивных элементов измерительного комплекса и разработке программного кода был выполнен анализ условий эксплуатации, диапазонов и требуемой точности измеряемых величин; использованы методы теории программирования логических контроллеров, методы декомпозиции и формализации алгоритмов, структурного программирования. При испытаниях опытного образца устройства использованы методы теории планирования эксперимента, математической статистики, а также методы теории ошибок.

Оценка точности наблюдений за уровнем воды является неотъемлемой частью использования любых средств измерений [9]. В исследовании [10] отмечено, что систематические ошибки определения уровня воды с помощью датчиков по результатам обследования 6 гидрометрических станций составляли от $\pm 0,005$ м до $\pm 0,068$ м, что привело к погрешности определения

среднесуточного стока от 4% до 12%. Для выявления погрешностей измерений в России, Канаде, США, Франции результаты показаний датчиков сопоставляются с эталонным измерением по гидрометрическим (водомерным) рейкам.

В испытаниях основной измеряемой величиной являлось расстояние от плоскости установки датчика до уровня воды, которое необходимо сопоставить с результатами визуальных замеров по водомерным рейкам. Абсолютная погрешность на каждой проверяемой отметке вычислялась как разность между показанием датчика и соответствующим отсчетом по рейке:

$$\Delta h_{o.n.} = h_{n.y.} - h_{c.n.}, \quad (1)$$

где $h_{n.y.}$ — показания проверяемого устройства; $h_{c.n.}$ — расстояние по рейке как средству проверки.

За основную абсолютную погрешность принималась макси-

мальная по модулю абсолютная погрешность. Вариация показаний, равная наибольшей абсолютной погрешности на одной и той же отметке при росте уровня воды и при его снижении, не должна превышать абсолютного значения основной погрешности.

Отметка установки датчика (отметка начала шкалы измерений) соответствовала нулевой отметке отсчета по водомерным рейкам. Параллельного контроля данных измерительного комплекса по температуре атмосферного воздуха и влажности воздуха в месте установки не проводилось. Впоследствии эти значения могут быть использованы для внесения показания уровня корректирующих поправок, вычисляемых в зависимости от разности значений атмосферного давления, измеренного при градуировке и во время выполнения измерений. Влияние температуры на показания датчиков также может приводить к систематическим ошибкам [11] и может быть учтено впоследствии.

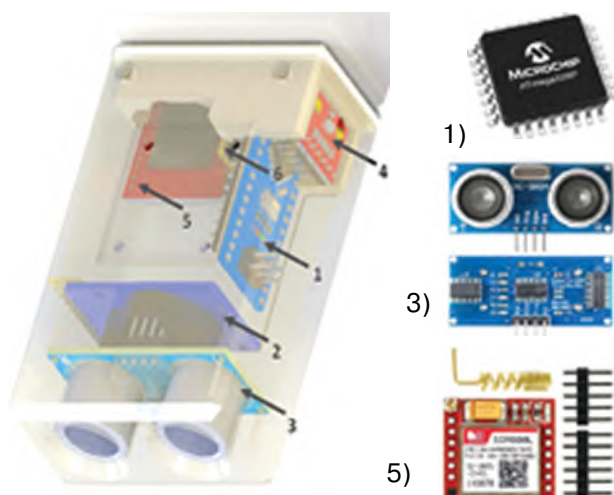
Результаты и обсуждение / Results and discussion

Экспериментальный измерительный комплекс был разработан и собран в лаборатории кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева, программирование микроконтроллеров также выполнено на базе кафедры. Основным элементом измерительного комплекса является разработанный в рамках исследований датчик, конструкция которого приведена на рис. 3.

Микроконтроллер 1 предназначен для считывания данных с сенсоров и модулей, их обработки, записи на карту памяти и/или отправки по каналам сотовой связи на удаленный сервер. Для управления всеми модулями запрограммирован микроконтроллер «Atmega328p». Часы реального времени 2 являются энергозависимым модулем для привязки результатов измерений к реальным временным меткам. Ультразвуковой сенсор 3 служит для приема и передачи сигналов в ультразвуковом диапазоне частот. В используемом ультразвуковом дальнотоме, в отличие от инфракрасных датчиков, измерения не искажаются от бликов или цвета (прозрачности) воды. Выбор ультразвукового датчика обусловлен его относительно низкой стоимостью по сравнению

Рис. 3. Конструкция датчика: 1 — микроконтроллер; 2 — часы реального времени; 3 — ультразвуковой сенсор; 4 — прецизионный датчик давления и температуры воздуха; 5 — GSM-модуль; 6 — модуль записи данных на SD-карту

Fig. 3. Sensor design: 1 — microcontroller; 2 — real time clock; 3 — ultrasonic sensor; 4 — precision air pressure and temperature sensor; 5 — GSM-module; 6 — module for writing data to SD-card



с датчиками других типов [12]. Алгоритм получения данных следующий: на принимающий вывод датчика подается импульс длительностью 10 мс, после чего в модуле сигнал преобразуется в 8 импульсов с частотой 40 кГц, импульсы через излучатель направляются в сторону водной поверхности и после отражения будут приняты приемником как входной сигнал на выходном выводе. С помощью контроллера сигнал переводится в расстояние по формуле:

$$S = \frac{v \cdot t}{2}, \quad (2)$$

где S — расстояние до водной поверхности, м; v — скорость звука, $v \approx 340$ м/с; t — время прохождения сигнала от излучателя до водной поверхности и обратно.

Прецизионный датчик атмосферного давления и температуры воздуха 4 работает в диапазоне давления от 300 до 1100 ГПа (от –500 до +9000 метров над уровнем моря), обеспечивает точность измерения давления при температуре $25^\circ\text{C} \pm 0,12$ ГПа (что эквивалентно разности высот ± 1 м), абсолютная точность ± 1 ГПа. Диапазон измерения температур датчика лежит в пределах -40 – $+85^\circ\text{C}$ с точностью измерений температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

Рис. 4. Пример расположения измерительного устройства на штанге (без защитного корпуса): 1 — датчик сбора данных; 2 — аккумулятор; 3 — солнечная панель

Fig. 4. An example of the location of the measuring device on the rod (without a protective case): 1 — data acquisition sensor; 2 — battery; 3 — solar panel



После проведения серии измерений данные отправляются на сервер и параллельно сохраняются на карте памяти. GSM-модуль 5 осуществляет передачу данных по каналу GSM или GPRS. Использование пакетной передачи данных GPRS обеспечивает более широкую зону покрытия и стабильность связи, чем технологии 3G/4G. Поскольку объем передаваемой информации достаточно мал, снижение скорости передачи данных измерений не критично. В устройстве использован модуль связи SIM800, являющийся GSM-модемом, и по возможности не уступающий сотовому телефону при низкой стоимости и высокой энергоэффективности. Модуль записи данных на SD-карту памяти 6 позволяет хранить данные на энергонезависимом носителе. Для этого использован регистратор данных на микропроцессоре «ATmega328» — «OpenLog», который имеет достаточно гибкие настройки и открытый исходный код, позволяющие адаптировать устройство для решаемых задач.

На рис. 4 приведен пример размещения элементов измерительного комплекса на штанге (общий защитный корпус не показан). В состав измерительного комплекса входят датчик сбора данных 1, аккумулятор 2 и солнечная панель 3.

Аккумулятор позволяет накапливать избыточную энергию в период наибольшей солнечной активности и отдавать ее в период наименьшей. Использован литий-железно-фосфатный аккумулятор. Он обеспечивает стабильное напряжение заряда и имеет более длительный срок службы, чем литий-ионные аккумуляторы. Солнечная панель позволяет комплексу работать автономно от внешних источников электроэнергии. Продолжительность солнечного сияния на территории Алтайского края одна из максимальных в России — более 2000 часов в год. Для региона поливной период длится в среднем 4 месяца — с 1 мая по 31 августа. Суммарная солнечная радиация в этот период максимальна, что делает оправданным использование солнечных панелей в качестве альтернативного источника энергии.

Все корпуса элементов измерительного комплекса напечатаны в лаборатории на 3D-принтере. Корпус основного датчика сбора данных — на высокоточном полимерном принтере, корпуса менее требовательных элементов — на FDM-принтере с использованием конструкционного ABS-пластика. Разработка корпусов производилась в программном комплексе «SolidWorks». Габаритные размеры всего измерительного комплекса — $0,2 \times 0,5 \times 0,5$ м, габаритные размеры основного датчика $1 - 0,1 \times 0,06 \times 0,02$ м.

Волнение поверхности в створе измерения уровня может негативно сказываться на точности измерений. В отечественной и зарубежной практике при амплитуде колебаний уровня воды более 0,05 м на водомерных постах обязательна установка успокоительных устройств, которые уменьшают высокочастотные колебания уровня воды. Известны разработки автоматических пневматических уровнемеров, использующих аналоговые фильтры нижних частот «бегущей волны», которые отфильтровывают шумы от ветровых волн и зыби на воде [13]. Для установки этого уровнемера не требуется устройство успокоительного колодца, но ошибки измерений минимизируются.

На подводящем канале водозабора Лосихинской оросительной системы успокоительная ниша/колодец не предусмотрены, так как проект не предполагал автоматической регистрации уровней воды. Для устранения возможных колебаний измеряемых уровней при их фиксации измерительным устройством предусмотрено

Рис. 5. Тестовые испытания измерительного комплекса на акватории пруда: а — акватория пруда; б — установка гидрометрической штанги с измерительным комплексом; в — вывод данных измерений на персональный компьютер (фото авторов)

Fig. 5. Tests of the measuring complex in the water area of the pond: а — water area of the pond; б — installation of a hydrometric rod with a measuring complex; в — output of measurement data to a personal computer (photo of the author)



а



б



в

последовательное использование двух фильтров данных — медианного фильтра третьего порядка и рекурсивного фильтра скользящего среднего. Алгоритм применения фильтров следующий: выполняется 10 мгновенных замеров, которые фильтруются и дают усредненное значение уровня. Затем в течение одной минуты операция повторяется 20 раз для получения среднеквадратического отклонения.

Тестирование экспериментального образца измерительного комплекса выполнено в безветренную погоду на Среднем Фермском пруду кампуса РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева (рис. 5, а). Во время испытаний для снижения веса устройства солнечные батареи не использовались, энергоснабжение происходило от аккумуляторной батареи.

В каждой серии опытов изменялась высота крепления измерительного комплекса на гидрометрической штанге: 0,9 м, 1,2 м, 1,5 м, 2,0 м. Штанга устанавливалась в прибрежной зоне на глубине 0,5 м (рис. 5, б). Положение штанги контролировалось пузырьковым уровнем. Для каждого высотного положения устройства производились ежеминутные измерения расстояния до водной поверхности датчиком с выводом информации на компьютер (рис. 5, в). Параллельно с интервалом в 3 минуты измерения делали водомерной рейкой ГР-104 с погрешностью отсчета $\pm 0,01$ м. Уровень воды в месте установки штанги во время эксперимента практически не изменялся. Каждая серия включала 5 замеров с интервалом 3 минуты (всего 20 дискретных измерений). Данные замеров по рейке

вносились в журнал наблюдений с указанием времени замеров.

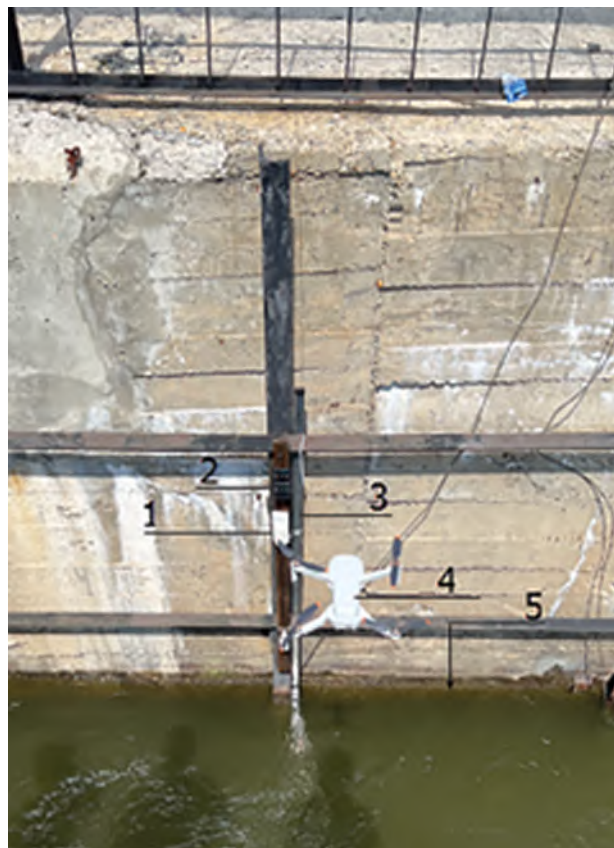
Выбор гидрометрического створа для установки экспериментального образца измерительного комплекса на подводящем канале Лосихинского гидроузла соответствовал рекомендациям для гидропостов. При расходе подводящего канала до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ длина прямолинейного участка канала в 4 раза превышала его ширину, то есть составляла более 8 метров. Комплекс был жестко закреплен на металлическом профиле внутри прямоугольного бетонного участка вне зон влияния плоского затвора и входа (рис. 6). Погодные условия позволили избежать монтажа общего защитного корпуса, что снизило вес устройства до 1,6 кг. На рис. 6 приведен фрагмент проведения испытаний.

Датчик 1, установленный на расстоянии 0,5 м от водной поверхности, получал питание от солнечной батареи 2 и передавал информацию на компьютер через равные интервалы времени (1 минуту). Гидрометрическая рейка ГР-104 (3), с погрешностью отсчета $\pm 0,01$ м служила для визуального контроля уровня воды 5. Для удобства снятия показаний по рейке с учетом требований техники безопасности использовался квадрокоптер 4 с видеокамерой. Метод измерения уровня воды с помощью видеокамеры и стандартных двухцветных рейкомеров изложено в работе [14]. Мониторинг уровня воды при автоматическом обнаружении видеокамерой рейки и считывания ее показаний описан в исследованиях [15].

Время непрерывной работы экспериментального образца измерительного комплекса на подводящем

Рис. 6. Испытания измерительного комплекса при установке внутри бетонного участка подводящего канала: 1 — датчик; 2 — солнечная панель; 3 — гидрометрическая рейка; 4 — квадрокоптер; 5 — водная поверхность (фото авторов)

Fig. 6. Tests of the measuring complex when installed inside the concrete section of the supply channel: 1 — sensor; 2 — solar panel; 3 — hydrometric rod; 4 — quadrocopter; 5 — water surface (photo of the author)



канале составило 100 часов, данные измерений представлены листингом значений с временными метками (интервал между измерениями — 1 минута). Контрольные замеры по рейке проводились в светлое время суток с интервалом между измерениями 1 час, данные визуального контроля состояли из 60 дискретных измерений, внесенных в журнал измерений с соответствующими временными метками.

Сравнение результатов измерений по водомерной рейке и данных измерений, полученных с помощью комплекса, выполнено для испытаний на акватории водоема и на подводном канале. Данные листинга сопоставлялись с данными журнала измерений для одинаковых временных меток. При работе измерительного комплекса на акватории пруда с практически гладкой поверхностью воды основная абсолютная погрешность составила 0,01 м. Выраженной динамики уровня воды на акватории пруда во время измерений не было.

При работе измерительного комплекса на подводном канале уровень воды за 100 часов наблюдений имел максимальное снижение на 0,36 м, затем рост на 0,36 м по отношению к нулевой отметке отсчета по рейке. Основная абсолютная погрешность равна 0,02 м. Вариация показаний, равная наибольшей абсолютной погрешности на одной и той же отметке при росте уровня воды и при его снижении, была меньше абсолютного значения основной погрешности.

Для сравнения: акустический датчик уровня «Kalesto» (Германия) имеет диапазон измерений 0,5–30,0 м, погрешность $\pm 0,01$ м и работает при постоянном напряжении 12 В.

Технические возможности комплекса позволяют измерять уровни в интервале от 0,2 до 4,0 м. Целью дальнейших исследований являются испытания комплекса

при установке на высоте более 2 метров над уровнем воды, оценка точности измерений и разработка компьютерной программы, обеспечивающей удобный интерфейс контроля за уровнем режимом открытой мелиоративной сети.

Выводы / Conclusion

Разработанный экспериментальный образец цифрового измерительного комплекса способен в автоматическом режиме производить ежеминутные измерения температуры атмосферного воздуха, атмосферного давления и расстояния до уровня свободной поверхности воды с записью в память устройства и/или передачей на удаленный сервер. Габаритные размеры комплекса 0,2 × 0,5 × 0,5 м, вес вместе с защитным корпусом — 2 кг. Для работы комплекса требуется постоянное напряжение 5 В, питание возможно от солнечной батареи и/или от литий-железно-фосфатного аккумулятора.

Точность измерения атмосферного давления при температуре 25 °С составляет $\pm 0,12$ гПа. Точность измерения температуры атмосферного воздуха — ± 1 °С, диапазон измерения лежит в пределах $-40...+85$ °С.

Испытания автоматического комплекса в водоеме при отсутствии выраженного течения и в канале с максимальной скоростью течения порядка 2,6 м/с продемонстрировали удовлетворительную точность измерений. В испытаниях при высоте установки от 0,4 до 2,0 м над статичным уровнем воды основная абсолютная погрешность составила 0,01 м. При наличии волновых явлений основная абсолютная погрешность составила 0,02 м. Для повышения точности измерений на мелиоративных каналах комплекс можно размещать в нишах или успокоительных колодцах.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу.

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work.

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.

The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Исследования выполнены при реализации Программы развития Университета в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

FUNDING:

The research was carried out during the implementation of the University Development Program within the framework of the program of strategic academic leadership «Priority-2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Манжина С.А., Медведева Л.Н. Современные подходы к определению экономически обоснованной стоимости подачи воды на орошение. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2018; 2 (31): 148–170. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-148-170.
- Методы измерения расхода воды на реках, каналах, в напорных трубопроводах насосных станций оросительных систем. Обзор. Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии. Ташкент: *Научно-информационный центр*. 2014. 84 с.
- Шепелев, А.Е., Юченко Л.В. Анализ средств водоизмерения на пунктах водоучета мелиоративных систем Минсельхоза России. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2019; 1 (73): 43–46.
- Eltner A., Bressan P.O., Akiyama T., Gonçalves W.N., Marcato J. Junior. Using Deep Learning for Automatic Water Stage Measurements. *Water Resources Research*. 2021;57:3. DOI: 10.1029/2020WR027608

REFERENCES

- Manzhina S. A., Medvedeva L. N. Modern approaches to determining the economically justified cost of water supply for irrigation. *Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2018;2(31): 148–170 (In Russian) DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-148-170.
- Methods for measuring water flow in rivers, canals, in pressure pipelines of pumping stations of irrigation systems. Review. Interstate Coordination Water Commission of Central Asia. Tashkent: *Scientific information center*. 2014. 84 p.
- Shepelev A. E., Yuchenko L. V. Analysis of water metering devices at water accounting points for reclamation systems of the Ministry of Agriculture of Russia. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2019; 1 (73): 43–46 (In Russian)
- Eltner A., Bressan P.O., Akiyama T., Gonçalves W.N., Marcato J. Junior. Using Deep Learning for Automatic Water Stage Measurements. *Water Resources Research*. 2021;57:3. DOI: 10.1029/2020WR027608

5. Greswell R., Ellis P., Cuthbert M., White R., Durand V. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. *Journal of Hydrology*. 2009;373(3–4): DOI: 416–425. 10.1016/j.jhydrol.2009.05.001
6. Чураев А.А., Шепелев А.Е., Юченко Л.В. Оценка работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений. *Мелиорация и гидротехника*. 2022; 12 (1): 228–244. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244.
7. Васильченко А.П., Шепелев А.Е., Кореновский А.М. К вопросу оснащения пунктов водоучета средствами телеметрии. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2020; 3 (39): 140–153. DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-140-153
8. Вайнберг М.В., Чураев А.А. Основные требования, предъявляемые к средствам измерения параметров водного потока с учетом новых условий водопользования. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2017;2(66): 249–253.
9. Van der Made J.E. Determination of the accuracy of water level observations. In Proceedings of the Exeter Symposium. *IAHS Publications*. 1982;134: 172–184.
10. Horner I., Renard B., Le Coz J., Branger F., McMillan H.K., Pierrefeu G. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*. 2018; 54 (3): 1952–1976.
11. Sauer V.B., Turnipseed D.P. *Stage, measurement at gaging stations* (Tech. Methods, Book 3, chap. A7.). Reston, VA: U.S. Geological Survey. 2010. 45 pp. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/>
12. Жмудь В.А., Кондратьев Н.О., Кузнецов К.А., Трубин В.Г., Димитров Л.В. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04. *Автоматика и программная инженерия*. 2017; 4 (22): 18–26.
13. Hsien P.P., Sung C.L. A precision water-level and sediment-load monitoring system—an update. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2006;18(3): 287–290. DOI: 10.1016/S1001-6058(06)60067-X
14. Zhang Z., Zhou Y., Liu H., Gao H. In-situ water level measurement using NIR-imaging video camera. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019;67: 95–106. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.04.004
15. Bai G., Hou J., Zhang Y., Li B., Han H., Wang T., Hinkelmann R., Zhang D., Guo L. An intelligent water level monitoring method based on SSD algorithm. *Measurement*. 2021;185: DOI: 110047. 10.1016/j.measurement.2021.110047.
5. Greswell R., Ellis P., Cuthbert M., White R., Durand V. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. *Journal of Hydrology*. 2009; 373 (3–4): DOI: 416–425. 10.1016/j.jhydrol.2009.05.001
6. Churaev A.A., Shepelev A.E., Yuchenko L.V. Performance assessment of the monitored water metering device within the range of permissible measurement error. *Land Melioraciya i gidrotehnika*. 2022; 12 (1): 228–244 (In Russian). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244.
7. Vasilchenko A.P., Shepelev A.Ye., Korenovskiy A.M. On the issue of equipping water accounting points with telemetry. *Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2020;3(39): 140–153 (In Russian). DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-140-153
8. Vaynberg M.V., Churaev A.A. The main requirements for the means of measuring the parameters of the water flow, taking into account the new conditions of water use. *Ways to improve efficiency irrigated agriculture*. 2017; 2 (66): 249–253 (In Russian).
9. Van der Made J.E. Determination of the accuracy of water level observations. In Proceedings of the Exeter Symposium. *IAHS Publications*. 1982;134: 172–184.
10. Horner I., Renard B., Le Coz J., Branger F., McMillan H. K., Pierrefeu G. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*. 2018; 54 (3): 1952–1976.
11. Sauer V.B., Turnipseed D.P. *Stage, measurement at gaging stations* (Tech. Methods, Book 3, chap. A7.). Reston, VA: U.S. Geological Survey. 2010. 45 pp. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/>
12. Zhmud V.A., Kondratyev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V. Ultrasonic Distance Sensor HC-SR04. *Automation and software engineering*. 2017;4(22): 18–26 (In Russian).
13. Hsien P.P., Sung C.L. A precision water-level and sediment-load monitoring system—an update. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2006;18(3): 287–290. DOI: 10.1016/S1001-6058(06)60067-X
14. Zhang Z., Zhou Y., Liu H., Gao H. In-situ water level measurement using NIR-imaging video camera. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019; 67: 95–106. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.04.004
15. Bai G., Hou J., Zhang Y., Li B., Han H., Wang T., Hinkelmann R., Zhang D., Guo L. An intelligent water level monitoring method based on SSD algorithm. *Measurement*. 2021; 185: DOI: 110047. 10.1016/j.measurement.2021.110047.

ОБ АВТОРАХ:**Вера Леонидовна Снежко,**

профессор, заведующая кафедрой
 Российский государственный аграрный университет — Мо-
 сковская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева,
 ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
 E-mail: vlsnejko@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>

Дмитрий Михайлович Бенин,

Доцент, Российский государственный аграрный университет —
 Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева,
 ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская
 Федерация
 E-mail: dbenin@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1265-4071>

Александр Викторович Подобный,

преподаватель
 Российский государственный аграрный университет — Мо-
 сковская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева,
 ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
 E-mail: a.podobnyi@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5887-1253>

Гавриловская Надежда Владимировна,

Доцент, Российский государственный аграрный университет —
 Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева,
 ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская
 Федерация
 E-mail: gavrillovskayanv@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5060-7837>

ABOUT THE AUTHORS:**Vera Leonidovna Snezhko,**

Professor, Head of Department, Russian State Agrarian University —
 Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
 49, str. Timiryazevskaya, Moscow, 127434, Russian Federation
 E-mail: vlsnejko@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>

Dmitrii Mikhailovich Benin,

Associate Professor, Russian State Agrarian University — Moscow
 Timiryazev Agricultural Academy, 49, str. Timiryazevskaya, Moscow,
 127434, Russian Federation
 E-mail: dbenin@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1265-4071>

Aleksandr Viktorovich Podobnyi,

Teacher
 Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural
 Academy, 49, str. Timiryazevskaya, Moscow, 127434, Russian
 Federation
 E-mail: a.podobnyi@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5887-1253>

Gavrilovskaya Nadezhda Vladimirovna,

Associate Professor, Russian State Agrarian University — Moscow
 Timiryazev Agricultural Academy, 49, str. Timiryazevskaya, Moscow,
 127434, Russian Federation
 E-mail: gavrillovskayanv@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5060-7837>